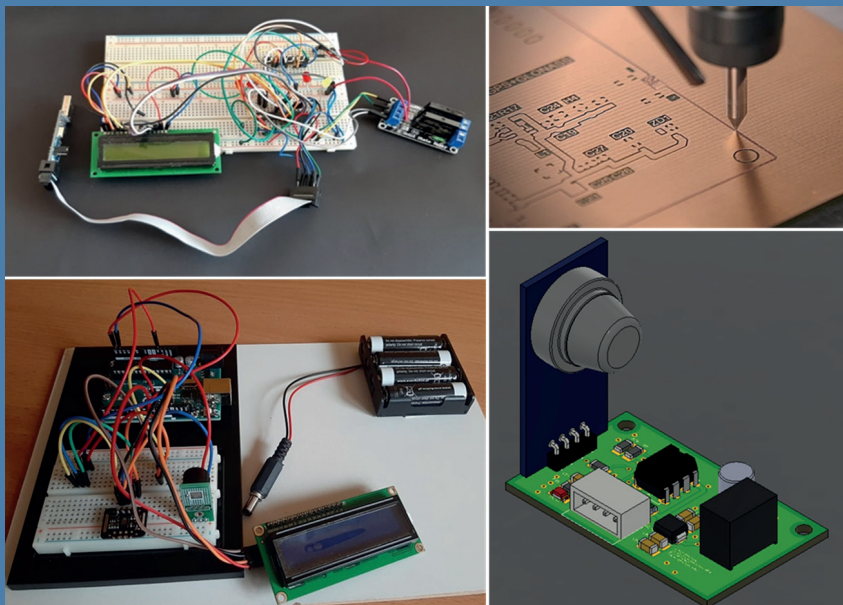


Problemy Współczesnej Inżynierii

Wybrane zagadnienia elektrotechniki i mechatroniki



redakcja

Andrzej Kociubiński

Marcin Maciejewski

Paweł A. Mazurek

Sebastian Styła

Jacek Majcher

Tomasz N. Kołtunowicz

Piotr Z. Filipek

Mariusz Duk

Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej

Lublin 2023

Problemy Współczesnej Inżynierii

Wybrane zagadnienia z zakresu elektrotechniki
i mechatroniki



**Koło Zakładowe Stowarzyszenia Elektryków Polskich
przy Politechnice Lubelskiej
– współorganizator
XII Sympozjum Naukowego Elektryków i Informatyków
SNEiI 2022**

Problemy Współczesnej Inżynierii

Wybrane zagadnienia z zakresu elektrotechniki
i mechatroniki

redakcja:

Andrzej Kociubiński

Marcin Maciejewski

Paweł A. Mazurek

Sebastian Styła

Jacek Majcher

Tomasz N. Kołtunowicz

Piotr Z. Filipek

Mariusz Duk



POLITECHNIKA
LUBELSKA
WYDAWNICTWO

Lublin 2023

Recenzenci:

dr hab. Grzegorz Wójcik, prof. uczelni (UMCS)

dr hab. inż. Tomasz Rymarczyk, prof. uczelni (Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie)

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

ISBN: 978-83-7947-558-2

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
www.wpl.pollub.pl
ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin
tel. (81) 538-46-59

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl
Książka udostępniona jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa – na tych warunkach 4.0 Międzynarodowe (CC BY-SA 4.0)

SPIS TREŚCI

PRZEDMOWA	7
1 BARTOSZ CZERNIAK <i>Projekt stanowiska do symulacji lotu drona</i>	9
2 MAŁGORZATA CHEĆ <i>Wykorzystanie nowoczesnych technologii w motoryzacji</i>	21
3 ANTONI JANKOWSKI <i>Urządzenie do kontroli parametrów trawienia miedzi na płytkach drukowanych</i>	30
4 KRZYSZTOF PĘCZEK, MATEUSZ ŁAKOMSKI, BARTŁOMIEJ GUZOWSKI <i>Metodologia wytwarzania światłowodów przewężanych</i>	42
5 ALICJA MIĘKINA <i>System sterowania układem napędowym wysokosprawnego pojazdu prototypowego</i>	53
6 SZYMON SZEWC <i>Układ do kontroli zasilania z ogniwa wodorowego w wysokosprawnym pojeździe prototypowym</i>	67
7 BARTOSZ JABŁOŃSKI <i>Analiza zaburzeń elektromagnetycznych trolejbusów na podstawie taboru miejskiego przedsiębiorstwa miejskiego</i>	80
8 DOMINIK WOŹNIAK <i>Wykorzystanie Arduino w budowie aparatury medycznej – projekt stanowiska z pulsoksymetrem</i>	94
9 WOŁODYMYR HRYSENKO <i>Analiza wybranych układów przetwornic DC-DC</i>	104
10 YELYZAVETA SIRKO, MATVII AKSENKO, SONIA DOLECKA, ALIAKSEI SHCHAPIŁA <i>Parametry techniczne w diagnostyce systemu Common Rail metodą DMC</i>	113
11 WOJCIECH OLECH <i>Przegląd metod wyznaczania przebytej trasy dla mobilnych platform robotycznych</i>	120
12 KLAUDIA NOWAK, PAULINA NOWAKOWSKA <i>Aplikacje mobilne jako skuteczny sposób komunikacji z klientem</i>	128
13 PRZEMYSŁAW SMAGA <i>Stanowisko z miernikiem czasu reakcji</i>	140
14 WOJCIECH MAJ, PIOTR ŁACH <i>System monitorowania sygnałów biologicznych w diagnostyce obciążenia w sesjach treningowych sportowców</i>	149
15 MONIKA STYŁA <i>Wybrane zagadnienia dotyczące symulacji numerycznych na przykładzie anteny dipolowej w bliskim polu z użyciem platformy sim4life</i>	160

16	BARTŁOMIEJ SKOREK	
	<i>Architektura aplikacji sterującej platformą robotyczną</i>	168
17	ALEKSANDER CHUDY	176
	<i>Maszyny elektryczne stosowane w samochodach elektrycznych i hybrydowych</i>	
	INFORMACJE O XII SYMPOZJUM NAUKOWYM ELEKTRYKÓW I INFORMATYKÓW	184
	SPONSORZY I INSTYTUCJE WSPIERAJĄCE XII SYMPOZJUM NAUKOWE ELEKTRYKÓW I INFORMATYKÓW	186
	PATRONI XII SYMPOZJUM NAUKOWEGO ELEKTRYKÓW I INFORMATYKÓW	187

PRZEDMOWA

Szanowni Uczestnicy i Sympatycy Sympozjum, Czytelnicy

Po raz kolejny przekazujemy Państwu monografię będącą zbiorem wybranych i recenzowanych artykułów po XII już edycji studenckiego Sympozjum Naukowego Elektryków i Informatyków (SNEiI 2022), jakie odbyło się w dniach 10–11 marca 2022 roku na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Wydarzenie miało charakter hybrydowy, mieliśmy aktywne wystąpienia w formie zdalnej, jak i bezpośrednie wystąpienia na naszym Wydziale. Te ostatnie szczególnie cieszą, były bowiem wydarzeniem aktywizującym i wzmacniającym integrację naszego akademickiego środowiska w popandemicznym czasie.

Tradycyjnie wydarzenie swoim patronatem objęli: JM Rektor Politechniki Lubelskiej, Dziekan Wydziału Elektrotechniki i Informatyki, Prezes Urzędu Komunikacji Elektronicznej oraz Lubelski Oddział Stowarzyszenia Elektryków Polskich. Organizatorami Sympozjum były studenckie koła naukowe z Wydziału Elektrotechniki i Informatyki wspierane członkami wydziałowego Samorządu Studenckiego oraz członkami Koła SEP przy Politechnice Lubelskiej.

Pomimo pandemicznego czasu utrzymaliśmy ciągłość wydarzenia i aktywność studentów, kołowiczów i młodych naukowców. I tym razem obserwowaliśmy wymianę informacji i doświadczeń praktycznych w gronie studentów, nauczycieli akademickich i przedstawicieli otoczenia społeczno-biznesowego. Tematyka Sympozjum, jak co roku, obejmowała obszary dziedziny techniki ściśle powiązane z działalnością naukową i dydaktyczną naszego Wydziału: elektrotechniką, mechatroniką, informatyką, inżynierią biomedyczną i multimediami.

XII Sympozjum rozpoczęła sesja zdalna. Po niej odbyła się sesja otwarta, którą zaszczycił swoim udziałem Dziekan Wydziału Elektrotechniki i Informatyki dr hab. inż. Paweł Węgierek, prof. uczelni. Przybyli pracownicy i studenci Politechniki wysłuchali prelekcji *Spektroskopia dielektryczna gleby – techniki pomiarowe i zastosowania*, wygłoszonej przez dr hab. Agnieszkę Szyplowską z Instytutu Agrofizyki, Polskiej Akademii Nauk. We wszystkich panelach wzięli udział studenci z Politechniki Łódzkiej, Uniwersytetu Szczecińskiego, Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie oraz Politechniki Lubelskiej. Uczestnicy wygłosili 19 referatów, będących wynikiem ich badań naukowych, prac dyplomowych i projektów realizowanych w kołach naukowych. Drugi dzień Sympozjum poświęcony był doskonaleniu

zawodowemu studentów – dla zainteresowanych studentów zaplanowany został kurs komercjalizacji badań naukowych.

Prezentowane w trakcie Sympozjum referaty cechował wysoki poziom merytoryczny, czego dowodem jest niniejsza publikacja pokonferencyjna. Publikacja jest rezultatem pracy wielu uczestników konferencji. Znajdą w niej Państwo efekty prowadzonych dyskusji, ale przede wszystkim są tu studenckie prace dające możliwość bliższego poznania problemów, wyzwań i dylematów, z jakimi wiąże się dzisiejsza elektrotechnika, mechatronika i informatyka. Zakładamy, że zebrany zbiór referatów będzie interesujący dla wielu Czytelników, również tych niezajmujących się profesjonalnie tymi zagadnieniami.

*Komitet Organizacyjny Sympozjum
i Redaktorzy*

Bartosz CZERNIAK

Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Koło Naukowe
Elektroekologów ELMECOL

PROJEKT STANOWISKA DO SYMULACJI LOTU DRONA

1. Wstęp

Prężny rozwój elektrotechniki, elektroniki oraz związanymi z nimi branż technicznych dał człowiekowi możliwość tworzenia narzędzi wykraczających możliwościami ponad urządzenia bądź narzędzia znane ludzkości do tej pory. Rozwój zauważalny jest we wszystkich dziedzinach życia, pracy, rekreacji i wielu innych. Nowo projektowane oraz rozwijane technologie stanowią nieocenione ułatwienie wszelkich aspektów działalności człowieka. Jednym z zyskujących na popularności oraz odnajdujących coraz to nowsze zastosowania w praktyce jest wynalazek zwany bezzałogowym statkiem powietrznym (BSP) bądź dronem. Nauka podstaw pilotażu bezzałogowych statków powietrznych oraz rozwijania i szlifowania umiejętności nie należy do najprostszych zadań. Nieumiejętne posługiwanie się dronem może przyczynić się do zagrożenia spowodowania zdarzeń niepożądanych, w wyniku których może dojść do zagrożenia utraty życia lub zdrowia, a także spowodowania zniszczeń niosących za sobą straty materialne. Brak znajomości podstaw pilotażu może także doprowadzić do złamania przez pilota przepisów prawa, co skutkuje odpowiedzialnością karną bądź finansową. Aby przygotować potencjalnego pilota do obsługi urządzenia i jednocześnie zminimalizować potencjalne skutki niepożądane, należało zgłębić tematykę nauki pilotażu oraz opracować możliwie prostą i intuicyjną metodę szkolenia pilotów. Rozwiązaniem cechującym się szczególnie wysoką liczbą zalet jest przeprowadzanie szkolenia oraz pierwszych lotów w środowisku symulacyjnym. Na rynku komercyjnym istnieje wiele systemów pozwalających na przeprowadzenie symulacji lotu dronem. Istotą niniejszego projektu jest analiza rynkowa dostępnych komercyjnych rozwiązań pod względem wad, zalet, mocnych i słabych stron. Obranie rozwiązania cechującego się największą wszechstronnością i liczbą zalet w stosunku do rozwiązań innych producentów, a także zaprojektowanie koncepcyjnego ćwiczenia dydaktycznego mającego posłużyć szkoleniu i rozwojowi kwalifikacji pilotów bezzałogowych statków powietrznych [1].

2. Przegląd rozwiązań służących do symulacji lotu drona

W obecnym czasie rynek komercyjnych rozwiązań służących do przeprowadzania w warunkach symulacyjnych wirtualnych lotów bezzałogowymi statkami powietrznymi jest bogaty. Wzmożony rozwój elektroniki, elektrotechniki, awioniki oraz najnowsze osiągnięcia we wspomnianych dziedzinach przełożyły się bezpośrednio na spopularyzowanie i rozwój bezzałogowych statków powietrznych. Wraz z rosnącym znaczeniem technologicznym dronów w gwałtownym tempie rośnie zapotrzebowanie na przeszkolonych pilotów. Wzrost zapotrzebowania na pilotów przeszkolonych z metodyki wykonywania przelotów implikuje popyt na rozwiązania komercyjne pozwalające na zdobycie wiedzy w tematyce obsługi BSP oraz pilotażu. Na rynku pojawiają się coraz nowsze i coraz bardziej rozwinięte rozwiązania symulacyjne produkowane przez producentów gier, programów symulacyjnych, zespołów hobbystów oraz producentów dronów. Spośród pojawiających się rozwiązań wyróżnia się szerokie spektrum programów, mających różne zalety, które mogą w znaczący sposób przełożyć się na praktykę pilotażu oraz wady, w postaci błędów programowych oraz niespójności w stosunku do rzeczywistości. Jednym z kluczowych zadań podczas pracy nad projektem było przeanalizowanie dostępnych na rynku rozwiązań komercyjnych i wyekstrahowanie z nich tych najbardziej konkurencyjnych, dających przyszłym pilotom bezzałogowych statków powietrznych najwięcej doświadczenia oraz umiejętności przekładających się na przyszłą praktykę oraz przeprowadzanie rzeczywistych lotów. W niniejszej pracy, analizowane są jedno z najbardziej popularnych i cenionych przez pilotów dronów symulacji [2, 3].

2.1. DJI Flight Simulator

Oprogramowanie DJI Flight Simulator zostało zaprojektowane oraz wydane przez jednego z najbardziej znanych i cenionych na rynku producentów dronów – SZ DJI Technology. Obecnie koncern posiada 70% udziałów w światowym rynku dronów. W fabrykach DJI powstają powszechnie znane i cenione drony komercyjne z serii Mavic, Phantom, Inspire oraz Enterprise [4, 5].

Oprogramowanie DJI Flight Simulator występuje w wielu wariantach – darmowym oraz Enterprise i Energy – wersje rozszerzone o pakiet dronów przemysłowych oraz zadaniowych oraz pakiet misji związanych z inspekcją oraz naprawą linii elektroenergetycznych [6]. Ze względu na bezpośredni związek firmy DJI ze środowiskiem symulacyjnym, zauważalna jest wyłączność producenta na symulator – w programie zamodelowane są jedynie produkty tworzone przez DJI w postaci dronów i kontrolerów. Oprogramowanie posiada wiele trybów pozwalających na stawianie pierwszych kroków (lot dowolny), a także rozwój i szlifowanie swoich umiejętności na różnego rodzaju torach

przeszkód bądź misjach czasowych. Grafika oraz dźwięki występujące w aplikacji są realistyczne oraz pozwalają na zwiększoną immersję operatora. Mapy utworzone w aplikacji są szczegółowe i ciekawe. Fizyka lotu przygotowana przez producenta jest dopracowana i trudno o napotkanie błędów bądź zdarzeń mających negatywny oddźwięk w kontekście nauki latania dronem oraz realizmu całej symulacji. Symulator pozwala na obsługę za pomocą klawiatury komputera. Aczkolwiek, ze względu na różnicę metodyki działania klawiatury komputera i kontrolera do drona, nie jest sugerowanym stawianie pierwszych kroków w symulatorze lotu dronem przy pomocy klawiatury komputerowej. Rysunek 1 przedstawia zrzut ekranowy z aplikacji DJI Flight symulator.



Rys. 1. Tryb widoku FPV w symulatorze DJI Flight symulator

2.2. FPV Freerider Recharged

FPV Freerider to aplikacja opracowana 17 marca 2018 roku przez Johna Holmvalla oraz wydana przez studio Jord&Eld. Jest powszechnie znanym i cenionym oprogramowaniem do symulacji lotu dronem FPV (ang. *First Person View*) w świecie sympatyków bezałogowych statków powietrznych [7]. Aplikacja jest skierowana przede wszystkim do pilotów nie posiadających zbyt dużego budżetu. Jej cena to 22 zł w przypadku wersji podstawowej oraz 36 zł w wersji „Recharged”, cechującej się ulepszoną szatą graficzną. Ponadto, dostępne jest rozszerzenie dodające do symulatora paczkę dziesięciu dodatkowych map, w tym siedmiu mających odwzorowanie w rzeczywistości w postaci torów z mistrzostw ligi wyścigów dronów MultiGP [7].

Wymagania sprzętowe symulatora FPV Freerider Recharged są stosunkowo niskie i przystępne, przez co aplikacja może działać poprawnie nawet na starszych komputerach. Środowisko jest więc szczególnie atrakcyjne dla

posiadaczy nie najnowszego sprzętu. Wybór symulowanego w programie drona nie jest dostępny. Parametryzacje lotu i maszyny zostały sprowadzone do modyfikacji ustawień parametrów i własności fizycznych tak samego urządzenia, jak i otoczenia. Producent dał użytkownikowi dostęp do manipulacji ustawie-niami, takimi jak masa urządzenia, ilość wirników, responsywność na manipulacje dokonywane na kontrolerze lotów itp. Aplikacja współpracuje z wieloma dostępnymi na rynku kontrolerami lotów. Podstawowym warunkiem sparowania kontrolera jest możliwość podłączenia go do komputera [7].

Symulator nie jest rozbudowany pod względem udostępnianych pilotom udogodnień. Jedynym dostępnym trybem lotu jest surowy tryb wolnego lotu, nie stawiający żadnych ograniczeń lub wymagań przed pilotem. Symulator skupia się na samodzielnym poruszaniu się po mapach i rozwijaniu w ten sposób zdolności pilotażu. Ponadto, w aplikacji nie został uwzględniony żaden interfejs. Rysunek 2 przedstawia zrzut ekranowy z aplikacji FPV Freerider Recharged. Widok uzyskiwany podczas przelotu ogranicza się do widoku z kamery drona bądź widoku z perspektywy stojącego na ziemi pilota operującego bezzałogowym statkiem powietrznym.



Rys. 2. Tyb widoku FPV w symulatorze FPV Freerider Recharged

2.3. AI Drone Simulator

AI Drone Simulator to narzędzie symulacyjne stworzone przez Diophante Studio. Program został wydany 27 maja 2021 roku. Producent odpowiedzialny za realizację środowiska symulacyjnego jest znany jedynie z produkcji AI Drone Simulator oraz dodatku obejmującego mapę inspirowaną Nowym Jorkiem lat pięćdziesiątych XX wieku. Mimo stosunkowo krótkiego czasu obecności na rynku, aplikacja zebrała wiele pozytywnych recenzji i zaskarbiła sobie przychylność amatorów dronów z całego świata [8].

Program, analogicznie do wcześniej omawianego FPV Freerider Recharged, dostępny jest na platformie Steam. Cena, jaką należy uiścić za dostęp do aplikacji, wynosi 108 złotych. Porównując z wcześniej omawianymi aplikacjami, cena nie należy do najniższych, lecz zdecydowanie nie jest również wygórowana, biorąc pod uwagę uzyskiwaną zawartość. Aby uruchomić program, należy dysponować stosunkowo nowym komputerem o stosunkowo wysokich parametrach technicznych [8]. Środowisko programowe opracowano pod kątem szlifowania zdolności lotów w trybie sportowym FPV. Bezpośrednio w aplikacji nie jest wyszczególnione jakim dronem wykonuje się przelot. Ponadto, nie jest to żaden z rzeczywistych występujących na rynku modeli. Użytkownik aplikacji ma dostęp do całej gamy ustawień, których można dokonać w aplikacji, takich jak responsywność kontrolera, aerodynamika statku powietrznego, parametryzacja mocy silników oraz parametryzacja rozmiarów samego urządzenia.

W programie występuje możliwość prostego sparowania dowolnego kontrolera ze środowiskiem programowym, o ile można podłączyć kontroler do komputera. Odbywa się to na zasadzie czytania ruchu i poruszania odpowiednim dźwączkiem kontrolera. Simulator skupia się na trybie FPV z uwzględnieniem trybu acro, rzut ekranowy został zaprezentowany na rysunku 3. Sterowanie dronem w aplikacji nie należy do najłatwiejszych w dodatku występuje konieczność przyzwyczajania się do modelu lotu, a także wyrobienia swoistej pamięci mięśniowej, odpowiedzialnej za wykonywanie ruchów drona, podczas gdy świadomość skupia się na obieraniu najlepszej dla urządzenia trasy. Jednakże, mnogość scenerii i przeszkód na opracowanych przez producenta mapach stanowi ciekawe środowisko do rozwijania umiejętności przez bardziej doświadczonych pilotów. Środowisko symulacyjne ze względu na model lotu oraz możliwą parametryzację warunków sprawdzi się idealnie podczas poznawania nowych akrobacji oraz szlifowania dotychczasowo poznanych. Mapy są na tyle ciekawe, że abstrahując od głównych powodów stosowania symulatora, czyli nauki bądź szlifowania zdolności pilotażu, przyciągają użytkownika w celu rekonesansu i sprawdzenia, jak wiele niespodzianek zostawił mu producent oprogramowania. Cała oprawa graficzna zachęca do spędzenia w symulatorze długich godzin, co niewątpliwie przełoży się na rozwój umiejętności pilotażu. Producent wprowadził do symulacji niuanse mające spory wpływ na poczucie realizmu w symulacji. Lecąc dronem w niewielkiej odległości od ziemi zauważalny jest cień rzucany przez drona. Przy oddaleniu się zbyt daleko od obiektów na mapie nie występuje zjawisko niewidzialnej ściany, ograniczającej przestrzeń lotu, natomiast obraz uzyskiwany wirtualnie z drona zaczyna śnieżyć i się rozmazywać, analogicznie do rzeczywistości, gdy wylatuje się poza obszar zasięgu systemu przesyłania obrazu do wirtualnych okularów VR pilota.



Rys. 3. Tryb widoku FPV w symulatorze AI Drone Simulator

2.4. Liftoff: FPV Drone Racing

Liftoff: FPV Drone Racing to aplikacja symulująca lot drona stworzona przez producenta LuGus Studios. Aplikacja została wydana 13 września 2018. Producent znany jest głównie z symulatora Liftoff, ale nie jest to jedyne jego dzieło. Poza symulatorem, studio wydało także dwie niszowe gry – Midnight Protocol oraz Runes of Brennos, które jednak nie stały się równie popularne, co symulator. Program ten cieszy się pozytywnymi opiniami wśród sympatyków tematyki pilotażu dronów. Aplikacja jest dostępna na platformie Steam w wersji podstawowej w cenie 72 zł. Ponadto, twórca opracował dodatek do programu w cenie 22 zł. Zawartość dodatkowa wynikająca z posiadania rozszerzenia, to mapy znane z podstawowej wersji w trybie nocnym oraz dodatki graficzne nie mające innego przełożenia na symulator niż wizualne [9].

Producent umieścił w aplikacji 28 komercyjnych dronów FPV. Drony posiadają ogólnie przypisane parametry dające pogląd na możliwy udźwig urządzenia, masę własną, prędkość maksymalną i sterowność urządzenia. Ponadto, każdy z wielowirnikowców można parametryzować pod kątem responsywności na ruchy kontrolera oraz inne parametry urządzeń. Kontrola lotu w symulatorze opiera się o fizyczny kontroler bądź jego zamiennik w postaci kontrolera do gier. Parowanie urządzenia z aplikacją realizowane jest przez kreator, który sprawnie przeprowadza użytkownika przez proces parowania kontrolera. Narzędzie to usprawnia proces kalibracji i sprawdzenia, czy proces przebiegł pomyślnie. W aplikacji występują standardowe dla programów symulacji lotu drona tryby, spotykane już wcześniej podczas zapoznawania

z pozostałymi rozwiązaniami. Do dyspozycji szkolącego się pilota został oddany tryb wprowadzający, obejmujący materiały filmowe oraz trasy pozwalające na stawianie pierwszych kroków w pilotażu, zaczynając od najprostszych manewrów, a kończąc na złożonych akrobacjach. Ponadto, dostępne są tryby, takie jak: tryb wolnego lotu, pozwalający na swobodne poruszanie się po udostępnionych przez producenta mapach, tryb wyścigowy, zestawiający pilota z innymi wirtualnymi pilotami, na trasie z przeszkodami i bramkami, przez które należy przelatywać, by ukończyć wyścig, tryb freestyle, służący do nauki i rozwijania umiejętności wykonywania akrobacji.

Grafika w programie symulacyjnym, jest przyjemna dla oka i całkowicie wystarczająca. Mapy stworzone przez producenta, co prawda nie są tak wypełnione ciekawostkami i obiektami, jak mapy znane z innych symulatorów, aczkolwiek w pełni spełniają swoją nadrzędną rolę skupiania pilota na czynnościach związanych z pilotażem. Przestrzeń udostępniona do lotu względem innych symulatorów nie jest duża, ale nie jest też ograniczająca (poza mapami, których główna trudność polega na ograniczeniu przestrzeni lotu).

Dźwięki w aplikacji ograniczają się do dźwięków silników podczas lotu oraz żywiołowej muzyki w menu. O ile występowanie dźwięków silników jest niezbędne do osiągnięcia wrażenia realizmu przelotu, o tyle dźwięki z menu są drażniące i momentami utrudniają skupienie. Dynamiczna muzyka została przez twórców dodana, by oddać dynamiczny i szybki charakter całego symulatora, jednak w niektórych sytuacjach poczucie nadmiernej dynamiki potęgowanej muzyką tła staje się przytłaczające.



Rys. 4. Tryb widoku FPV w symulatorze Liftoff: FPV Drone Racing

W aplikacji największy nacisk kładzie się na sterowanie sportowe w trybie akrobatycznym. Model sterowania nie jest najbardziej odpowiedni dla nowicjuszy, nie będących obytymi ze światem pilotażu dronów sportowych FPV. Dodatkowo, zestaw bezałogowych statków powietrznych udostępnionych przez producenta nie ułatwia procesu edukacji niedoświadczonych pilotów. Drobnym ukłonem producenta w stronę nowicjuszy jest zestaw łatwych, otwartych map cechujących się dużą przestrzenią i swobodą ruchu urządzenia.

2.5. Uncrashed: FPV Drone Simulator

Uncrashed: FPV Drone Simulator to kolejna aplikacja służąca do symulacji lotu dronem w niniejszym zestawieniu. Nazwa programu wskazuje na bezpośredni związek symulowanego w programie lotu z lotami sportowymi, przeprowadzanymi w trybie widoku pierwszoosobowego FPV. Aplikacja została stworzona przez producenta Louis Rochette. Jest to jedyny program wydany przez tego producenta. Aplikacja została wydana 1 września 2021 roku i jest dostępna na platformie Steam w cenie 54 złotych. Program symulacyjny jest stale rozwijany. Aktualizacje zawierające nowe mapy bądź elementy symulatora, a także naprawiające i rozwijające funkcjonalności aplikacji pojawiają się w miarę regularnie [10].

Analogicznie do aplikacji AI Drone Simulator nie jest wyszczególnione, jakim dronem przeprowadzane są przeloty w programie. W aplikacji przygotowane jest kilka parametrów dronów, natomiast poza odgórnie narzuconymi, użytkownik ma dostęp do suwaków zmieniających parametry drona, takie jak długość śmigieł, powierzchnia śmigieł, waga statku, moc silników i wiele innych. Dla bardziej zaawansowanych pilotów dostępne są także ustawienia środowiskowe, takie jak grawitacja, siła wiatru i warunki pogodowe mające wpływ na fizykę symulatora. Zmiana ustawień drona jest bardzo intuicyjna i uproszczona, przez co nawet początkujący piloci są w stanie skonfigurować program pod swoje potrzeby. Do sterowania wirtualnym lotem można wykorzystać dostępne na rynku kontrolery wspierające możliwość sparowania kontrolera z komputerem.

Parowanie kontrolera z aplikacją odbywa się na zasadzie przypisywania osi wychyłu poszczególnych drążków kontrolera do odpowiednich wychyłów drążków w symulatorze. Proces parowania jest przystępny dla użytkownika i intuicyjny – parowanie dowolnego kontrolera nie powinno być problematyczne nawet dla osób niespecjalnie obeznanymi w aplikacjach symulacyjnych podobnego rodzaju.

W aplikacji występuje dwa podstawowe tryby lotu – tryb wolnego lotu oraz tryb wyścigowy. Loty w aplikacji realizowane są na mapach przygotowanych przez twórców aplikacji. Na chwilę obecną dostępne jest 9 map. Na każdej

z nich możliwe jest wykonywanie przelotów w trybie wolnym bądź w trybie wyścigu z możliwością bicia ustanowionych rekordów czasowych.

Grafika w aplikacji przyciąga uwagę na tyle, że urozmaica proces edukacji pilota. Silnik graficzny dobrany jest odpowiednio, a tekstury i otoczenie zostały stworzone z należytą dokładnością. Śmiało można zaryzykować stwierdzenie, że mapy stworzone przez producenta urealniają przestrzeń lotu oraz pozytywnie wpływają na odbiór całego środowiska. Grafika jest zdecydowanie mocną stroną produktu. Mapy sprawiają wrażenie dopracowanych i przemyślanych. Aplikacja kładzie największy nacisk na loty FPV, z uwzględnieniem lotów wyczynowych oraz wyścigowych. Interfejs graficzny lotu jest prosty, aczkolwiek zawarte są w nim niezbędne elementy, takie jak tryb lotu, prędkość czy odległość względem punktu startu. Istotne jest także przywiązanie do szczegółów w celu podniesienia realizmu aplikacji – podczas zbliżania się do krańców mapy widok uzyskiwany z perspektywy drona staje się rozmyty, a na ekranie wyświetlana jest informacja o powrocie do punktu startu po upływie sześciu sekund. Przykładowy zrzut z symulatora przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Tryb widoku FPV w symulatorze Uncrashed: FPV Drone Simulator

Dźwięki w aplikacji ograniczone są do minimum, analogicznie do dźwięków z większości poprzednich aplikacji. W menu występuje nieprzyciągająca i nienarzucająca się muzyka w tle. Bezpośrednio w czasie wykonywania przelotu pilot słyszy dźwięki silników intensyfikujące się w zależności od wykonywanych manewrów oraz dźwięk wiatru opływającego maszynę.

3. Projekt ćwiczenia laboratoryjnego

Projekt ćwiczenia laboratoryjnego został opracowany bazując na rozwiązaniu cechującym się największą ilością zalet w zestawieniu z pozostałymi analizowanymi środowiskami programowymi. W celu utworzenia dydaktycznego ćwiczenia laboratoryjnego wykorzystane zostało rozwiązanie producenta Diophante Studio – AI Drone Simulator. Ćwiczenie laboratoryjne będzie polegać na realizacji zadań wyszczególnionych w instrukcji oraz dokumentacji w pliku nagraniowym, z którego w fazie końcowej zostaną wybrane zrzuty ekranowe dokumentujące realizację poszczególnych zadań i będące podstawą do utworzenia sprawozdania z wykonania danego ćwiczenia.

Instrukcja stanowi przekrojowy schemat działania, zaczynając od obsługi programu służącego do nagrywania ekranu – OBS, poprzez konfigurację środowiska programowego, kończąc na metodyce wykonania poszczególnych poleceń do wykonania podczas wirtualnego przelotu. Instrukcja realizacji poleceń obejmuje podstawy wykonywania przelotów, najprostsze manewry wykonywane bezzałogowym statkiem powietrznym oraz stawia nacisk na praktyczne umiejętności pilotażu, mające pokrycie w wymaganiach stawianych przed pilotem drona w warunkach rzeczywistych, w kontekście wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych w różnych okolicznościach.

Instrukcje do realizacji obejmują między innymi elementy, takie jak:

- przeloty w pobliżu kominów – będące odzwierciedleniem realizowanych w rzeczywistości przelotów, w celu badania jakości powietrza i obecności zanieczyszczeń w dymie wydobywającym się z kominów;
- przeloty nad poruszającymi się obiektami, takimi jak pociągi czy samochody oraz śledzenie ich – wykorzystanie dronów w celach kontroli drogowych, poszukiwania osób zaginionych, inspekcji pojazdów, a także przygotowanie do nagrywania obiektów w ruchu za pomocą kamery zainstalowanej na pokładzie bezzałogowego statka powietrznego;
- przeloty w miejscach trudnodostępnych – nacisk na naukę umiejętności lotu w trudnych warunkach, wyczucia maszyny oraz wyrobienie zachowań w warunkach zagrożenia oraz pamięci mięśniewej stanowiącej swoistą ochronę przed zniszczeniem pilotowanego urządzenia;
- odnajdywanie określonych w instrukcji budynków – umożliwiała rozwinięcie wyobraźni pilota w odniesieniu do rozpoznawania terenu, nad którym wykonywany jest przelot oraz rozwój umiejętności przeszukiwania terenu w poszukiwaniu osób zaginionych bądź patrolowania określonej przestrzeni.

Plan działań został zaprojektowany tak, aby w choć minimalnym stopniu pokrywać wymagania stawiane przed zawodowymi pilotami dronów, a co za tym idzie stanowi dobry punkt wprowadzenia niedoświadczonych pilotów

dronów w świat bezzałogowych statków powietrznych. Warto pamiętać, że proces edukacji pilotażu to proces bardzo długotrwały. Instrukcja zajęć dydaktycznych obejmuje zadania przemyślane w ten sposób, by były możliwe do realizacji w czasie 2 godzin zajęć laboratoryjnych. W praktyce edukacja niedoświadczonego pilota może trwać setki godzin. W odniesieniu do wspomnianego faktu, niezwykle istotne jest zaangażowanie szkolonego pilota.

Program zajęć obejmuje jedynie bardzo podstawowe umiejętności, które wraz z biegiem czasu i godzinami poświęconymi na ich doskonalenie i szlifowanie, są w stanie przygotować adepta pilotażu bezzałogowym statkiem powietrznym do wykorzystania wszechstronnego narzędzia, jakim jest dron.

4. Podsumowanie

Istotą niniejszego projektu było opracowanie ćwiczenia laboratoryjnego będącego podstawowym narzędziem do zapoznania niedoświadczonych i początkujących pilotów bezzałogowych statków powietrznych z tematem pilotażu i zastosowania BSP do wielu rozwiązań. Branża bezzałogowych statków powietrznych jest bardzo obszerna i uwzględniając prognozy na nadchodzące lata jest jeszcze wiele zastosowań dronów nie wykorzystywanych do tej pory w praktyce. W związku z tym, przewiduje się, że wiele osób znajdzie zatrudnienie w branżach związanych z bezzałogowymi statkami powietrznymi bądź jako ich piloci. Sensownym więc było przygotowanie ćwiczenia dydaktycznego pozwalającego na edukację pilotażu w sposób przystępny dla nowicjuszy. Zaprojektowane ćwiczenie pozwala wykorzystać czas przewidziany na zajęcia dydaktyczne w sposób możliwie produktywny i rozwijający.

Komercyjne drony bardzo często są urządzeniami kosztującymi kilkaset złotych lub więcej. Rozpiętość cenowa może być bardzo szeroka, uwzględniając stopień skomplikowania konstrukcji, zastosowanie czy niezbędny do wykonywania określonych czynności osprzęt. Proces edukacji może być długi i kosztowny. Bezzałogowe statki powietrzne są to najczęściej urządzenia delikatne i nieprzystosowane do przeciwstawiania się trudnym warunkom, a co za tym idzie, bardzo łatwo je zniszczyć. W związku z tym, istotnym było odnalezienie sposobu pozwalającego na możliwą minimalizację kosztów edukacji. Na znaczące zmniejszenie kosztów przekłada się zastosowanie środowiska symulacyjnego. W przypadku zastosowania symulatora, ograniczany jest koszt ponoszony na naprawy usterek wynikających z wypadków będących nieodzowną częścią procesu dydaktycznego. Koszt przedsięwzięcia jest zminimalizowany do zakupu oprogramowania i stanowiska komputerowego, na którym program będzie pracował. Z kalkulacji własnych wynika, że zamiana nauki przy użyciu rzeczywistego urządzenia na naukę z użyciem środowiska

programowego może przynieść nawet kilkunastokrotnie mniejsze straty budżetowe jednostki szkolącej pilotów.

Wykorzystane środowisko programowe pozwala na przyszłościowe rozwinięcie ćwiczenia w oparciu o nowe cele i elementy konieczne do wykonania podczas przelotu. Wszechstronność i rozległość środowiska programowego pozwalają na stworzenie zróżnicowanych scenariuszy w oparciu o dostępny w programie zestaw map stworzonych przez producenta, a co za tym idzie, instrukcję do ćwiczenia można dostosować do warunków obecnie panujących.

Literatura

1. Audronis T., *Drony. Wprowadzenie*, Helion, Gliwice 2015.
2. Forcepol, <https://www.forcepol.com> , dostęp 29.03.2022.
3. Wszywacz W., *Drony*, Brzezia Łąka k/Wrocławia, Poligraf 2020.
4. Shenzhen DJI Sciences and Technologies Ltd , <https://we.dji.com>, dostęp 16.04.2022.
5. DJI, <https://store.dji.com/pl>, dostęp 16.04.2022.
6. DJI, <https://www.dji.com/pl/simulator>, dostęp 16.04.2022.
7. Valve Corporation, https://store.steampowered.com/app/813530/FPV_Freerider_Recharged/, dostęp 16.04.2022.
8. Valve Corporation, https://store.steampowered.com/app/1608560/AI_Drone_Simulator/, dostęp 16.04.2022.
9. Valve Corporation, https://store.steampowered.com/app/410340/Liftoff_FPV_Drone_Racing/, dostęp 16.04.2022.
10. Valve Corporation, https://store.steampowered.com/app/1682970/Uncrashed_FPV_Drone_Simulator/, dostęp 16.04.2022.

Małgorzata CHEĆ

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Wydział Inżynierii Produkcji, Studenckie Koło Naukowe Zarządzania i Ekonomii

WYKORZYSTANIE NOWOCZESNYCH TECHNOLOGII W MOTORYZACJI

1. Wstęp

Wraz z rozwojem technologii w motoryzacji z roku na rok pojawiają się coraz to nowsze rozwiązania mające na celu nie tylko zwiększenie komfortu jazdy kierowcy i pasażerów, ale również poprawę bezpieczeństwa wszystkich uczestników ruchu. Podstawowym aspektem, który towarzyszy każdej osobie podróżującej pojazdami jest bowiem ich poziom bezpieczeństwa; dotyczy to zarówno motocykli, aut osobowych, ciężarowych, jak też pociągów czy samolotów. Stąd też celem pracy jest ukazanie wpływu nowych technologii na bezpieczeństwo w samochodach osobowych. Celem jest też przedstawienie rozwoju motoryzacji na podstawie prezentacji wybranych rozwiązań dostępnych na rynku nowych samochodów osobowych, a także wskazanie wpływu rozwoju nowoczesnych systemów w motoryzacji na poprawę bezpieczeństwa, poprzez analizę danych udostępnianych przez Główny Urząd Statystyczny i raportów dotyczących bezpieczeństwa sporządzonych przez polską policję.

2. Bezpieczeństwo aktywne i pasywne

Za bezpieczeństwo pojazdów odpowiada szereg czynników kształtujących ich zachowanie podczas wypadku. Jednak, znaczny wpływ wywierają również czynniki zapobiegające niepożądanym zdarzeniom. Dlatego wyróżnić można dwa rodzaje bezpieczeństwa w pojazdach: aktywne (czynne) oraz pasywne (bierne). Za bezpieczeństwo aktywne odpowiada szereg urządzeń i zespołów mających wpływ na widoczność czy masę pojazdu, ale także na drogę hamowania, prędkość oraz systemy, takie jak asystent zmiany pasa ruchu. Zapobiegają one niepożądanym zdarzeniom, np. system kontroli trakcji umożliwia jazdę ze zmniejszonym poślizgiem kół, co zapobiega sytuacji wpadania w poślizg [1]. Z kolei na bezpieczeństwo pasywne składają się takie systemy, które działając podczas wypadku powodują, że jego skutki są mniej dotkliwe dla osób znajdujących się w pojeździe oraz dla otoczenia [2]. Wśród

nich można wyróżnić pasy bezpieczeństwa, kurtyny powietrzne, kolor nadwozia czy tzw. klatki bezpieczeństwa [3].

Poza wymienionymi wyżej rodzajami bezpieczeństwa, można wyróżnić jeszcze jedno – bezpieczeństwo powypadkowe. Określane jest przez czynniki, które wpływają na zdrowie ludzi i przyrodę, takie jak m.in. czy pojazd nadaje się do naprawy oraz jakie części auta mogą być wykorzystane ponownie [3]. Jednostką badającą wpływ wykorzystania technologii w określonych pojazdach na bezpieczeństwo poruszania się nimi jest Euro NCAP, czyli Program Oceny Nowego Samochodu. Organizacja ta umożliwia konsumentom porównanie poziomu bezpieczeństwa w pojazdach poprzez przyznawanie gwiazdek, a auta biorące udział w badaniach są anonimowo kupowane przez tę organizację, dzięki czemu są to pojazdy takie same, jak te które może dostać potencjalny przyszły właściciel w salonie samochodowym. Uzyskane gwiazdki przekładają się na informacje dostarczane konsumentom oraz producentom. Organizacja Euro NACP wykorzystuje szereg testów określonych modeli samochodów, wyniki udostępnia w formie raportów, a każdy konsument ma do nich swobodny dostęp. Raporty takie zawierają [4]:

- test uderzenia czołowego,
- test zderzenia bocznego z samochodem,
- test zderzenia bocznego z trwałą przeszkodą,
- test ochrony pieszych,
- test whiplash, (test ochrony karku kierowcy i pasażerów),
- test asystentów prędkości i systemów przypominających o niezapiętych pasach,
- test systemów automatycznego hamowania,
- test systemów kontroli stabilizacji pojazdu.

3. Przykłady nowoczesnych technologii używanych w pojazdach

W celu zwiększenia bezpieczeństwa, jak również komfortu jazdy kierowcy, pasażerów i innych uczestników ruchu, wielu producentów pojazdów decyduje się na wdrażanie coraz to nowszych rozwiązań. Samochody, które wydawały się bezpieczne jeszcze kilka lat temu, zostają zastąpione nowszymi, a używane niedawno technologie stają się przestarzałe [4]. Poniżej przedstawiono kilka rozwiązań obecnie dostępnych na rynku. Celem jest zaprezentowanie możliwości dostępnych obecnie w sprzedaży nowych pojazdów, a przez to ukazania rozwoju motoryzacji na przestrzeni ostatnich lat.

3.1. Aktywny tempomat z automatyczną regulacją prędkości

Od dawna pojazdy są wyposażone w tempomat, czyli urządzenie pozwalające na jazdę ze stałą prędkością. Jednak największe koncerny produkujące auta osobowe, np. Volkswagen, Skoda czy Toyota, zdecydowało się na zainstalowanie bardziej zaawansowanych systemów. Dzięki temu pojazdy stają się autonomiczne w większym stopniu oraz zapobiegają powstawaniu wypadków spowodowanych np. poprzez nieuwagę kierowcy [5–7].

Oferowany przez wyżej wymienionych producentów aut system działa głównie na podstawie zainstalowanych w pojeździe radarów i kamer, czy też współpracuje z nawigacją. Samochód nie tylko może poruszać się na podstawie zadanej przez kierowcę prędkości, ale również może sam dostosowywać ją do panującego na trasie ruchu czy infrastruktury, takiej jak skrzyżowania, zakręty i ograniczenia prędkości. Jak twierdzą producenci, aktywny tempomat umożliwi komfortową jazdę nie tylko w trasie długodystansowej, jak jazda na autostradzie, ale także podczas codziennych podróży po mieście, w tym w zakorkowanych ulicach. Pamiętać jednak należy, że pomimo inteligentnych systemów, auto nie jest w stanie jechać bez udziału kierowcy [5–7].

Inną wersją lub powiązaniem z aktywnym tempomatem systemem jest możliwość rozpoznawania znaków drogowych. Pojazd wyposażony w taki system informuje kierowcę o tym, kiedy przekracza on dozwoloną prędkość, czy wyprzedza w niedozwolonym miejscu. Na desce rozdzielczej pojawia się wówczas informacja z symbolem znaku, która zmienia się dynamicznie wraz ze znakami na trasie. Dzięki temu kierowca może przypomnieć sobie o danym ograniczeniu, ale także zwrócić uwagę na znak, który mógłby przegapić [6, 8].

3.2. Asystent parkowania

Systemy coraz chętniej wykorzystywane przez kierowców umożliwiają bezpieczniejsze poruszanie się, nie tylko po drogach, ale również po parkingach, począwszy od czujników parkowania, kończąc na zaawansowanych asystentach manewrowania z przyczepą. Obecnie czujniki parkowania posiadają o wiele więcej funkcji i możliwości niż te stosowane jeszcze kilka lat temu. Poza zespołem czujników przeszkód, pojazdy są coraz częściej wyposażone w czujniki szybkiego przyspieszenia, a także w automatyczne hamowanie. Rozwiązanie to zapobiega zderzeniom podczas parkowania, np. w sytuacji zaślubienia kierowcy [7].

Innymi rozwiązaniami, poza czujnikami, są systemy asystentów. Wyróżnić tu można m.in. asystent wyjazdu z miejsca parkingowego, asystent manewrowania z przyczepą oraz system obserwacji otoczenia. Urządzenia te pozwalają zachować większe bezpieczeństwo podczas cofania, jak też zmniejszają stres związany z nim, np. u młodych kierowców. Systemy te, podobnie jak wcześniej wymienione, działają na zasadzie zespołu czujników i kamer, a także są

powiązane z mechanizmami: ostrzegania o przeszkodach, awaryjnego hamowania oraz np. ustawienia kąta kierownicy [5].

3.3. Ochrona w chwili wypadku

W sytuacji, gdy wypadek już się wydarzył, za zwiększenie bezpieczeństwa znacznie odpowiada szereg poduszek powietrznych mogących chronić nie tylko kierowcę i pasażerów czołowo, ale zapobiegać uderzeniom w nich z boku, czy w kolana, zmniejszając obrażenia powstałe na skutek uderzenia. Możliwa jest też ochrona za pomocą kurtyn powietrznych chroniących przed uderzeniami w szyby boczne [6]. Niektórzy producenci udostępniają też funkcję przesunięcia fotela kierowcy i pasażera w sytuacji zagrożenia uderzeniem w bok auta. Samochód może również automatycznie zamykać szyby dachowe oraz boczne zapobiegając tym samym przed niebezpieczeństwem z zewnątrz pojazdu [9].

Możliwe jest również wykorzystanie funkcji przełączenia samochodu na tzw. „autopilota” w wypadku, kiedy kierowca zasłabnie bądź zaśnie. Pojazd początkowo będzie hamował, wydając sygnały ostrzegawcze, a następnie włącza światła awaryjne i zaczyna jechać slalomem po swoim pasie, próbując zwrócić na siebie uwagę otoczenia, aż w końcu zatrzyma się [5].

3.4. Inne systemy

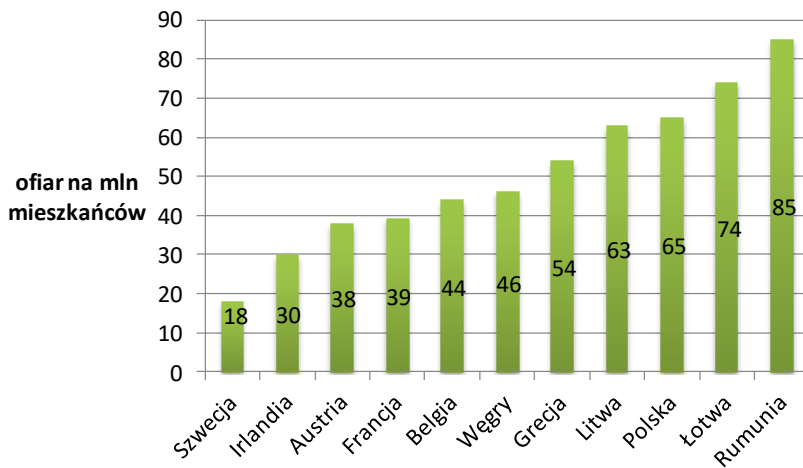
Producenci pojazdów osobowych oferują możliwość wykrywania dużych zwierząt na drodze, co jest funkcją bardzo pożyteczną dla osób mieszkających za miastem, a także poruszających się często w terenie niezabudowanym, gdzie występuje możliwość zderzenia się ze zwierzęciem. Rozwiązanie to działa na zasadzie rozpoznania konturów i sposobu poruszania się zwierząt, takich jak jeleń, koń czy łoś, a następnie ostrzega kierowcę i pomaga mu zahamować [10].

Na uwagę zasługują też systemy automatycznej regulacji świateł, które w zależności od producenta polegają na wykrywaniu świateł innych pojazdów oraz przełączaniu z drogowych na światła mijania i odwrotnie [7]. W innej wersji – na zmienianiu części strumienia światła w zależności od pojazdów i osób znajdujących się na drodze, tym samym pozostawiając oświetloną pozostałą część drogi [5].

Mimo zalet, które niosą za sobą systemy wspomagające, mogą się one również przyczynić do uśpienia czujności kierowcy, a co za tym idzie mogą nie spełniać swojej podstawowej funkcji. Z kolei pojazdy wyposażone w najnowsze technologie są też droższe niż wersje podstawowe. Kolejną wadą są ograniczenia techniczne. Żadna z technologii nie jest niezawodna, co powoduje zagrożenie, które może być wynikiem niewłaściwego działania czy braku reakcji ze strony systemu [1].

4. Analiza liczby wypadków w Polsce

Codziennie można usłyszeć w mediach o wypadkach drogowych. Jak wynika ze statystyk Komisji Europejskiej, Polska jest krajem z bardzo wysoką liczbą ofiar śmiertelnych na milion mieszkańców. Jest to aż 65 zabitych, podczas gdy średnia w Unii Europejskiej to 42 ofiary śmiertelne. Średnią UE wyprzedzają kraje, takie jak: Szwecja, Dania, Holandia i Niemcy. Z kolei krajami, które mają najwięcej ofiar na milion mieszkańców są: Bułgaria, Łotwa i Rumunia. Można zaobserwować to na rysunku 1, który obrazuje liczbę ofiar śmiertelnych w wybranych krajach na milion mieszkańców [11]. Z kolei w skali światowej średnia to aż 180 zabitych. Należy jednak pamiętać, że w 2020 roku w wielu krajach Europy występowały ograniczenia, takie jak lockdown związany z pandemią COVID-19, uniemożliwiający podróżowanie w takiej skali jak w latach poprzednich [11]. Jak warto zauważyć, analizując dane umieszczone na rysunku 1, liczba ofiar śmiertelnych jest mniejsza w krajach Europy Zachodniej, gdzie poziom rozwoju technologicznego jest wyższy niż na wschodzie Europy. Może to świadczyć o tym, że wykorzystanie systemów zwiększających bezpieczeństwo podróżowania samochodami spełnia swoją rolę, powodując zmniejszenie negatywnych skutków wypadków i kolizji.

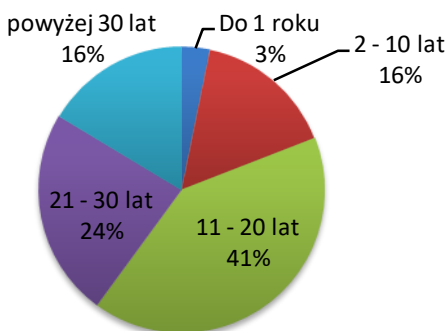


Rys. 1. Zrzut ekranowy z trybu widoku

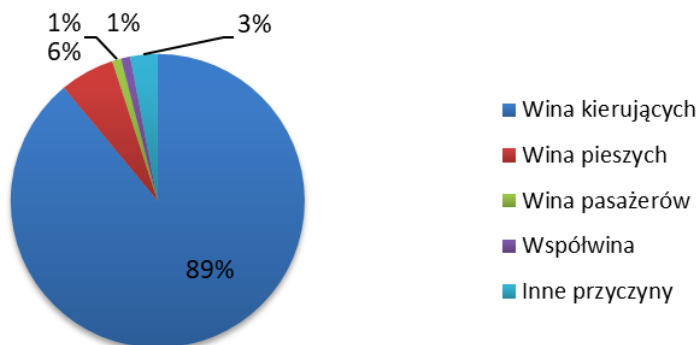
Następny wykres (rys. 2) przedstawia odsetek samochodów osobowych, w określonych przedziałach wiekowych, poruszających się po drogach w Polsce w 2020 roku. Znaczna część samochodów na polskich drogach (ponad 40%) to pojazdy w wieku co najmniej 21 lat i więcej, a kolejne 40% – pojazdy kilkunastoletnie. Jedynie 3% to samochody mające poniżej roku, a 16% to auta

będące w przedziale wiekowym od 2 do 10 lat, co pozwala wnioskować, że pojazdy poruszające się po Polsce są stosunkowo stare, a co za tym idzie, niewyposażone w nowoczesne systemy bezpieczeństwa. Powoduje to w pewnym stopniu wysoką liczbę ofiar omawianą wcześniej [12].

Warto również zwrócić uwagę na przyczyny wypadków, co zostało przedstawione na rysunku 3. Jak wynika z raportu rocznego polskiej policji za rok 2020, główną przyczyną wypadków była wina kierowcy, w aż 89%. Jedynie 6% to wina pieszych, a wina pasażerów, współwina i inne przyczyny osiągnęły łącznie jedynie 5% [13].



Rys. 2. Wiek samochodów w Polsce w 2020 roku (opracowanie własne na podstawie [12])



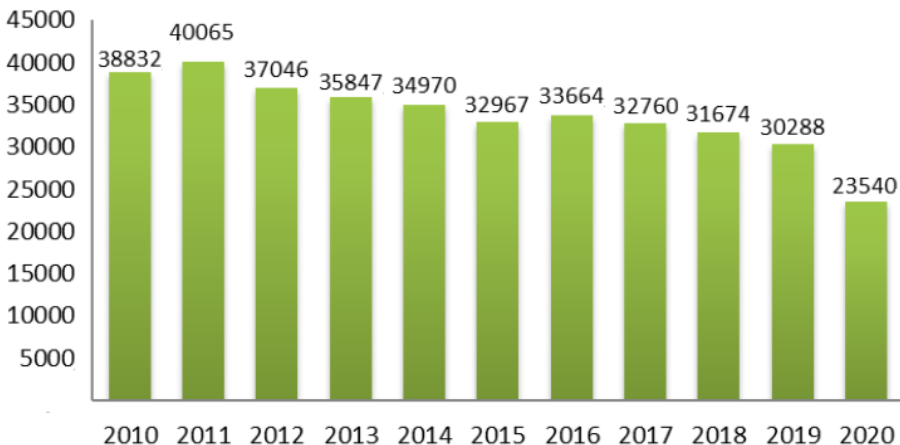
Rys. 3. Przyczyny wypadków w Polsce w 2020 roku (opracowanie własne na podstawie [13])

Porównując przyczyny wypadków spowodowanych przez kierujących (patrz tab. 1, str. 27) można zauważyć, że za największy odsetek liczby wypadków i osób rannych odpowiadają: nieustąpienie pierwszeństwa przejazdu oraz niedostosowanie prędkości do warunków ruchu. Z kolei najwięcej zabitych w wypadku jest wynikiem wyłącznie niedostosowania prędkości do warunków jazdy [13].

Dlatego słusznym wydaje się zastosowanie systemów takich np. jak inteligentny tempomat, który miałby na celu ograniczenie prędkości auta poruszającego się po drodze i systemów rozpoznawania znaków drogowych informujących o limitach prędkości. Ważne jest też wykorzystanie technologii zmniejszających skutki wypadków, takich jak różnego rodzaju poduszki powietrzne. Jednak pomimo dużej liczby wiadomości dotyczących wielu rannych oraz zabitych, pojawia się pozytywna informacja, że z roku na rok liczba wypadków spada. Jest to wiadomość o tyle dobra, że jak wynika ze statystyk GUS w roku 2019 w stosunku do roku poprzedniego ruch drogowy w Polsce ogółem zwiększył się o 4919 mln wozokilometrów [12].

Tabela 1. Odsetek wybranych przyczyn wypadków spowodowanych przez kierujących (opracowanie własne na podstawie [13, 14])

Wina kierowców	Liczba wypadków	Liczba zabitych	Liczba rannych
Nieustąpienie pierwszeństwa przejazdu	27,2%	15,7%	27,6%
Niedostosowanie prędkości do warunków ruchu	26,3%	42,4%	27,5%
Nieustąpienie pierwszeństwa pieszemu na przejściu dla pieszych	11,0%	8,4%	9,4%
Niezachowanie odległości między pojazdami	7,3%	3,0%	7,6%
Nieprawidłowe wyprzedzanie	4,9%	7,4%	5,1%



Rys. 4. Liczba wypadków ogółem w Polsce w latach 2010–2020 (źródło: opracowanie własne na podstawie danych [13, 14])

Z kolei, w tych samych latach liczba wypadków zmniejszyła się o 1386, a na przestrzeni dekady o 15292 wypadki. Stanowi to spadek o ok. 39%. Jednak należy pamiętać, że rok 2020 był wyjątkowy ze względów ograniczeń związanych z pandemią COVID-19, dlatego na rysunku 4 można zaobserwować spadek liczby wypadków o 6748 wypadki w stosunku do roku poprzedniego, a jest to spowodowane zmniejszeniem się liczby podróżujących. Jednak spadek o 8 tysięcy zdarzeń drogowych w latach 2010–2019 świadczy o rozwoju technicznym motoryzacji w naszym kraju [13, 14].

Warto też wspomnieć o porze dnia i roku, w jakich wydarza się najwięcej wypadków drogowych. Najbardziej niebezpiecznymi miesiącami są: lipiec, sierpień i październik. Z kolei najniebezpieczniejszym dniem w tygodniu jest piątek. Jest to związane z dużym ruchem na polskich ulicach. Również ważną kwestią dotyczącą bezpieczeństwa jest otaczająca nas infrastruktura. W Polsce wiele dróg wymaga remontu, ponieważ np. dziury czy koleiny na drodze mogą zakłócać jazdę, a nawet powodować uszkodzenia pojazdów [15].

Na koniec warto dodać, że wbrew powszechnej opinii, mówiącej, iż kobiety są złymi kierowcami, to większość wypadków powodują mężczyźni. Z kolei w kwestii wieku to osoby mające 25–39 lat oraz 18–24 lata. Prowadzi to do wniosku, że osoby te nie posiadają dużego doświadczenia, a brawura i zbyt duża pewność siebie doprowadza do wypadków [16].

5. Podsumowanie

Rozwój technologii pozwala na zwiększenie bezpieczeństwa zarówno czynnego, jak i biernego. Wprowadzenie coraz to nowszych rozwiązań wpływa na większą konkurencyjność firm i napędza ich rozwój. Jednak, wiek ponad 40% samochodów osobowych poruszających się po polskich drogach to co najmniej 21 lat, co powoduje, że najnowsze technologie, dostępne w obecnie sprzedawanych nowych autach, będą przeważać dopiero za ok. 10 lat.

Pomimo zwiększenia się ruchu drogowego w Polsce zauważalny jest spadek liczby wypadków, co świadczy między innymi o słuszności stosowania nowych systemów w pojazdach. Liczba wypadków w Polsce zmniejsza się z roku na rok, jednak nadal pozostaje ona na wysokim poziomie względem innych krajów europejskich, co pozwala wnioskować, że używanie nowych technologii w motoryzacji jest jak najbardziej uzasadnione. Jednak może też prowadzić do zafałszowanego poczucia bezpieczeństwa powodując zagrożenie.

Stosowane w pojazdach systemy pozwalają kierowcom, pasażerom i innym uczestnikom ruchu, poruszać się bezpieczniej i bardziej komfortowo po drogach, jednak trzeba pamiętać, że nie są one w stanie decydować za kierowcę, ani nie umożliwiają podróży bez udziału człowieka. I każdy system może być zawodny.

Literatura

1. Tęczyńska E., Dudek T., *Bezpieczeństwo a wykorzystanie inteligentnych systemów wspomagających kierowcę*, Autobusy Nr 12/2017, s. 455–458.
2. Rogalski W., *Podłączyć drogą stałego rozwoju*. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, wrzesień–październik 2016.
3. Uzdowski M., Kowalik P., *Bezpieczeństwo bierne w pojazdach samochodowych w ocenie użytkowników*, Autobusy Nr 5/2012, s. 457–461.
4. Majcherek A., *Jak to działa: testy zderzeniowe Euro NCAP*, <https://spidersweb.pl/autoblog/euro-ncap-ranking-zasady>, 2018, dostęp 22.04.2022.
5. Volkswagen Group Polska Sp. z o.o., <https://www.volkswagen.pl/pl/swiat-volkswagena/magazine/technologie/praktyczne-systemy.html>, dostęp 22.04.2022.
6. Škoda Auto, <https://www.skoda-auto.pl/swiat-skody/bezpieczenstwo>, dostęp 22.04.2022.
7. Toyota, <https://www.toyota.pl/world-of-toyota/safety/t-mate#html51>, dostęp 22.04.2022.
8. Ford Motor Company, <https://www.ford.pl/oferta/znajdz/technologie/komfort-prowadzenia/system-rozpoznawania-znakow-drogowych>, dostęp 22.04.2022.
9. Mercedes-Benz Warszawa Sp. z o.o., <https://www.warszawa.mercedes-benz.pl/desktop/about-us/blog/ciekawostki/pre-safe.html>, dostęp 22.04.2022.
10. Volvo Car Corporation, <https://www.volvocars.com/pl/support/topics/use-your-car/funkcje-samochodu/large-animal-detection>, dostęp 22.04.2022.
11. Kalisz M., *Polskie drogi wciąż najniebezpieczniejsze na terenie Unii Europejskiej*, <https://jedz-bezpiecznie.pl/wypadki-drogowe-polskie-drogi-wciaz-najniebezpieczniej-sze-na-terenie-ue-20210506>, dostęp 22.04.2022.
12. Główny Urząd Statystyczny, *Transport – wyniki działalności w 2020 roku*, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/transport-i-laczynosc/transport/transport-wyniki-dzialalnosci-w-2020-roku,9,20.html>, dostęp 22.04.2022.
13. Komenda Główna Policji, Biuro Ruchu Drogowego, *Wypadki drogowe w Polsce w 2020 roku*, Warszawa 2021, <https://statystyka.policja.pl/st/ruch-drogowy/76562,wypadki-drogowe-raporty-roczne.html>, dostęp 22.04.2022.
14. Komenda Główna Policji, Biuro Ruchu Drogowego, Zespół Profilaktyki i Analiz, *Wypadki drogowe w Polsce w 2010 roku*, Warszawa 2011.
15. Goniewicz M., Goniewicz K., *Wypadki drogowe w Polsce – czynniki sprawcze i zapobieganie*, *Bezpieczeństwo Pracy: nauka i praktyka* Nr 09/2010, s. 14–17.
16. Goniewicz K., Goniewicz M., Pawłowski W., *Urazowość w wypadkach drogowych w Polsce*, *Transport Miejski i Regionalny* Nr 1/2019, s. 15–18.

Antoni JANKOWSKI

Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Koło Naukowe
Elektroników i Mechatroników SEMICON

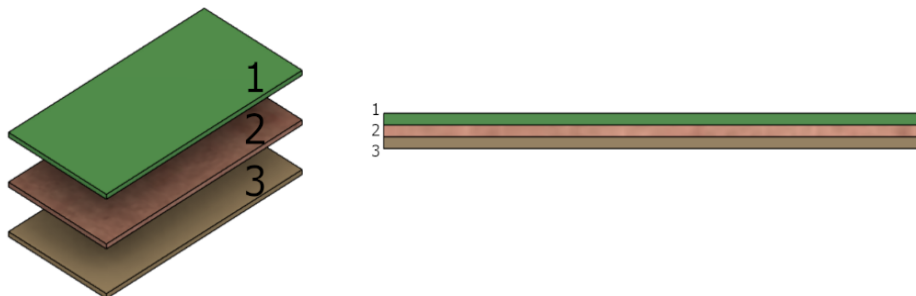
URZĄDZENIE DO KONTROLI PARAMETRÓW TRAWIENIA MIEDZI NA PŁYTKACH DRUKOWANYCH

1. Wprowadzenie

Płytki obwodu drukowanego (płytki drukowane) (ang. *Printed Circuit Boards* – PCB) są jednym z głównych elementów urządzeń elektronicznych. Odgrywają rolę szkieletu każdego współczesnego sprzętu elektronicznego. Stanowią fizyczne połączenie między komponentami elektronicznymi. Można je znaleźć wewnątrz urządzeń codziennego użytku, takich jak telefon, pralka, telewizor, pilot czy też komputer. Produkcję obwodów drukowanych można zlecić zewnętrznym firmom, natomiast prototypy obwodów mogą być wykonywane w stosunkowo szybki sposób samodzielnie przez projektanta. Pozwala to zaoszczędzić czas oraz pieniądze, zwłaszcza, jeżeli potrzeba dokonać modyfikacji układu. Jest wiele metod wytwarzania obwodów drukowanych. Zbędnych warstw miedzi można się pozbyć np. poprzez skrawanie mechaniczne, ablację laserową czy chemiczne trawienie. W niniejszej pracy przedstawiono urządzenie wykorzystujące chemiczne trawienie, które jest jedną z tańszych metod i pozwala uzyskać dobrej jakości płytki.

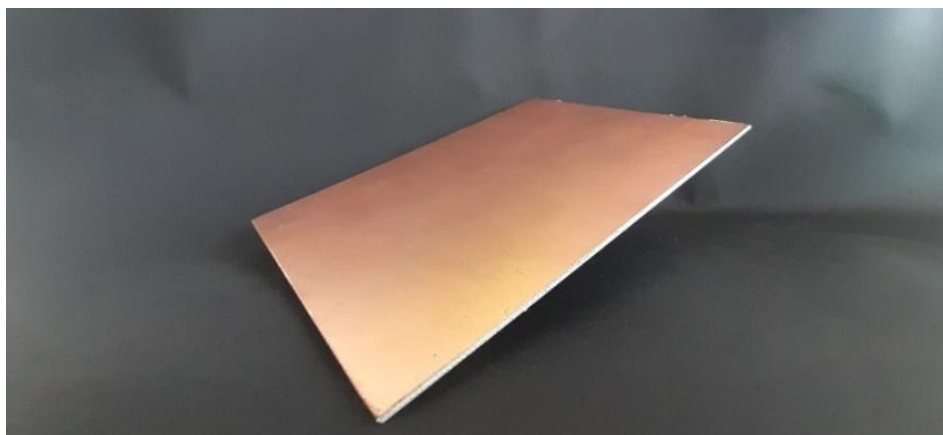
2. Budowa płytek drukowanych

Płytki obwodu drukowanego składa się z arkusza materiału izolacyjnego i warstwy folii miedzianej, która tworzy warstwę przewodzącą [4]. Dodatkowo, po procesie usunięcia zbędnych warstw miedzi nakłada się tzw. *soldermaskę*, która ma zapobiec rozlewaniu się cyny w procesie lutowania, powstawaniu zwarców oraz utleniania miedzi [5]. Pojedyncza płytka może składać się z jednej bądź dwóch warstw przewodzących, następnie można je łączyć ze sobą tworząc płytki wielowarstwowe.



Rys. 1. Budowa płytki drukowanej: 1) soldermaska, 2) warstwa przewodząca, 3) warstwa izolacyjna

Laminaty do wykonywania obwodów drukowanych produkuje się poprzez naniesienie kleju epoksydowego i naprasowanie cienkiej warstwy blachy miedzianej na warstwę izolacyjną [2]. Podłoża różnią się grubością oraz rodzajem warstwy izolacyjnej. Płytki produkowane są o grubościach od 0,4 mm do 2,4 mm [7]. Najczęściej wykorzystywany dielektryk nosi nazwę FR-4, charakteryzuje się podwyższoną wytrzymałością mechaniczną, nadaje się on do bezołowiowego lutowania. Do wytwarzania obwodu drukowanego metodą mechaniczną (frezowanie) doskonale nadają się materiały FR-1/FR-2, CEM-1. Urządzenia, które mają pracować przy bardzo wysokich częstotliwościach, wykonywane są na tworzywach zwanych RO3000/RO4000. Materiały te charakteryzują się niskimi stratami dielektrycznymi przy wysokich częstotliwościach [8].



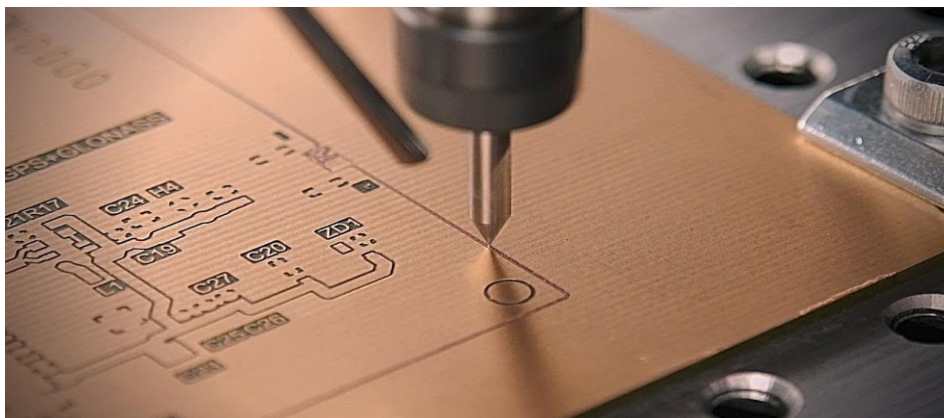
Rys. 2. Laminat pokryty miedzią

3. Metody wytwarzania obwodów drukowanych

Obwody drukowane zmniejszają wielkość urządzeń, sprawiają, że obwód elektroniczny jest czytelniejszy oraz dzięki nim człowiek jest w stanie produkować elektronikę w sposób zautomatyzowany. Jest wiele sposobów wytwarzania, niepożądaną warstwę miedzi można się pozbyć poprzez mechaniczne usunięcie, odparowanie czy też chemiczne trawienie [6].

3.1. Frezowanie

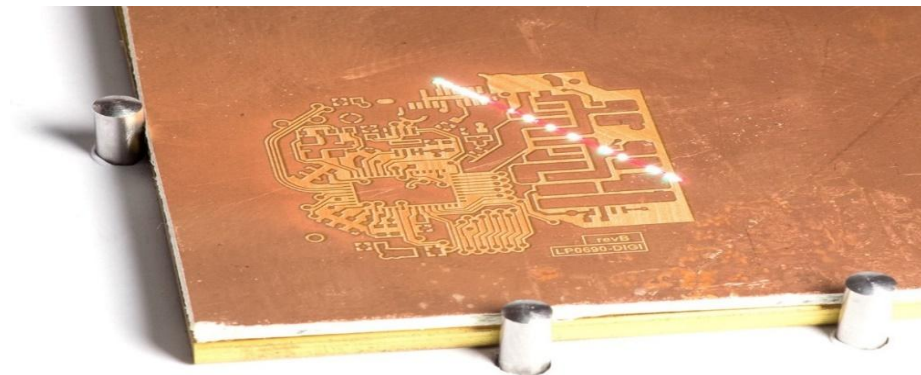
Metodą mechaniczną jest frezowanie. Laminat pokryty miedzią umieszcza się na płaszczyźnie frezarki CNC (ang. *Computerized Numerical Control*), która wykrawa zbędną powierzchnię warstwy przewodzącej. Zaletą metody jest powtarzalność procesu oraz to, że nie trzeba używać żadnych środków chemicznych, które mogą powodować poparzenia chemiczne skóry. Do wad zalicza się stosunkowo długi czas wykonywania płytki, wysoka cena maszyny CNC oraz szybko zużywające się frezy [10].



Rys. 3. Proces frezowania [11]

3.2. Mikroobróbka laserowa

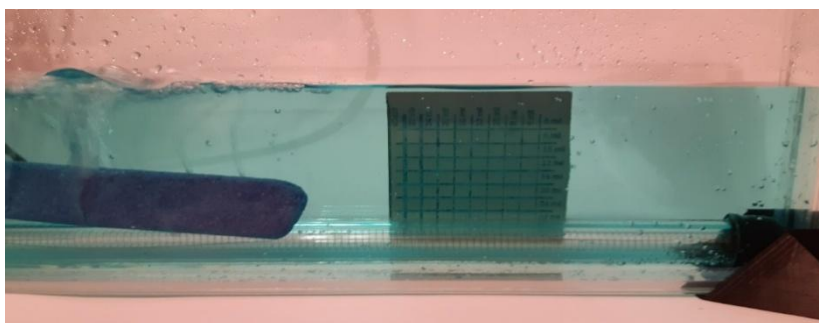
Mikroobróbka laserowa jest metodą odparowywania. Wiązka światła laserowego o długości fali ok. $1,064 \mu\text{m}$, przesuując się przy pomocy plotera, usuwa niepożądane obszary miedzi. Zaletą jest dokładność wykonywanych obwodów, to, że można wykonywać obwody niewielkich rozmiarów oraz to, że proces wytwarzania jest szybki. Wadą jest cena do ablacji laserowej.



Rys. 4. Obwód elektroniczny wykonywany przy pomocy mikroobróbki laserowej [12]

3.3. Chemiczne trawienie

Na laminat pokryty miedzią nanosi się schemat obwodu drukowanego. Można tego dokonać metodą termotransferu, fotolitografii, sitodruku lub poprzez laserowe naświetlanie LDI (ang. *Laser Direct Imaging*). Następnie płytkę umieszcza się w roztworze trawiącym np. nadsiarczanie sodowym lub chlorku żelaza (III), który wytrawia zbędne warstwy miedzi. Aby metoda została wykonana poprawnie proces trawienia musi mieć odpowiednią temperaturę, czas wytrawiania można skrócić utrzymując roztwór w ruchu. Po kilkunastominutowej kąpieli płytki z gotowymi obwodami wyjmuje się i przemywa z resztek wytrawiacza. Zaletą jest niska cena wykonywanych obwodów, proces jest szybki i można uzyskać wiele płytek jednocześnie. Wadą jest fakt, że jakość wykonania w dużej mierze zależy od metody nanoszenia wzoru na laminat, proces musi odbywać się w odpowiedniej temperaturze, a kontakt skóry z wytrawiaczem może powodować poparzenia chemiczne [1].



Rys. 5. Proces trawienia płytki drukowanej

4. Opracowanie urządzenia do trawienia miedzi

Urządzenie ma za zadanie odpowiadać za następujące funkcję:

- pomiar temperatury środka trawiącego,
- odliczanie czasu procesu trawienia,
- sterowanie grzałką podgrzewającą środek trawiący,
- sterowanie napowietrzaczem, wprawiającym roztwór w ruch,
- wyświetlanie parametrów trawienia,
- kontrola parametrów trawienia.

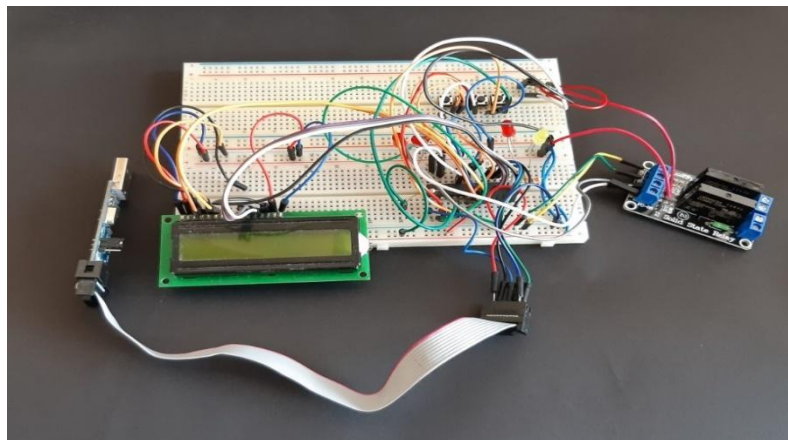
Założenia dotyczące działania urządzenia zrealizowano przy pomocy następujących rozwiązań:

- za sterowanie wszystkimi procesami odpowiada mikroprocesor ATmega328p,
- czas odmierzany jest przy pomocy przerwań od przepelnienia licznika, który znajduje się w mikroprocesorze,
- za odczyt temperatury odpowiada czujnik cyfrowy DS18B20,
- grzałkę oraz napowietrzacz załączają przekaźniki SSR OMRON G3MB-202P,
- parametry wyświetlane są na wyświetlaczu LCD HD44780,
- informacje o stanie pracy grzałki i napowietrzacza wyświetlane są przy pomocy diod LED,
- ustawień parametrów dokonuje się przy pomocy przycisków.

Projektowanie urządzenia podzielono na kilka faz. Wykonano prototyp na płycie stykowej, zaprojektowano schemat i obwód drukowany, napisano program w języku C sterujący całym procesem oraz zaprojektowano obudowę.

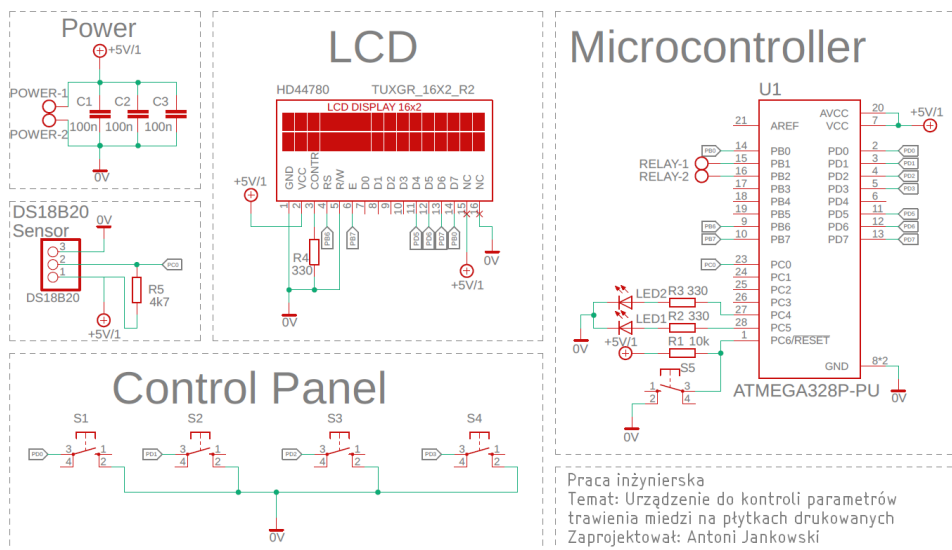
4.1. Budowa części elektronicznej urządzenia

Realizacja prototypu (rys. 6) pomogła w napisaniu wstępnego kodu, przeprowadzeniu początkowych testów działania układu, wykonaniu schematu oraz dobraniu odpowiedniego zasilacza.



Rys. 6. Prototyp urządzenia do kontroli parametrów trawienia miedzi na płytkach drukowanych

Na podstawie działającego prototypu wykonano schemat elektryczny przedstawiający graficzny opis urządzenia. Układ podzielony jest na moduł sterowniczy i zasilający (rys. 7).



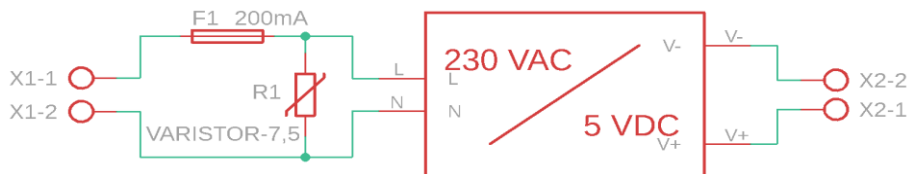
Rys. 7. Schemat sterownika

Układ zasilany jest napięciem +5 V. Głównym elementem układu jest mikroprocesor ATmega328p, Pin RESET, podpięty poprzez szeregowo włączony rezystor 10 kΩ do potencjału +5 V. Dodatkowo, połączony jest też przycisk S5, po którego przyciśnięciu połączymy RESET z potencjałem 0 V, dzięki czemu można zresetować pracę procesora.

Do wyjść PC5 i PC6 przyłączone są anody diod LED1 i LED2, a ich katody połączone są do masy poprzez rezystory R1 i R2 o wartości 330 Ω ograniczające płynący prąd. Diody mają za zadanie sygnalizować stan pracy urządzenia. Wyprowadzenia PB1 i PB2, podłączone są do złącz ARK, które będą łączyły moduł zawierający dwa przekaźniki SSR sterujące pracą grzałki 100 W oraz napowietrzacza. Mikroprocesor steruje pracą wyświetlacza HD44780, poprzez piny PB6, PB7, PD5, PD6, PD7, PB0. Przyciski odpowiadające za ustawianie poszczególnych parametrów podłączone są do wejść PD0, PD1, PD2, PD3.

Czujnik temperatury DS18B20 komunikuje się z chipem poprzez interfejs 1-wire. Sygnał danych połączony jest poprzez rezystor podciągający R5 o wartości 4,7 k Ω do potencjału +5 V oraz do wejścia PC0. Taka konfiguracja ma za zadanie zapewnić poprawny odczyt temperatury.

Kondensatory C1, C2 i C3 pełnią rolę filtru, który ma za zadanie pozbyć się zaburzeń mogących wystąpić na wejściu zasilającym. Połączone są one ze złączem ARK, do których podłączony będzie zasilacz impulsowy 230 VAC/5 VDC, który stanowi osobny moduł.



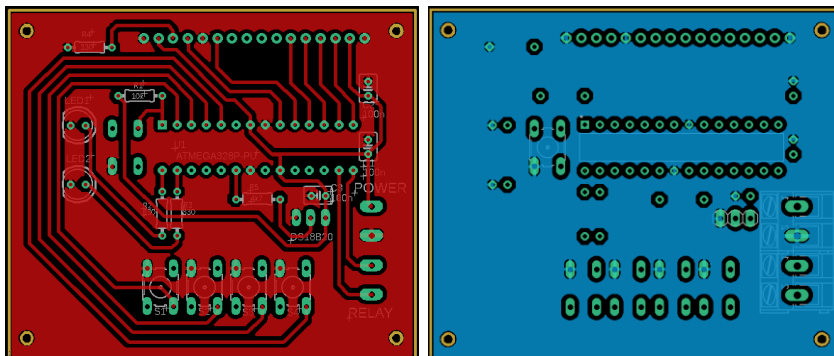
Rys. 8. Schemat modułu zasilacza

W projekcie został użyty zasilacz firmy Hi-Link, model HLK-PM01. Napięcie wyjściowe to 5 V, maksymalny prąd wyjściowy wynosi 600 mA, zaś cały układ pobiera od 30 mA do 45 mA. Na wejściu zasilacza umieszczony jest czwórnik składający się z bezpiecznika topikowego oraz warystora, elementy te mają za zadanie chronić układ przed skutkami zwarcia [3, 9].

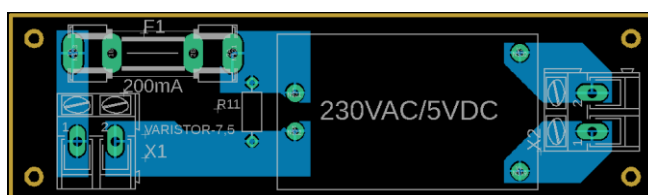
Wykonano projekt modułu sterownika oraz członu zasilającego. Na rysunku 9, po lewej stronie zaprezentowano zaprojektowaną warstwę *Top* płytki drukowanej. Szerokość płytki wynosi 60 mm natomiast długość to 70 mm, szerokość ścieżek równa się 24 mil¹, zaś minimalna odległość między ścieżkami wynosi 30 mil.

Na rysunku 9, po prawej stronie przedstawiono warstwę *Bottom* sterownika. Cała powierzchnia, wyłączając pady lutownicze, pokryta jest miedzią podłączoną do potencjału 0 V. Projekt płytki drukowanej modułu zasilającego przedstawiono na rysunku 10. Po lewej stronie umieszczone jest wejście na napięcie sieciowe 230 VAC, natomiast po prawej stronie jest wyjście, gdzie będzie występować napięcie 5 VDC.

¹ 1 mil = 1/1000 cala = 0,254 mm



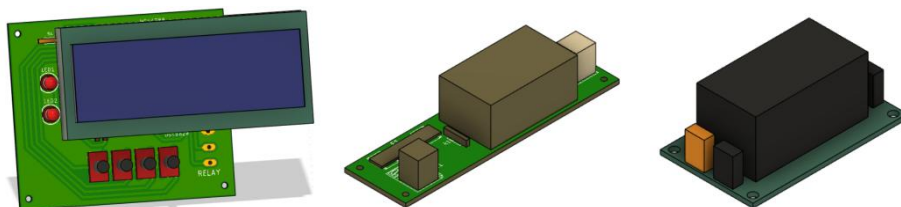
Rys. 9. Schemat modułu zasilacza



Rys. 10. Schemat modułu zasilacza

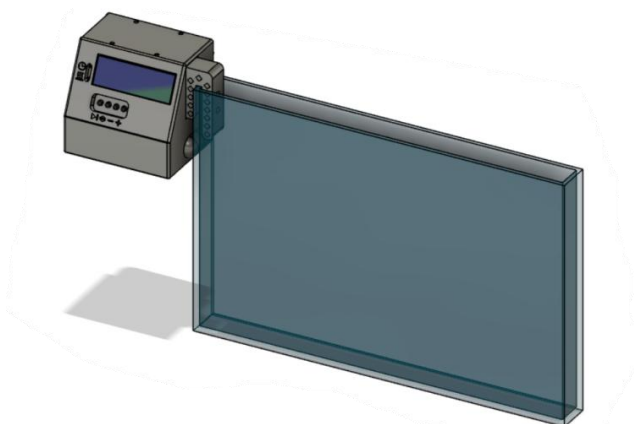
4.2. Opracowanie obudowy

W celu wykonania obudowy, zamodelowano w technologii 3D poszczególne płytki drukowane. Następnie, do odpowiednio umiejscowionych układów zaprojektowano obudowę. Obudowa zapewnia podstawową ochronę przed porażeniem elektrycznym oraz obcymi ciałami stałymi.



Rys. 11. Zamodelowane poszczególne płytki drukowane w technologii 3D (od lewej sterownik, zasilacz, przekaźnik)

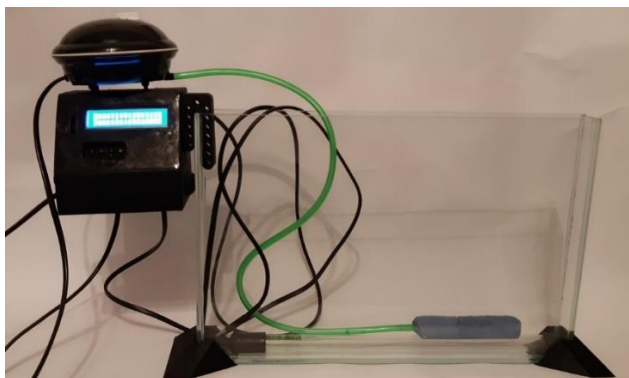
Z prawej strony znajduje się miejsce na uchwyt oraz wypust na czujnik temperatury. W górnej części utworzono mocowanie na napowietrzacz. Uchwyt ma za zadanie łączyć urządzenie z wanienką, aby napowietrzacz znajdował się nad taflą roztworu. Minimalizuje to ryzyko zalania stanowiska pracy. W tylnej części obudowy umieszczono gniazda Europlug, służące do podłączenia grzałki i napowietrzacza.



Rys. 12. Urządzenie do kontroli parametrów trawienia miedzi zamodelowane w technologii 3D

4.3. Testy urządzenia

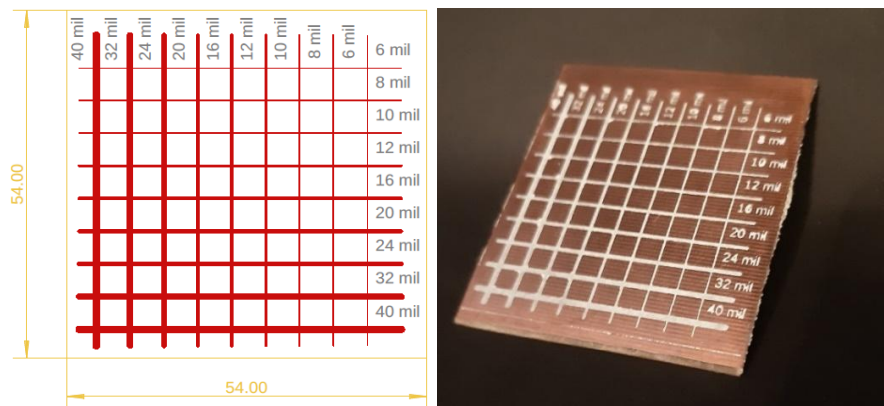
Ostatnim etapem pracy, było złożenie urządzenia oraz wykonanie testów. Sprawdzono poprawność działania oraz jakość trawionych płytek drukowanych. Po podłączeniu urządzenia do sieci i po wciśnięciu przycisku załączającego, poprawnie zadziałały wszystkie funkcjonalności. Można było manipulować czasem, zmieniać ustawienia temperatury. W trybie pracy działały napowietrzacz oraz grzałka. Zauważono pewną bezwładność, górna granica osiąganego temperatury jest o 1,2 °C wyższa niż temperatura zadana, zaś dolna granica osiąganego temperatury jest o 0,4 °C niższa niż temperatura zadana przez użytkownika.



Rys. 13. Prezentacja gotowego urządzenia

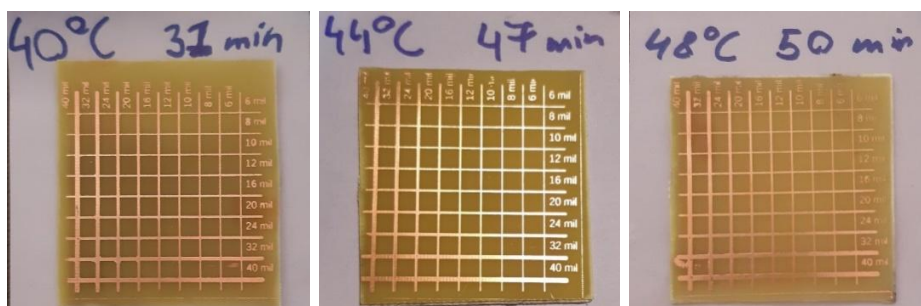
Do testów parametrów trawienia wykonano wzór testowy, który przedstawiono na rysunku 14, po lewej stronie. Zaprojektowano płytkę, o szerokości równej 54 mm i długości równej 54 mm. Narysowano 18 przecinających

się linii o różnych szerokościach. Największa linia ma 40 mil szerokości, zaś najcieńsza ma szerokość 6 mil, odstępy między liniami wynoszą 200 mil. Następnie, metodą termotransferu naniesiono powyższy wzór na trzy płytki testowe (rys. 14, po prawej stronie).



Rys. 14. Wzór testowy i płytka z naniesionym wzorem

Trawienia dokonano nadsiarczaniem sodowym $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$, o oznaczeniu handlowym B327. Rozpuszczono go w 1 litrze wody w temperaturze 50 °C, zgodnie z zaleceniami producenta. W następnej kolejności wiano otrzymany roztwór do wanienki. Testy wykonano dla trzech różnych zadanych temperatur: 40 °C, 44 °C i 48 °C.



Rys. 15. Wytrawione płytki testowe o temperaturze: 40 °C, 44 °C i 48 °C

Po wykonaniu testu dla 40 °C zauważono pewne miejsca, w których naniesiony wzór nie wytrawił się do końca, może to być spowodowane wadą metody nanoszenia odbitki na laminat (resztki papieru zostają na łączeniach ścieżek) lub zbyt niską temperaturą trawienia. Na badanym obwodzie drukowanym dla 44 °C nie zauważono niewytrawionych powierzchni. Natomiast nie pojawiła się nazwa jednostki w kolumnie dla 10 mil, spowodowane to było niedoskonałością metody nanoszenia wzoru. Po wykonaniu badania dla 48 °C,

zauważono pomiędzy ścieżkami o szerokościach ścieżek 32 mil i 40 mil niewytrawiony fragment miedzi. W dodatku pojawiły się podtrawienia, czyli ścieżki zostały wytrawione bardziej niż te, które znajdowały się na wzorze. Widać to szczególnie na ścieżkach o grubościach 32 mil i 40 mil, objawia się to tym, że nie są linią prostą, tylko wyglądają na delikatnie pofalowane.

Najkrótszy czas trawienia uzyskano dla płytki w temperaturze 40 °C, bo tylko 31 minut, najdłuższy zaś dla temperatury 48 °C, ponieważ proces trwał 50 minut. Różnica była znacząca, ponieważ wynosiła aż 19 minut. Badanie to nie wykazuje jednoznacznie, czy czas trawienia zależy od temperatury, ponieważ płytka testowa badana w temperaturze 40 °C, była wytrawiana pierwsza, w konsekwencji stężenie roztworu mogło być nieco mocniejsze. Zaś test płytki drukowanej, która kąpana była w 48 °C, wykonywany był ostatni, wobec tego stężenie mogło być nieco słabsze. Zdecydowano się wykonać dwa dodatkowe testy, w tym samym roztworze. Tym razem płytka trawiona w 48 °C, była poddana testom pierwsza, czas usuwania zbędnych fragmentów miedzi wyniósł 48 minut. Natomiast płytka kąpana w temperaturze 40 °C wytrawiła się w ciągu 43 minut. Po przeprowadzonych testach nasuwa się wniosek, że im mniejsza temperatura, tym krótszy czas trawienia.

Najlepszą jakość osiągnięto dla temperatury 44 °C, gdzie nie są widoczne niewytrawione ani podtrawione ścieżki. Najgorszą jakość uzyskano dla temperatury 48 °C, zauważono niewytrawione fragmenty miedzi oraz podtrawione ścieżki. W tym badaniu można stwierdzić, że temperatura wpływa na jakość trawienia, ponieważ płytka wykonywana w 40 °C, jest nieco gorsza od tej wykonywanej w 44 °C.

5. Podsumowanie

W niniejszej pracy zaprezentowano urządzenie do kontroli parametrów trawienia miedzi na płytkach drukowanych, które pozwala na szybkie tworzenie prototypów obwodów elektronicznych. Przedstawiono projekt układu elektronicznego, obwodu drukowanego, obudowy. Opisano działanie urządzenia, a także informacje na temat przeprowadzanych testów trawienia, w których stwierdzono, że czas trawienia oraz jakość wykonywanych płytek zależy od temperatury roztworu trawiącego.

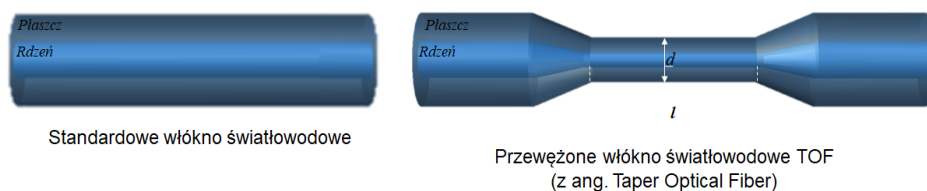
Literatura

1. Coombs Jr C., *Etching Process and Technologies. Printed Circuits Handbook*, The McGraw-Hill Companies, Los Altos 2008.
2. Gajdovcik P., Lehocka D., Dupláková D., Botko F., Sitek L., *Design of Printed Circuit Board Production using Water Jet Technology*, TEM Journal Nr 8(4)/2019, s.1313–1318.
3. Horowitz P., Hill W., *Sztuka Elektroniki. Część I*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2018.
4. Horowitz P., Hill W., *Sztuka Elektroniki. Część II*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2018.
5. Niekurzak M., Kubińska-Jabcoń E., *Wpływ procesu produkcji na jakość płytek drukowanych PCB dla branży motoryzacyjnej*, Autobusy Nr 10–11/2019, s. 89–94.
6. Wallace S., *Płytki drukowane (PCB), Nauka i projekty od podstaw*, Wydawnictwo Helion, Gliwice 2019.
7. *Grubości płytek drukowanych*, <https://www.pcbway.com/>, dostęp 31.03.2022.
8. *Materiały wykorzystywane do produkcji obwodów drukowanych*, <https://www.nano-tech-elektronik.pl/index.php/pl/info/materialy>, dostęp 31.03.2022.
9. *Nota katalogowa zasilacza HiLink*, https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjMjtCPqPrzAhXvkosKH W2aA_wQFnoECAYQAQ&url=https%3A%2F%2Fdatasheet.lcsc.com%2Fszlsc%2F1909111105_HI-LINK-HLK-PM24_C399250.pdf&usg=AOvVaw0592tW2JMi9 Xg36151kIVC, dostęp 31.03.2022.
10. *Wykonywanie obwodów drukowanych na maszynie CNC*, <http://zaprojektujizbuduj.pl/pracownia-elektroniczna/jak-wykonac-obwod-drukowany-na-maszynie-cnc/>, dostęp 31.03.2022.
11. *Zdjęcie frezowanej płytki drukowanej*, <https://i.ytimg.com/vi/dyXyZ8F5vi0/maxresdefault.jpg>, dostęp 31.03.2022.
12. *Zdjęcie obwodu drukowanego wykonywanego metodą mikroobróbki laserowej*, https://www.kurokesu.com/main/wp-content/uploads/2021/01/IMG_2496_r.jpg, dostęp 31.03.2022.

METODOLOGIA WYTWARZANIA ŚWIATŁOWODÓW PRZEWĘŻANYCH

1. Wstęp

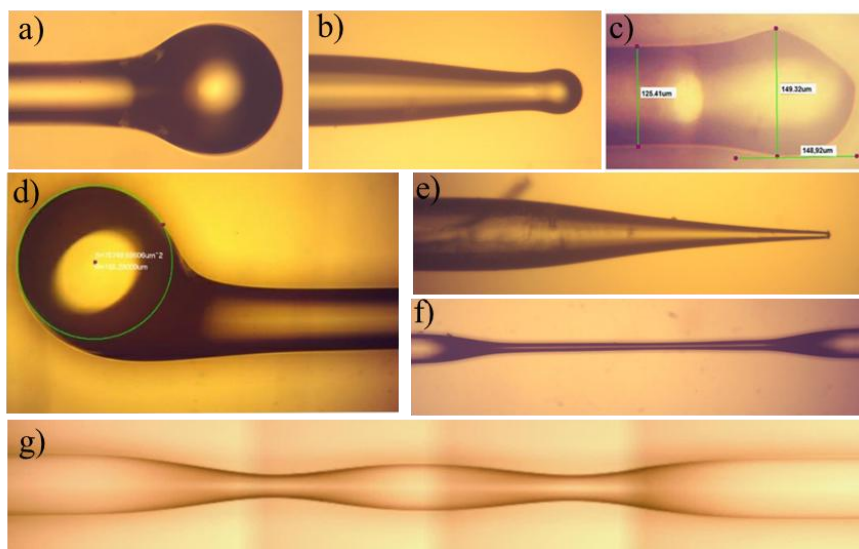
Światłowody już dawno stały się popularnym medium transmisyjnym do przesyłania informacji i zdecydowanie wypierają połączenia bazujące na kablach miedzianych, ze względu na szereg zalet, jakimi się charakteryzują. Zaletami światłowodów są odporność na szумы i zakłócenia elektromagnetyczne, bardzo duża odporność na działanie temperatury, niska tłumienność propagowanego sygnału optycznego oraz niewielkie rozmiary [1–4]. Ich wykorzystanie dotyczy głównie telekomunikacji, choć rozwiązania czujnikowe stanowią równie atrakcyjny obszar zastosowania. Włókna światłowodowe coraz częściej wykorzystywane są m.in. w nowoczesnych czujnikach przeciwpożarowych do wykrywania zawartości CO w powietrzu [5], czy też do monitorowania stanu naprężenia oraz uszkodzeń konstrukcji budowlanych [6]. Współcześnie światłowody są także podstawą sieci szkieletowych działających w ramach bezprzewodowych sieci 5G [7].



Rys. 1. Światłowód standardowy oraz przewężany

Światłowody przewężane TOF (ang. *Tapered Optical Fiber*) są jednym z wielu nietypowych rodzajów struktur światłowodowych, wykorzystywanych w aplikacjach sensorycznych. Idea pojedynczo przewężonego światłowodu widoczna jest na rysunku 1. Średnica przewężenia została oznaczona na jako d , natomiast długość obszaru przewężenia literą l . Modyfikacje standardowych włókien są niezwykle interesujące ze względu na specyficzne właściwości, które wykorzystuje się przy produkcji wysokiej jakości czujników. Widoczne na rysunkach 2a i 2b zakończenia sferyczne umożliwiają skupianie wychodzącej

wiązki światła. Wprowadzenie modyfikacji w postaci ścięcia soczewki powoduje dodatkowo zmianę kąta, pod jakim promienie opuszczają światłowód (rys. 2c). Taka własność jest możliwa również do uzyskania dzięki zakrzywionym zakończeniom soczewkowym widocznym na rysunku 2d. Zwężenie średnicy zewnętrznej włókna na zakończeniu (rys. 2e) powoduje jednocześnie redukcję średnicy rdzenia światłowodu, co rozwiązuje problemy sprzęgania ze światłowodami planarnymi. Z kolei obecność takich przewężeń zarówno pojedynczych jak i wielokrotnych, które przedstawione są na rysunkach 2f i 2g, doprowadza do lokalnego zakłócenia zjawiska całkowitego wewnętrznego odbicia i do wzbudzenia zjawiska interferencji transmitowanych długości fal. Dzięki temu możliwy jest pomiar wielu wielkości fizycznych oddziałujących na tę strukturę. Czułość tak utworzonego sensora zależy w dużej mierze od geometrii przewężenia, która osiągana jest na kilka możliwych sposobów produkcji.



Rys. 2. Modyfikacje włókien światłowodowych: a–d) soczewki sferyczne, e) zwężenia zakończeń, f) przewężenia pojedyncze g) okresowe [2–3]

W procesie produkcji światłowodów przewężanych wyróżnia się 4 główne metody, różniące się między sobą m.in. kosztami produkcji lub długością procesu. Niezależnie od metody, sposób wytworzenia polega na rozgrzaniu krótkiego odcinka gołego włókna światłowodowego poprzez dostarczenie mu energii. Następnie, oddziałując na niego siłą, rozciąga się światłowód, doprowadzając do jego przewężenia. Pierwszą metodą jest wytwarzanie światłowodu przewężanego nad palnikiem gazowym, charakteryzującą się niskimi kosztami produkcji oraz krótkim czasem produkcji. Niestety, mała powtarzalność oraz

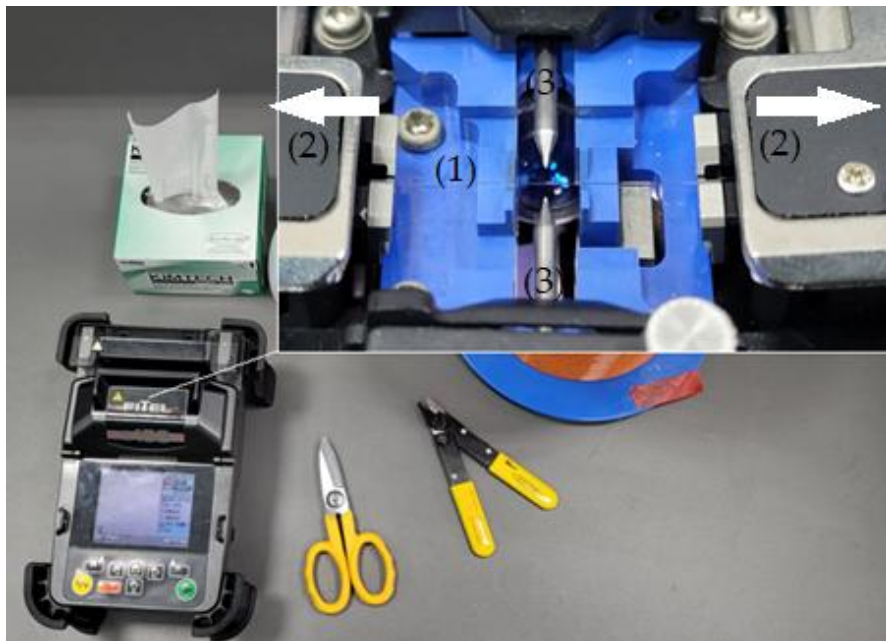
duże fluktuacje wymiarów m.in. średnicy przewężenia przemawiają na niekorzyść tej metody. Wykorzystywanie naświetlania włókna laserem dużej mocy wiąże się z dużą stabilnością źródła oraz wysoką kontrolą produkcji. Największą wadą wykorzystywania laserów w procesie przewężania światłowodów jest wysoki koszt produkcji. Bardziej czasochłonna, lecz przynosząca równie satysfakcjonujące rezultaty, jest metoda wytrawiania chemicznego. Jest procesem kontrolowanym, w którym dochodzi do całkowitego wytrawiania płaszcz światłowodu, czego nie można doświadczyć we wcześniejszych metodach. Jednak, podejście to jest czasochłonne oraz jest stosowane raczej do zakończeń lub przewężeń, dla których chcemy uzyskać skokową zmianę szerokości przewężenia [8–11].

Światłowody znajdują zastosowanie głównie przy produkcji bardzo czułej aparatury oraz czujników wysokiej jakości. Czujniki światłowodowe pracujące przy materiałach potencjalnie niebezpiecznych czy łatwopalnych są znacznie mniej podatne na uszkodzenia niż standardowe czujniki. Są również wykorzystywane przy pomiarach, w których zależy na bardzo wysokiej dokładności. Jednym z przykładów zastosowania światłowodów jest interferometr Macha-Zehndera [12–14], który wykorzystuje podwójnie asymetryczny światłowod przewężany i charakteryzuje się bardzo dużym zakresem dynamicznym, wysoką czułością oraz dokładnością [15]. Wykorzystuje się je między innymi w aplikacjach sensorycznych do pomiaru położenia kąowego, kiedy wymagana jest wysoka dokładność np. w kinematyce ram robotów lub nachylenia skrzydeł samolotów [16]. Światłowody podwójnie przewężane są znacznie prostsze do wytworzenia niż światłowodowe siatki długookresowe, przez co są znacznie korzystniejsze przy produkcji wszelkiej aparatury do pomiaru m.in. temperatury, naprężenia, stanu gazu lub współczynnika załamania światła [17]. Przykładem takiej aparatury jest wykorzystanie światłowodów podwójnie przewężanych do pomiaru naprężenia. Dzięki instalacji bazującej na światłowodach przewężanych, udało się otrzymać rozdzielczość wynoszącą 10 pm, a maksymalne obserwowane napięcie wynosiło zaledwie 5 $\mu\epsilon$ w porównaniu do 10 $\mu\epsilon$ otrzymanych z wykorzystaniem światłowodowej siatki długookresowej [18].

2. Metoda wytwarzania

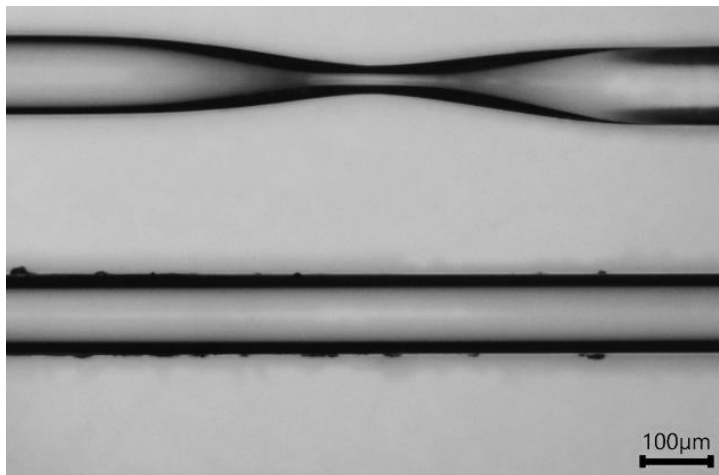
W badaniach nad metodologią wytwarzania światłowodów przewężanych zdecydowano się na wykorzystanie standardowej spawarki światłowodowej. Typowo jest ona używana do łączenia gołych włókien światłowodowych. W tym celu wywoływany jest łuk elektryczny, za sprawą którego dochodzi do nadtopienia i połączenia obu zakończeń światłowodowych. Zmodyfikowane

podejście do tego procesu umożliwia między innymi wykonywanie przewężeń światłowodowych. Stanowisko badawcze przedstawione jest na rysunku 3 i składa się ze spawarki światłowodowej FITEŁ S153, narzędzia służącego do zdejmowania pokryć zewnętrznych z włókna światłowodowego oraz nożyczek.



Rys. 3. Stanowisko do wytwarzania światłowodów przewężanych

Wytwarzanie przewężenia zaczyna się od przygotowania samego włókna. W pierwszej kolejności należy zdjąć pokrycie akrylowe z kilku centymetrowego odcinka światłowodu (1) oraz wyczyścić go za pomocą chusteczek bezpyłowych nasączonych alkoholem izopropylowym. Następnie, cały odcinek włókna umieszczany jest w wózkach spawarki (2) pomiędzy dwiema elektrodami (3). Jednocześnie, w trakcie trwania tego procesu wózki rozsuwają się w przeciwnych kierunkach, tym samym rozciągając światłowód. Uplastycznione w wyniku nadtopienia łukiem elektrycznym włókno światłowodowe zostaje przewężone. Ostatecznie, rezultaty można obserwować na wyświetlaczu spawarki lub w przypadku długich przewężeń pod mikroskopem optycznym.



Rys. 4. Porównanie światłowodu przewężonego (u góry) oraz standardowego (na dole)

Na rysunku 4 przedstawiono zdjęcie wykonane przy użyciu mikroskopu optycznego, na którym widoczne są dwa włókna światłowodowe. Standardowe włókno światłowodowe posiada średnicę zewnętrzną wynoszącą $125\ \mu\text{m}$. Z kolei w przypadku światłowodu przewężanego TOF średnica ta może zostać zredukowana nawet do kilku mikrometrów. Parametrami opisującymi TOF są średnica oraz długość obszaru przewężenia, a także kąt nachylenia obszaru zwężanego. Ich wielkość, w przypadku metody z użyciem spawarki światłowodowej, uzależniona jest od mocy i czasu trwania łuku elektrycznego. Dodatkowo, geometria może być regulowana przez ilość powtórzeń pojedynczego łuku.

3. Wyniki

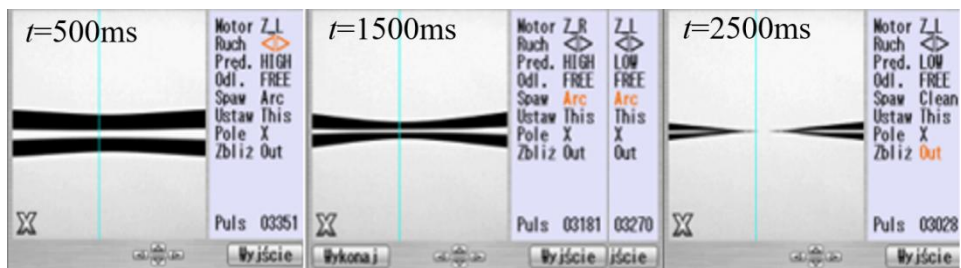
W ramach prac eksperymentalnych nad wytwarzaniem światłowodów przewężanych określono wpływ parametrów łuku elektrycznego na wielkość osiągniętych przewężeń. Poprzez interfejs spawarki lub za pomocą programu komputerowego można było ustawić czas trwania spawu wyrażany w ms, moc spawu określaną w mW oraz kierunek poruszania się wózków z uchwytami włókna światłowodowego. Czas regulowany był w zakresie od 0 do 2 s, zaś moc łuku od 20 mW do 200 mW. Wykonanych zostało 96 próbek, przy różnych parametrach łuku, ale przy zachowaniu takich samych nastaw pracy wózków. W trakcie badań najważniejsza była ocena średnicy oraz nachylenie zbocza przewężenia. Średnica przewężenia próbek oraz nachylenie badane były przy pomocy mikroskopu względem początkowej średnicy włókna (rys. 5).

Otrzymane próbki różniły się przede wszystkim średnicą przewężenia oraz nachyleniem i długością zbrocza przewężenia.



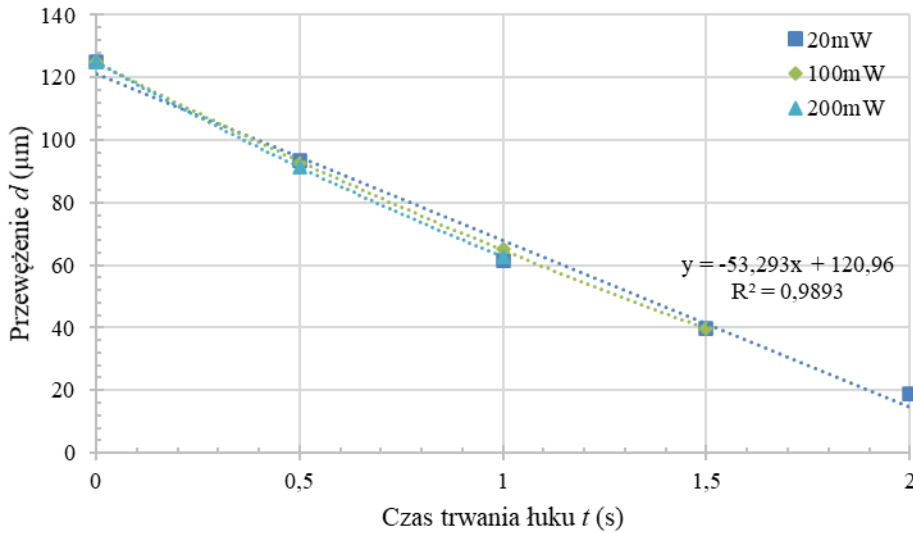
Rys. 5. Stanowisko z mikroskopem optycznym do obserwacji przewężen

Na rysunku 6 widoczne są trzy przewężenia światłowodowe utworzone przy zastosowaniu co raz to większego czasu trwania łuku elektrycznego. Czas trwania łuku związany jest bezpośrednio z czasem, w jakim poruszają się wózki spawarki rozciągające światłowód. W skrajnym przypadku dochodziło do rozerwania światłowodu.



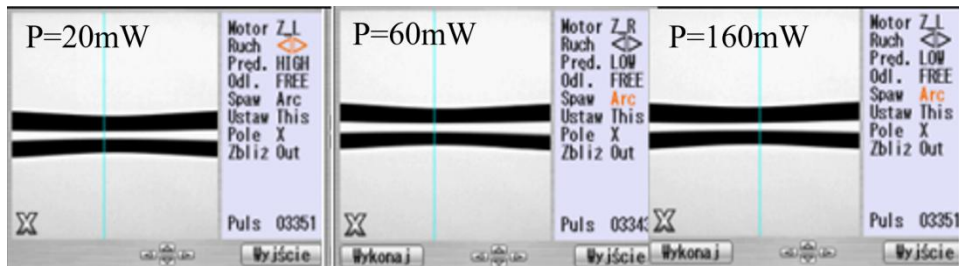
Rys. 6. Wpływ czasu trwania łuku elektrycznego na wielkość przewężenia światłowodu

Na rysunku 7 zobrazowano wpływ czasu trwania łuku elektrycznego na wielkość przewężenia d dla kilku przypadków mocy P . Łatwo można zaobserwować, że wykres ma charakter liniowy, a największe przewężenie uzyskuje się dla największego czasu t oraz mocy P wynoszącej 20 mW. Z jednej strony, ustawiona wartość mocy nie odgrywa tu dużego znaczenia. Z drugiej zaś, zbyt duża moc powoduje przedwczesne rozerwanie światłowodu.



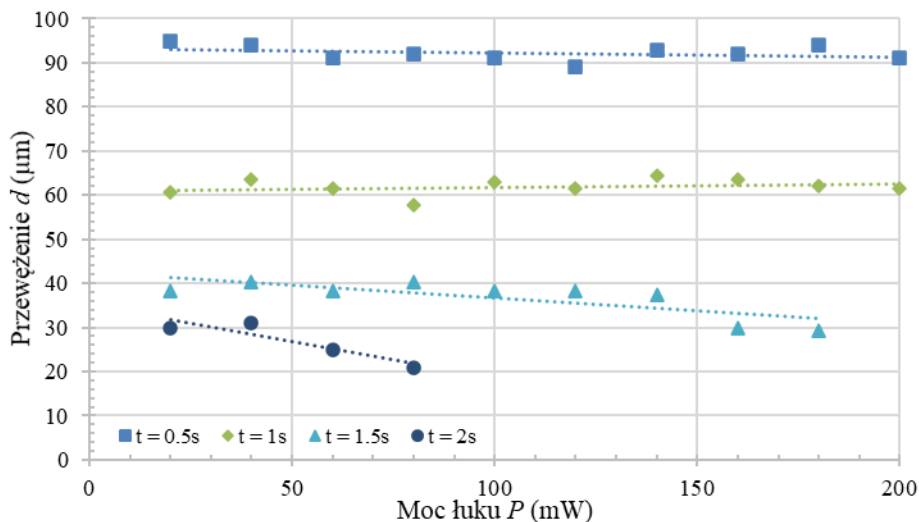
Rys. 7. Wpływ czasu trwania łuku elektrycznego przy zastosowaniu różnej wartości jego mocy na wielkość przewężenia

Na rysunku 8 przedstawiono zdjęcia światłowodów wytworzonych przy zastosowaniu różnej mocy łuku elektrycznego. Przewężenie uzyskiwane przy stałym czasie t i zmiennej mocy jest ledwo widoczne.



Rys. 8. Wpływ mocy łuku elektrycznego na wielkość przewężenia światłowodu

Z wykresu przedstawionego na rysunku 9 widać, że dla czasu t równego 0,5 s przewężenie niemalże nie zmieniało się wraz ze wzrostem mocy łuku P . Warto zauważyć, że dla czasu t wynoszącego 2 s włókno światłowodowe przerwało się już przy 100 mW. Niezależnie od zastosowanej mocy łuku, dla czasu większego niż 2 s światłowód ulegał przerwaniu.

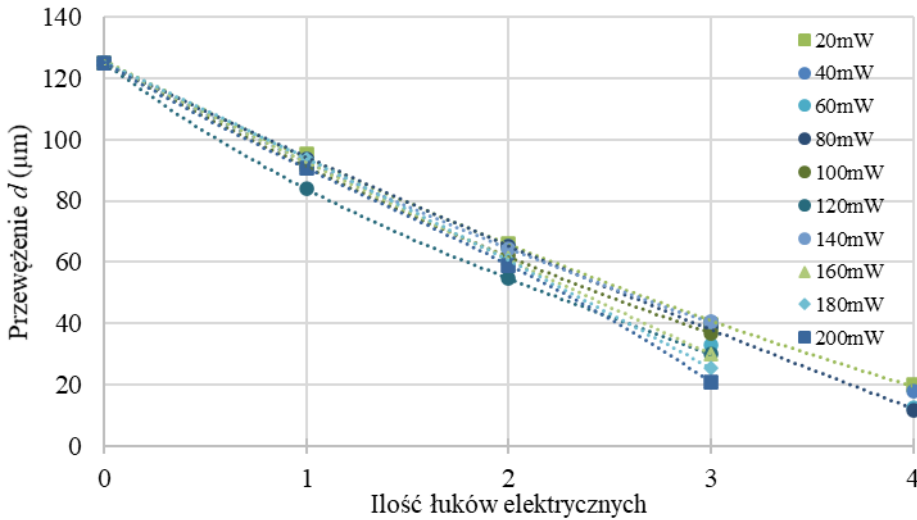


Rys. 9. Wpływ mocy łuku elektrycznego dla różnych wartości jego czasu trwania na wielkość przewężenia

Na rysunku 10 przedstawione są zdjęcia wykonane po trzech kolejnych łukach elektrycznych. Tym razem badany był wpływ liczby powtórzeń przy stałym czasie trwania łuku t oraz stałej mocy łuku P . Wykres przedstawiony na rysunku 11 dotyczy zależności liczby wykonanych łuków elektrycznych na przewężenie dla różnej mocy łuku i jego stałego czasu trwania równego 0,5 s. Na wykresie widać liniowy charakter zmian i łatwo za jego pomocą dokonać wyboru parametrów do osiągnięcia konkretnych wartości przewężeń d . Przy zastosowaniu czterech powtórzeń łuków możliwe jest wykonanie przewężenia o średnicy zaledwie 12 μm .



Rys. 10. Wpływ ilości powtórzeń łuku elektrycznego na wielkość przewężenia światłowodu



Rys. 11. Wpływ ilości powtórzeń łuku elektrycznego na wielkość przewężenia światłowodu

4. Podsumowanie

W ramach prac nad metodologią wykonywania przewężeń światłowodowych skupiono się na analizie metody wykorzystującej nadtapianie łukiem elektrycznym. Wykonano i zmierzono średnicę przewężeń 96 próbek włókien światłowodowych. W efekcie prac eksperymentalnych ustalony został wpływ mocy oraz czasu trwania łuku elektrycznego, a także ilości jego powtórzeń na wielkość otrzymanego przewężenia światłowodowego. Największa szybkość zmniejszania się średnicy zewnętrznej włókna wynosząca ok. $53 \mu\text{m/s}$, zaobserwowana została dla zmieniającego się czasu łuku elektrycznego. Powtórne wykonywanie łuku było możliwe jedynie dzięki zachowaniu stosunkowo krótkiego czasu trwania procesu nadtapiania. W tym przypadku redukcja średnicy światłowodu wyniosła $28 \mu\text{m}$ na każde powtórzenie łuku. Najmniejszy efekt odnotowany został dla zmiany mocy łuku elektrycznego. Do osiągnięcia przewężenia światłowodu wymagany był jednocześnie długi czas nadtapiania włókna.

Udoskonalona metoda wytwarzania światłowodów przewężanych łukiem elektrycznym pozwala na osiągnięcie obszaru przewężonego o średnicy nawet do $12 \mu\text{m}$. W przyszłości planowane są badania nad zastosowaniem wytworzonych przewężeń do aplikacji sensorycznych, takich jak pomiar temperatury lub odkształceń.

Literatura

1. Ziętek B., *Optoelektronika*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń 2011.
2. Łakomski M., Guzowski B., Woźniak A., *Fabrication of ultra-long tapered optical fibers*, *Microelectronic Engineering* Nr 221/2020, s. 111193.
3. Guzowski B., Lisik Z., Tosik G., *Realization of optical fibers terminated with ball lenses*, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences* Nr 64(2)/2016, s. 279–282.
4. Guzowski B., Łakomski M., *Realization of fiber optic displacement sensors*, *Optical Fiber Technology* Nr 41/2018, s. 34–39.
5. Turkiewicz R., *Innowacyjne technologie mające zastosowanie w obszarze wykrywania zagrożenia pożarowego*, Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej, Prace Instytutu Lotnictwa Nr 201/2009, s. 283–298.
6. Kowalczyk P., Nowosielska K., *Analiza możliwości wykrywania uszkodzeń konstrukcji za pomocą technik światłowodowych*, Prace Instytutu Lotnictwa Nr 201/2009, s. 86–96.
7. Miller L., *5G RF for dummies*, John Wiley & Sons, Hoboken 2017.
8. Leung A., Rijal K., Shankar M., Mutharasan R., *Effects of geometry on transmission and sensing potential of tapered fiber sensors*, *Biosensors and Bioelectronics* Nr 21(12)/2006, s. 2202–2209.
9. James S. W., Tatam R. P., *Optical fibre long-period gratings sensors: characteristics and application*, *Measurement Science and Technology* Nr 14(5)/2003, s. 49–61.
10. Yang Y., Lee J., Reichard K., Ruffin P., Liang F., Ditto D., Yin S., *Fabrication and implementation of a multi-to-single mode converter based on a tapered multimode fiber*, *Optics Communications* Nr 249(1–3)/2005, s. 129–137.
11. Villatoro J., Monzón-Hernández D., Mejía E., *Fabrication and modelling of uniform-waist single-mode tapered optical fiber sensors*, *Applied Optics* Nr 42(13)/2003, s. 2278–2283.
12. Frazão O., Falate R., Fabris J. L., Santos J. L., Ferreira L. A., Araújo F. M., *Optical incli-nometer based on a single long-period fiber grating combined with a fused taper*, *Optics Letters* 31(20)/2006, 2960–2962.
13. Liu S., Liu N., Hou M., Guo J., Li Z., Lu P., *Direction-independent fiber inclinometer based on simplified hollow core photonic crystal fiber*, *Optics Letters* Nr 38(4)/2013, 449–451.
14. Amaral L. M. N., Frazão O., Santos J. L., Ribeiro A. B. L., *Fiber-optic inclinometer based on taper Michelson interferometer*, *IEEE Sensors Journal* Nr 11(9)/2011, s. 1811–1814.
15. Lee Ch-L, Wen-Cheng Shih, Jui-Ming Hsu, Jing-Shyang Horng, *Asymmetrical dual tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for fiber-optic directional tilt sensor*, *Optics Express* Nr 22(20)/2014, s. 24646–24654.

16. Chun-Liu Zhao, Rui Wang, Yumeng Zhou, Luo Niu, Huaping Gong, *Angle sensor based on two cascading abrupt-tapers modal interferometer in single mode fiber*, Optik – International Journal for Light and Electron Optics Nr 132(2017), s. 236–242.
17. Tian Z., Yam S. S.-H., Barnes J., Bock W., Greig P., Fraser J. M., Looock H.-P., Oleschuk R. D., *Refractive Index Sensing With Mach–Zehnder Interferometer Based on Concatenating Two Single-Mode Fiber Tapers*, IEEE Photonics Technology Letters Nr 20(8)/2008, s. 626–628.
18. Tian Z., Yam S. S.-H., *In-Line Abrupt Taper Optical Fiber Mach–Zehnder Interferometric Strain Sensor*, IEEE Photonics Technology Letters Nr 21(3)/2009 s. 161–163.

SYSTEM STEROWANIA UKŁADEM NAPĘDOWYM WYSOKOSPRAWNEGO POJAZDU PROTOTYPOWEGO

1. Wstęp

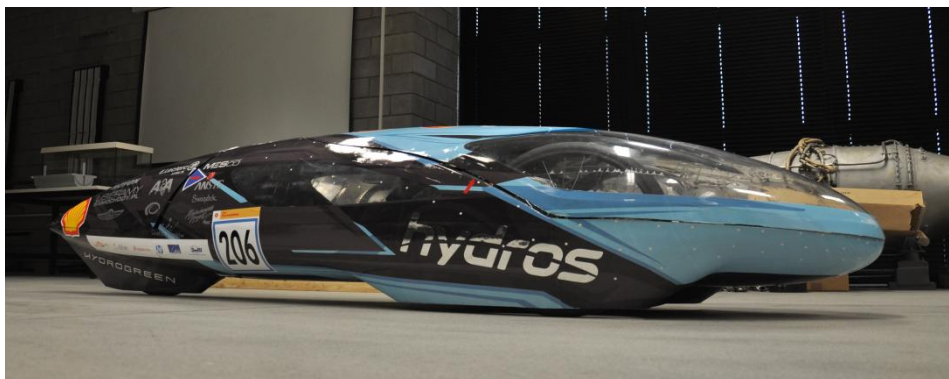
Nieustannie narastające zainteresowanie zamiennikami paliw kopalnych powoduje szukanie coraz to nowych rozwiązań w tej dziedzinie. Na rynku międzynarodowym zauważalny jest wzrost popytu na alternatywne źródła napędów pojazdów, wliczając w to napędy elektryczne oraz hybrydowe [1]. Duży nacisk jest położony szczególnie na paliwa odnawialne, z uwagi na ich stosunkowo szybką możliwość odtworzenia swoich zasobów. Wodór jest jednym z takich paliw, cechuje się praktycznie zerową emisją zanieczyszczeń, gdyż efektem ubocznym spalania tego gazu jest woda. Obecnie ma zastosowanie w zasilaniu pojazdów elektrycznych bazujących na ogniwach paliwowych. Jego wykorzystanie na większą skalę wydaje się obiecujące, gdyż może radykalnie zmniejszyć emisję szkodliwych gazów do atmosfery ziemskiej [2].

Rozwojem technologii w kontekście zasilania pojazdów paliwami alternatywnymi interesuje się przedsiębiorstwo Royal Dutch Shell, które organizuje zawody zrzeszające studentów z całego świata – Shell Eco-marathon. Ideą tego wydarzenia jest opracowanie pojazdu najbardziej efektywnego pod kątem zużycia energii, będącego w stanie przejechać jak największy dystans na ekwiwalencie jednego litra paliwa. Studenckie Koło Naukowe „Napędy Lotnicze”, działające na Politechnice Lubelskiej, stara się sprostać wyzwaniom stawianym przez organizatorów i poprzez zespół Hydrogreen Team wraz z projektem Hydrosa przystępuje do zawodów.

Temat niniejszego artykułu dotyczy wykonania sterownika układu napędowego prototypowego pojazdu wodorowego Hydros budowanego na zawody Shell Eco-marathon. W związku z tym, projekt musiał spełniać wymagania bezpieczeństwa narzucone przez organizatorów [3]. Opracowano i wykonano model obwodu drukowanego, oprogramowanie mikrokontrolera, a także przeprowadzono testy sprawdzające prawidłowe działanie funkcjonalności projektu.

2. Charakterystyka pojazdu wodorowego – Hydros

Projekt przedstawiony w artykule będzie służył jako element składowy pojazdu napędzanego wodorem – Hydros (rys. 1). Projektowany jest z myślą o minimalizacji zużycia paliwa oraz strat energetycznych, czyli założeń przyjętych przez organizatorów Shell Eco-marathon. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe parametry opisujące pojazd.



Rys. 1. Wygląd zewnętrzny prototypowego pojazdu Hydros

Tabela 1. Zestawienie głównych cech i wymiarów pojazdu (źródło: opracowanie własne)

Cecha pojazdu	Wartość
Długość	2920 mm
Wysokość	625 mm
Szerokość	680 mm
Rozstaw osi	1600 mm
Rozstaw kół przednich	620 mm
Masa własna	25 kg
Współczynnik oporu Cx	0,1
Prędkość maksymalna	30 km/h

Hydros jest pojazdem prototypowym napędzanym wodorem, a jego głównym źródłem zasilania jest ogniwo wodorowe Horizon H300 typu PEM o mocy znamionowej 300 W [4]. Podstawowe elementy tego typu ogniwa to: anoda, katoda i elektrolit stanowiący membranę. Do anody dostarczany jest wodór z butli. Na układ wodorowy, oprócz samego ogniwa i butli z wodorem, składa się również zawór elektromagnetyczny pełniący funkcję bezpieczeństwa, przepływomierz rejestrujący zużycie gazu oraz regulator odpowiadający za zredukowanie ciśnienia. Wymienione elementy tego układu przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Układ wodorowy połączony na zewnątrz pojazdu

Z uwagi na wady, jakie posiada ogniwa paliwowe (ang. *fuel cell*, FC), nieekonomiczne jest stosowanie go jako jedyne źródła zasilania. Zatem, żeby wspomóc działanie takiego pojazdu zastosowano dołączenie dodatkowego źródła energii w postaci akumulatorów oraz superkondensatorów [5]. Bateria akcesoryjna (BAT) dostarcza energię do określonych elementów układu odciążającym tym samym ogniwo. Natomiast, superkondensatory (SC) działają na zasadzie magazynowania energii, w przypadku nagłego zapotrzebowania na moc oddają energię zgromadzoną w czasie hamowania bądź płynnej pracy.

Układ ten jest przystosowany do nagłych zmian zapotrzebowania energetycznego, w krótkich chwilach czasowych podczas np. wznoszenia czy przyspieszania. Takie zmiany wymagają dużej energii oraz wysokiej gęstości mocy. Bateria charakteryzuje się wysoką gęstością energii oraz niską gęstością mocy, natomiast superkondensatory posiadają niską gęstość energii i wysoką moc, co sprawia, że taki układ się dopełnia. Przetwornice umieszczone w układzie odpowiadają za dostosowanie napięcia wyjściowego do potrzeb silnika elektrycznego. Wynikiem tego jest nieustanna praca z największą możliwą do uzyskania sprawnością. Wadą tego typu układu jest wprowadzenie dodatkowych elementów zwiększających straty energetyczne oraz koszty systemu, a także jego masy [6].

3. Zadania głównego sterownika

Działanie prototypowego pojazdu opiera się na współpracy trzech sterowników: kierownicy, głównego oraz przepływu energii. Projektem

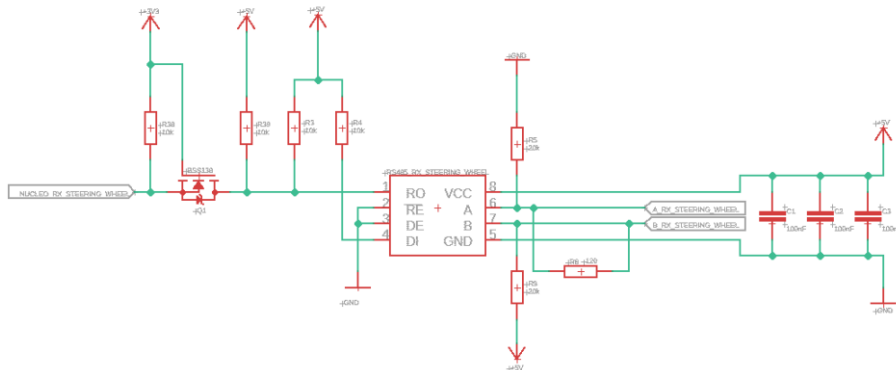
przedstawionym w artykule jest właśnie sterownik główny Hydrosa. Ma on przede wszystkim odpowiadać za sterowanie pracą silnika, komunikację pomiędzy pozostałymi sterownikami, a także za kontrolę systemów bezpieczeństwa. Uproszczony schemat przedstawiający ułożenie i działanie układu przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat blokowy obrazujący działanie układu elektrycznego pojazdu prototypowego

3.1. Komunikacja pomiędzy sterownikami

Komunikacja bazuje na implementacji magistrali RS-485 pracującej w trybie full-duplexowym wykorzystując układy scalone MAX485CSA+ [7]. Schemat elektroniczny odbioru danych został przedstawiony na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat połączeń modułu komunikacyjnego w konfiguracji odbierania danych

W projekcie wykorzystano trzy takie moduły skonfigurowane w jednakowy sposób. Długość pojedynczej transmisji ustalono na 8 bitów oraz wykorzystano prędkość komunikacji poprzez port szeregowy wynoszącą 57 600 bit/s. Start, oraz koniec transmisji sygnalizowane są poprzez wymuszenie odpowiedniego stanu na linii danych. Celując w zwiększenie wydajności pracy urządzenia zdecydowano się na wykorzystanie kontrolera DMA, który umożliwia szybki transfer danych między peryferiami a pamięcią, praktycznie nie wykorzystując zasobów procesora.

Przy projektowaniu systemu komunikacyjnego zwrócono szczególną uwagę na możliwość pojawienia się błędów, które mogą doprowadzić do nieprawidłowości w działaniu sterownika. Do przeciwdziałania temu zjawisku zdecydowano się na zaimplementowanie sumy kontrolnej CRC (ang. *Cyclic Redundancy Check*). Działanie algorytmu oparto na dostarczonym przez producenta mikrokontrolerów STM32 dokumencie [8].

Zmodyfikowano system dostosowując go pod zastosowany układ wymiany danych. W opracowanym algorytmie, za bazę służy wartość najbardziej znaczącego bitu oraz wielomianu generatora, który ustawiono jako $X^2+X^1+X^0$. Wykorzystano ramki danych do komunikacji z poszczególnymi sterownikami. Do każdej z nich dodano bajt kontrolny EOT o stałej wartości, który przekazuje informację o zakończeniu procesu transmisji.

3.2. Pomiary

Monitorowanie napięcia baterii akcesoryjnej pomaga określić jej stan rozładowania i moment, w którym konieczne jest jej ponowne naładowanie. Natomiast obserwacja napięcia z pinu analogowego czujnika wodoru służy do sprawdzania stopnia wycieku tego gazu. W tym celu należało dopasować napięcie mierzonych elementów do dopuszczalnego na pinie mikrokontrolera. Użyto rezystancyjnych dzielników napięcia.

Kierowca, mając nieustanny pogląd czasu danego przejazdu, może skorygować swój tor jazdy bądź w wydajniejszy sposób dostosować prędkość pojazdu. Czas trwania przejazdu uzależniony jest od stanu przycisku *speedReset* znajdującego się na kierownicy. Pierwsze wciśnięcie wyzwala licznik odliczający czas. Kolejne wciśnięcie powoduje zatrzymanie czasu i wysłanie na wyświetlacz kierownicy. Monitorowanie i zarządzanie prędkością pojazdu wpływa pozytywnie na bezpieczeństwo kierowcy oraz funkcjonowanie elementów mechanicznych układu napędowego, chroniąc je przed nadmiernym zużyciem. Pomiar prędkości oparto na czujniku prędkości generującym przerwania. Posługując się tym skonfigurowano pin mikrokontrolera jako GPIO_EXTI (ang. *External Interrupt Mode with Rising edge trigger detection*) wyzwalane wznoszącym zboczem. Średnią prędkość, a więc prędkość na odcinku np. okrążeniu, kontroluje stan przycisku *speedReset* znajdujący się na kierownicy. W momencie naciśnięcia przycisku rozpoczyna się zliczanie impulsów pochodzących od czujnika prędkości. Kolejna zmiana stanu zatrzymuje zbieranie danych i zwraca wartość prędkości średniej, według wzoru (1), i przekazuje do wyświetlenia na kierownicy w jednostce km/h:

$$\text{Prędkość średnia} = 3600 \cdot \left(\frac{\text{ilość zliczonych impulsów}}{\text{impulsy na obrót}} \cdot \text{obwód koła} \right) / \text{czas w milisekundach} \quad (1)$$

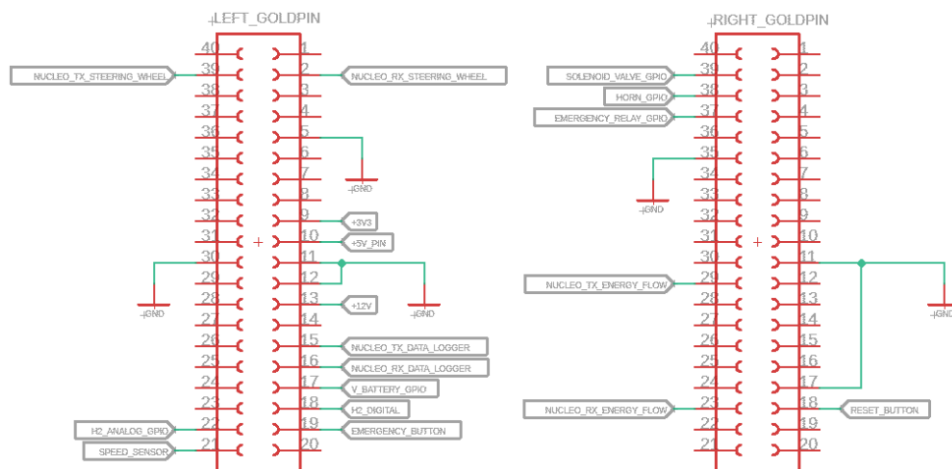
Pomiar prędkości chwilowej również bazował na zliczaniu impulsów. Wartość wyznaczano na podstawie mierzenia czasu pomiędzy dwoma kolejno przychodzącymi przerwaniami za pomocą funkcji *HAL_GetTick()*. Obliczenia prędkości chwilowej opierają się na wzorze 2, który zwraca wynik w km/h. Przesyłanie wartości prędkości chwilowej do sterownika kierownicy odbywa się co 500 ms.

$$\text{Prędkość chwilowa} = 3600 \cdot (\text{obwód koła} / (\text{czas między impulsami} \cdot \text{impulsy na obrót})) \quad (2)$$

Odczytywanie napięcia baterii akcesoryjnej opracowano z wykorzystaniem ADC (ang. *Analog to Digital Converter*). Dobrano parametry tak, aby dokładność pomiarów była jak najlepsza. W tym celu ustawiono dzielnik zegara taktującego, rozdzielczość oraz czas próbkowania do wartości maksymalnych. Dodatkowo, wykorzystano system DMA w celu uzyskania wydajniejszej pracy programu. Umieszczenie dzielnika napięcia na obwodzie drukowanym sterownika zmniejszyło poziom zasilania do akceptowalnego przez mikrokontroler, a tym samym wymusiło opracowanie konwersji danych z wykorzystaniem przelicznika.

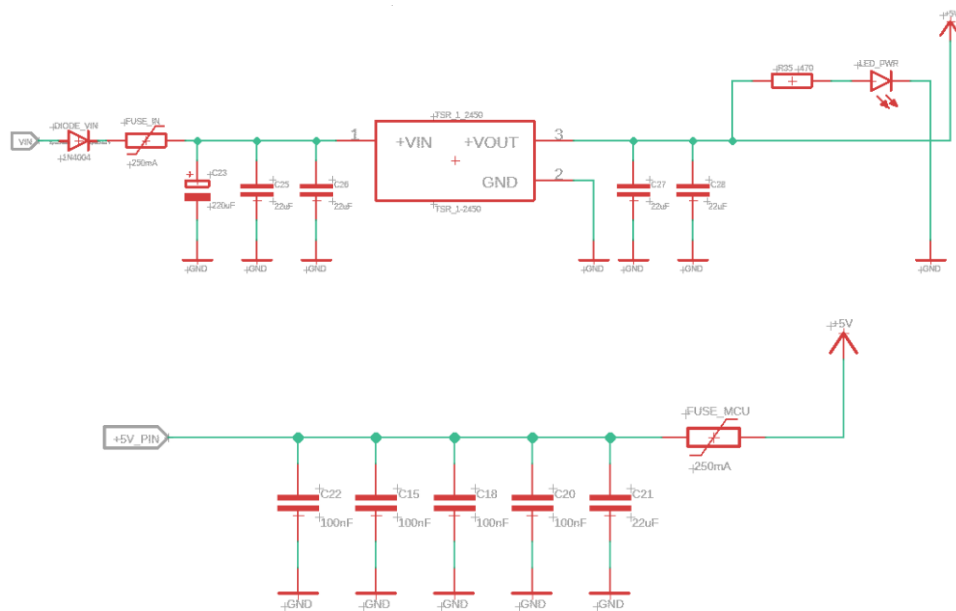
3.3. Systemy bezpieczeństwa

Systemy bezpieczeństwa są niezwykle istotnym zagadnieniem w projektowaniu układów. Pierwszych z nich są tranzystory unipolarne wykorzystane do sterowania pracą klaksonu, przekaźnika oraz zaworu elektromagnetycznego. Elementy zasilane nie pobierają bezpośrednio prądu z mikrokontrolera, a za dostarczenie im energii odpowiadają tranzystory. Tory prądowe zaworu elektromagnetycznego, klaksonu oraz przekaźnika bezpieczeństwa zostały wyposażone w diody prostownicze oraz bezpieczniki. Chronią one elementy zasilane, jak i sterownik przed odwrotną polaryzacją napięcia mogącą spowodować znaczne szkody. W miejsce przeznaczone na mikrokontroler umiejscowiono dwie dwurzędowe listwy żeńskie typu goldpin, do których poprowadzono wszystkie niezbędne sygnały i połączenia (rys. 5). Do układu zasilania, oprócz przetwornicy obniżającej napięcie, zastosowano szereg kondensatorów filtrujących dla napięć: bezpośrednio z baterii 5 V oraz 12 V.



Rys. 5. Schemat połączeń dla mikrokontrolera

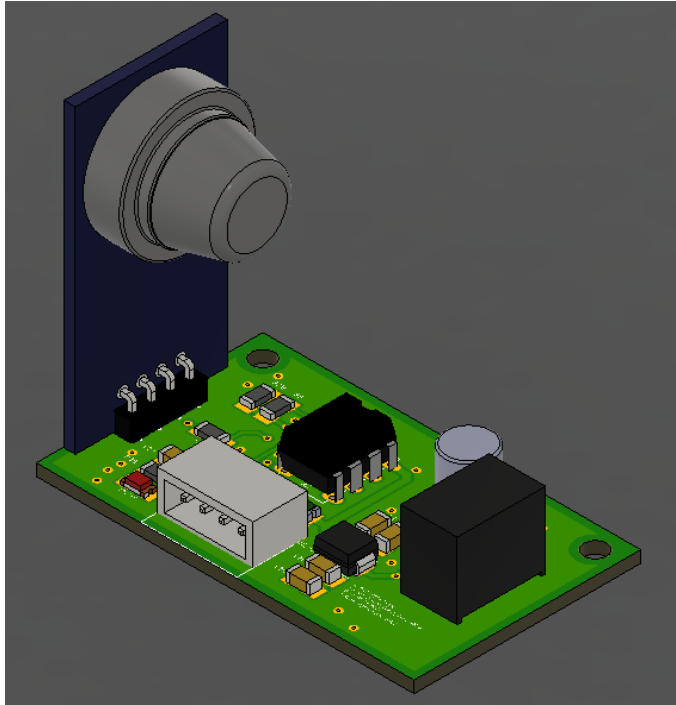
Każdy z torów został wyposażony w bezpiecznik oraz ścieżka bezpośrednio od baterii w diodę prostowniczą chroniącą układ przed odwrotnym podłączeniem zasilania. Schemat ścieżek przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat zasilania sterownika

Wodór w formie gazowej cechuje się wysoką łatwopalnością, dlatego szczególną uwagę należało poświęcić szczelności układu oraz nadzorowi poziomowi wycieku do pojazdu. W części grodzi, w której znajduje się ogniwo wodorowe zamontowano czujnik wodoru. Jest w stanie wykryć stężenie wodoru w granicach od 300 ppm do 5000 ppm oraz za pomocą cyfrowego wyjścia przekazuje sygnał o przekroczeniu granicy ustawianej poprzez potencjometr [9]. Moduł został umieszczony na oddzielnym obwodzie drukowanym służącym za obsługę czujnika, a jego model 3D przedstawiono na rysunku 7.

Pomiar napięcia z wyjścia analogowego czujnika odbywa się w bliźniaczy sposób do monitorowania stanu baterii akcesoryjnej. Główny system kontroli wycieku oparto na cyfrowym wyjściu, które przy zmianie stanu generuje przerwanie. Wystąpienie przerwania uruchamia system bezpieczeństwa mający na celu natychmiastowe zatrzymanie pojazdu. Zostaje także wysłany komunikat do reszty sterowników. Stan zagrożenia utrzymuje się do zresetowania sterownika.



Rys. 7. Trójwymiarowa wizualizacja obwodu drukowanego z umieszczonym czujnikiem wodoru

Wymogiem od organizatorów jest umieszczenie na monokoku oraz na kierownicy po jednym przycisku bezpieczeństwa. Oba mają jedno zadanie, ich wciśnięcie powoduje zatrzymanie pojazdu oraz odcięcie zasilania. Udało się to wykonać poprzez ustawienie pinów GPIO w trybie *input*. Zerwanie komunikacji objawia się przekroczeniem ustalonej granicy odrzuconych ramek z rzędu. Skutkuje zatrzymaniem silnika, odcięciem dopływu wodoru poprzez zawór elektro-magnetyczny oraz wyłączeniem zasilania z wykorzystaniem przekaźnika.

3.4. Sterowanie układem napędowym

Silniki elektryczne BLDC charakteryzują się znacznym poborem prądu, przewyższającym prąd znamionowy w momencie podania zasilania. Skutkować to może przeciążeniem prądowym układu. Dodatkowo, nagły skok wartości prądu może wywołać gwałtowne szarpnięciem układem mechanicznym, doprowadzając do szybszego zużycia czy uszkodzenia. W celu ochrony obu układów zdecydowano się na zastosowanie procedury *softstart* pozwalającej silnikowi na powolny rozruch. Polega na powolnym zwiększaniu wartości PWM do określonej granicy.

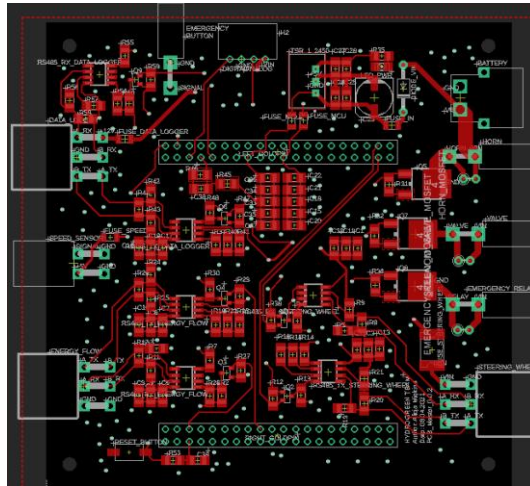
Zdecydowano się na wykorzystanie regulatora PID. Jako wartość wejściową przyjęto prędkość chwilową i na jej podstawie dopasowywano zadaną prędkość pojazdu, podając odpowiednią wartość sygnału PWM. Metoda regulacji sygnału, polegająca na zmianie wypełnienia sygnału prądowego o stałej amplitudzie oraz częstotliwości, charakteryzuje się wystarczającą dokładnością oraz łatwością sterowania. Kierowca może za pomocą przycisków *fullgas* i *halfgas* sterować wypełnieniem sygnału, czyli docelowo prędkością poruszającego się pojazdu. Zależność pomiędzy tymi parametrami przedstawiono w tabeli 2. Dobór nastaw regulatora dobrano w sposób empiryczny, przeprowadzając testy bez obciążenia pojazdu. Pojawienie się kierowcy będzie wymagało korekty nastaw i dostosowania ich pod bieżącą wartość obciążenia.

Tabela 2. Zależność pomiędzy stanami przycisków a wartością PWM podawaną na silnik

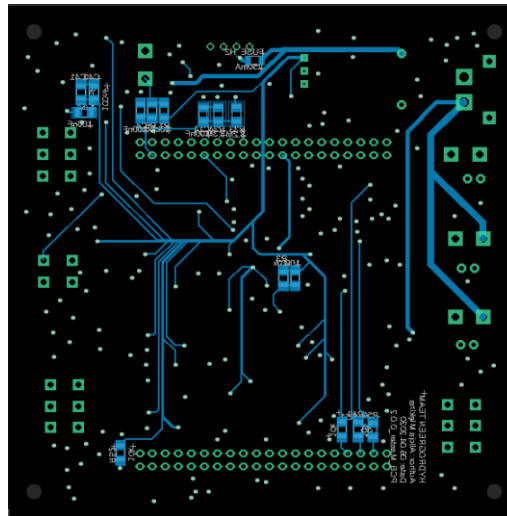
Stan przycisku <i>fullGas</i>	Stan przycisku <i>halfGas</i>	Wartość PWM silnika	Zadana prędkość pojazdu [km/h]
0	0	0	0
1	0	Max	40
1	1	Max/2	20
0	1	0	0

3.5. Wygląd opracowanego układu

Zaprojektowany model obwodu z wyszczególnieniem obu warstw TOP i BOTTOM przedstawiono na rysunkach 7 i 8. Produkcja własnoręczna płytek obwodu drukowanego lepiej sprawdza się przy prostszych projektach o większych rozmiarach z uwagi na niedokładności procesu wytrawiania. Z uwagi na chęć minimalizacji układu oraz jego estetyczności, zdecydowano się powierzyć wyprodukowanie płytki zewnętrznej firmie JLCPCB [10]. Komponenty przeznaczone do montażu na sterowniku zostały umieszczone własnoręcznie przy wykorzystaniu stacji lutowniczej oraz urządzenia hot-air.



Rys. 7. Warstwa TOP sterownika



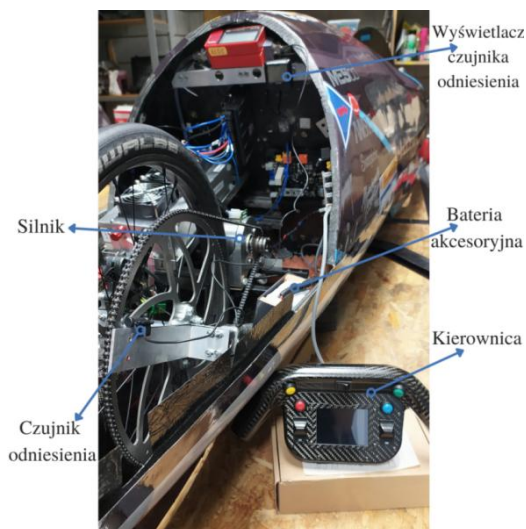
Rys. 8. Warstwa BOTTOM sterownika

4. Wyniki

Sprawdzenie poprawności działania sterownika wymagało przetestowania go pod kątem każdej funkcjonalności z uwzględnieniem części programowej, jak i sprzętowej. W tym celu wykorzystano oprogramowanie służące do odczytu wartości zmiennych sterownika oraz przygotowano stanowisko testowe symulujące rzeczywiste działanie pojazdu.

Do budowy stanowiska testowego postanowiono wykorzystać pojazd i umieścić w nim niezbędne elementy. Niektóre funkcjonalności wymagały jedynie podłączenia do projektu i sprawdzenia działania. W ten sposób zweryfikowano poprawność korzystania z klaksonu, zewnętrznego przycisku bezpieczeństwa, a także odczytu napięcia baterii (poprzez porównanie wartości z multimetrem) oraz czujnika wodoru, podając do niego wyższe stężenie gazu. Działanie tych systemów uznano za zgodne z oczekiwaniami.

Pomiar prędkości pojazdu zweryfikowano, wykorzystując czujnik odniesienia, czyli licznik rowerowy Cannondale IQ108 [11]. W tym celu opracowano stanowisko pomiarowe, na które składają się połączone sterowniki, silnik, umieszczony czujnik prędkości oraz licznik, a także zasilanie w postaci baterii. Stanowisko przedstawiono na rysunku 9. Pojazd umieszczono na hamowni podwoziowej.

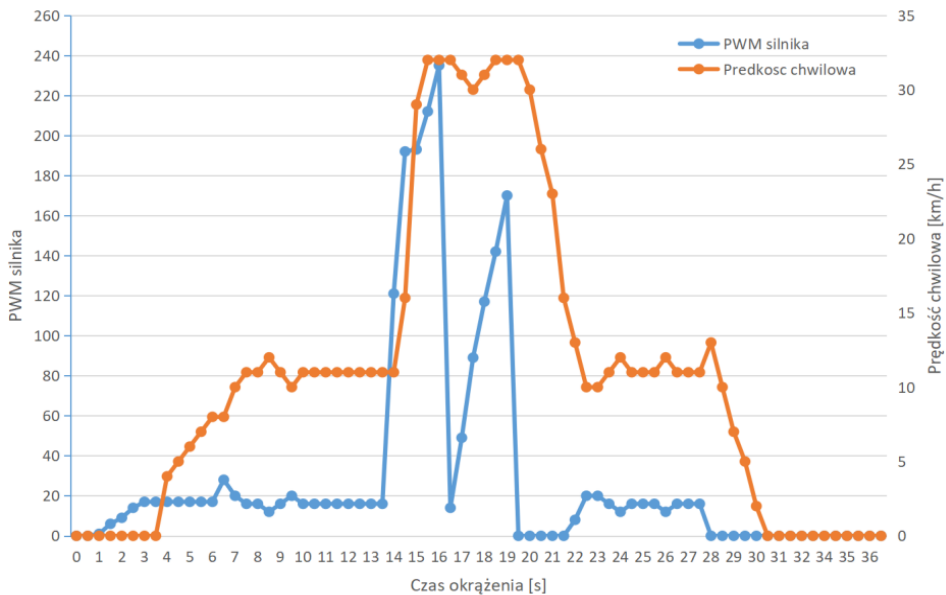


Rys. 9. Wygląd stanowiska pomiarowego

Za pomocą przedstawionego stanowiska i programu STM Studio, udało się zebrać pomiary, a ich analiza wykazała poprawność w działaniu sterownika. Przy wykorzystaniu przycisków na kierownicy, zadawano prędkość pojazdu, konwertowano na odpowiedni sygnał PWM, a następnie podawano na silnik. Zastosowany licznik rowerowy wyświetlał prędkość chwilową i średnią, a więc w łatwy sposób można było porównać oba parametry. Podawanie sygnałów sterujących poprzez kierownicę potwierdziło działanie transmisji danych między sterownikami.

Opracowano wykresy obrazujące sposób działania regulatora PID, pomiaru czasu okrążenia oraz procedury *softstart* (rys. 10). Opisują zależność sygnału PWM i prędkości chwilowej pojazdu w czasie. Wraz z przyłożeniem zasilania

i wciśnięciem przycisku *fullgas* uruchamiającego pojazd zauważalne jest powolne narastanie wartości sterującej silnikiem. Po przekroczeniu określonej wartości prędkości i ciągłym trzymaniu przycisku widoczny jest nagły skok PWM i osiągnięcie maksymalnej wartości prędkości wynoszącej 32 km/h. W celu uniknięcia przekroczenia granicy, obserwowane jest intensywne chwilowe zmniejszenie wartości sterującej. Po ustabilizowaniu parametrów, sprawdzono działanie pojazdu pod wpływem zadania połowicznej prędkości. W tym przypadku, opracowany algorytm również doprowadził do poruszania się pojazdu z zadaną wartością 11 km/h. Zauważalna jest szybka odpowiedź układu do zmieniających się warunków sterujących. Procedura *softstart* trwała 7 s. Puszczanie obu przycisków spowodowało zatrzymanie się pojazdu z połowicznej prędkości w przeciągu około 3 s., a więc zasady bezpieczeństwa zostały zachowane. Widoczne są drobne oscylacje prędkości wynikające z doboru nastaw regulatora, jednakże mieszczą się w określonych granicach dla warunków pracy pojazdu bez obciążenia. W przypadku dociążonego Hydrosa, prawdopodobne będzie ponowne dobranie zarówno parametrów regulatora PID, jak i procedury *softstart*.



Rys. 10. Wykres zależności prędkości chwilowej i wartości PWM sterującej silnikiem od czasu zrealizowany bez obciążenia pojazdu

5. Podsumowanie

W ramach niniejszej pracy został zrealizowany projekt głównego sterownika układu elektronicznego pojazdu napędzanego wodorem – Hydros. Wymagania organizatorów zawodów oraz aspekty konstrukcyjne wymusiły rozpatrzenie właściwości, takich jak minimalizacja układu, rozmieszczenie poszczególnych elementów w celu połączenia z zewnętrznymi częściami w najbardziej optymalny sposób. Zdecydowano się na dobranie większości elementów w rozmiarze 1206. Do transmisji danych pomiędzy innymi sterownikami będącymi składową układu pojazdu wybrano standard RS-485 i zaimplementowano go w trybie full-duplex umożliwiając odbiór oraz nadawanie danych. Elementy pobierające dużo energii wysterowano za pomocą odpowiednio dobranych tranzystorów pozwalających na szybką zmianę stanu, niwelując możliwość uszkodzenia układu. Po dobraniu elementów przystąpiono do zaprojektowania schematu elektrycznego przystosowanego do zasilania z baterii akcesoryjnej. Zapewniono ochronę sterownika, umieszczając na każdej linii prądowej odpowiednie bezpieczniki. Kolejnym etapem było przygotowanie, wyprodukowanie oraz montaż rzeczywistego modelu obwodu drukowanego.

Przygotowanie oprogramowania sterownika wymagało przewidzenia szeregu czynników wpływających na przyszłą pracę układu. Konstrukcję kodu oparto na wykorzystaniu timerów taktujących z określoną częstotliwością funkcjonalności programu. Ważnym aspektem było opracowanie weryfikacji danych pochodzących z magistrali komunikacyjnej. W tym celu opracowano algorytm obliczania sumy kontrolnej. Sterownik główny jest odpowiedzialny za istotne pomiary działania pojazdu. Wyznacza wartości prędkości chwilowej, jak i średniej, czasu okrążenia oraz monitoruje stan baterii akcesoryjnej. Szczególnym zadaniem, któremu obwód drukowany musiał sprostać, było sterowanie silnikiem na podstawie sygnałów otrzymywanych z kierownicy. Dlatego opracowano regulator PID odpowiadający za sygnał PWM silnika oraz procedurę *softstart* chroniącą układ napędowy przed uszkodzeniem. Przygotowano także systemy bezpieczeństwa wyzwalające się w sytuacji stanowiącej zagrożenie dla pojazdu, jak i kierowcy. W tym miejscu skupiono się na monitorowaniu wycieku wodoru z instalacji oraz sygnałach pochodzących z zewnętrznych elementów. Końcowym etapem było przetestowanie wszystkich funkcjonalności układu. Opracowano stanowisko testowe i obserwowano zachowanie się poszczególnych systemów sterownika pod kątem programowym oraz konstrukcyjnym.

Literatura

1. Krakowski R., *Paliwa i napędy alternatywne w kontekście zaostrzenia przepisów dotyczących emisji spalin*, *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* Nr 18(6)/2017, s. 1225–1230.
2. Steyn J., *Hydrogen for Vehicular Transport*, Project: Green Energy, 2020.
3. *Regulamin zawodów Shell Eco-marathon 2021*, https://base.makethefuture.shell/en_gb/service/api/home/shell-eco-marathon/global-rules/_jcr_content/root/content/document_listing/items/download.stream/shell-eco-marathon-2021-official-rules-chapter-I.pdf, dostęp 16.11.2021.
4. *Dokumentacja ogniwa Horizon H300*, <https://www.fuelcellstore.com/manuals/horizon-pem-fuel-cell-h-300-manual.pdf>, dostęp 04.05.2021.
5. Hames Y., Kaya K., Baltacioglu E., Turksay A., *Analysis of the control strategies for fuel saving in the hydrogen fuel cell vehicles*, *Internal Journal of Hydrogen Energy* Nr 43/2017, s. 10810–10814.
6. Larminie J., Dicks., *Fuel Cell Systems Explained*. Jon Wiley & Sons, New Jersey, 2013.
7. *Dokumentacja techniczna układu scalonego MAX485CSA+*, <https://datasheets.maximintegrated.com>, dostęp 14.09.2021.
8. *Użycie peryferii CRC w rodzinie mikrokontrolerów STM32*, https://www.st.com/resource/en/application_note/an4187-using-the-crc-peripheral-in-the-stm32-family-stmicroelectronics.pdf, dostęp 13.11.2021.
9. *Dokumentacja techniczna czujnika wodoru MQ-2*, <https://www.waveshare.com/w/upload/3/3f/MQ-2.pdf>, dostęp 21.12.2021.
10. *Strona wykonawcy rzeczywistego modelu sterownika JLCPCB*, <https://jlcpcb.com>, dostęp 14.09.2021.
11. *Dokumentacja licznika rowerowego Cannondale IQ108*, <https://www.instrukcjaobslugipdf.pl/cannondale/iq108/instrukcja?p=2>, dostęp 21.12.2021.

UKŁAD DO KONTROLI ZASILANIA Z OGNIWA WODOROWEGO W WYSOKOSPRAWNYM POJEŹDZIE PROTOTYPOWYM

1. Wstęp

Dużym problemem światowego transportu jest powszechne stosowanie paliw kopalnych oraz silników spalinowych. Ponad 90% współcześnie eksploatowanych pojazdów napędzanych jest silnikami spalania wewnętrznego, używających paliw kopalnych [13]. Powszechne używanie pojazdów o napędzie spalinowym odpowiedzialne jest za ok. 20% emisji gazów cieplarnianych oraz za emisję szkodliwych substancji, takich jak dwutlenek węgla, tlenki siarki oraz tlenki azotu będącymi produktami ubocznymi spalania paliw kopalnych [3, 5].

Z powodu zwiększającego się zanieczyszczenia powietrza w aglomeracjach miejskich, globalnej zmiany klimatu oraz spodziewanego kryzysu energetycznego, jedną z kluczowych kwestii w rozwoju cywilizacji jest znalezienie nowych źródeł energii oraz rozwój alternatywnych napędów dla pojazdów samochodowych np. silników elektrycznych [12, 15]. Ciągłe prace w tym zakresie przyczyniają się do wzrostu popularności samochodów hybrydowych oraz samochodów elektrycznych wykorzystujących jako źródło energii baterie. Wadą pojazdów elektrycznych jest pojemność baterii, czas ładowania oraz obciążenie dla infrastruktury energetycznej wiążące się z koniecznością ładowania samochodów elektrycznych z sieci. Kolejnym rozwiązaniem są pojazdy wodorowe wykorzystujące ogniwa paliwowe do zasilania silnika elektrycznego. Wodór, ze względu na dużą masową gęstość energetyczną, jest obiecującym akumulatorem energii. Łączą one funkcjonalność samochodów spalinowych z ekologią samochodów elektrycznych. W ramach pracy opracowano sterownik przepływu energii wodorowego pojazdu prototypowego Hydros budowanego przez studentów ze Studenckiego Koła Naukowego Napędów Lotniczych działającego na Politechnice Lubelskiej, w ramach projektu Hydrogreen Team.

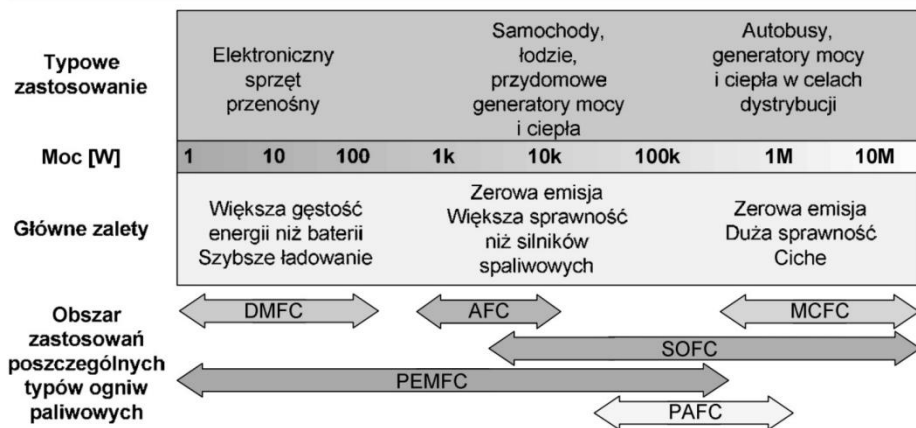
2. Ogniwa wodorowe

Ogniwa wodorowe są urządzeniami zamieniającymi energię chemiczną paliwa w energię elektryczną. Zachodzi w nich reakcja łączenia wodoru ze zbiornika z tlenem z powietrza atmosferycznego. Reakcja zachodząca w ogniwie odpowiada odwrotnej elektrolizie, a jej produktami są energia elektryczna, woda i energia cieplna [6, 10].

2.1. Budowa i podział ogniw wodorowych

Ogniwa paliwowe dzieli się ze względu na rodzaj użytego elektrolitu. Podstawowy podział (rys. 1) obejmuje cztery rodzaje ogniw [9]:

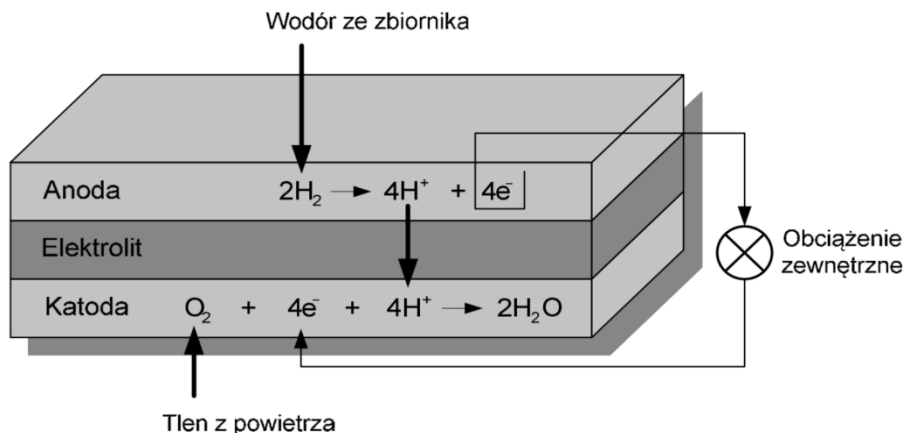
- PAFC – ogniwo z elektrolitem fosforowym,
- MCFC – ogniwo z elektrolitem węglanowym,
- SOFC – ogniwo z elektrolitem tlenkowym,
- PEMFC (PEFC) – ogniwo z elektrolitem, polimerowym (ang. *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*).



Rys. 1. Podział ogniw paliwowych wraz z obszarem zastosowań [9]

Najpopularniejszym typem ogniw wodorowych do zastosowań motoryzacyjnych są ogniwa wodorowe z elektrolitem polimerowym PEMFC. Zaletami tego typu ogniw jest duży zakres mocy, zero emisja oraz większa gęstość energii niż w przypadku baterii. Ogniwo PEM składa się w uproszczeniu z trzech głównych części anody, katody i elektrolitu oddzielającego dwie elektrody. Elektrody zbudowane są w uproszczeniu z grafitu oraz katalizatora w postaci platyny. Wodór dostarczany pod ciśnieniem na anodę, pod wpływem obecności katalizatora rozdziela się na jon dodatni i elektron, dodatnie jony

przepuszczane są przez elektrolit na katodę, podczas gdy elektrony zbierają się na anodzie. Powstałą różnicę potencjałów między dodatnio naładowaną katodą a ujemnie anodą można wykorzystać do zasilenia układu (elektrony przepływają przez układ zewnętrzny jako prąd elektryczny). Na katodzie, w obecności tlenu, dochodzi do łączenia się elektronu, dodatniego jonu wodoru oraz tlenu, w wyniku czego powstaje czysta woda, która oprócz małych ilości ciepła jest jedynym produktem ubocznym reakcji. Podczas pracy typowe ogniwa PEM mogą osiągać temperaturę do ok. 85 °C [2, 9]. Budowę oraz zasadę działania ogniwa przedstawiono na rysunku 2.



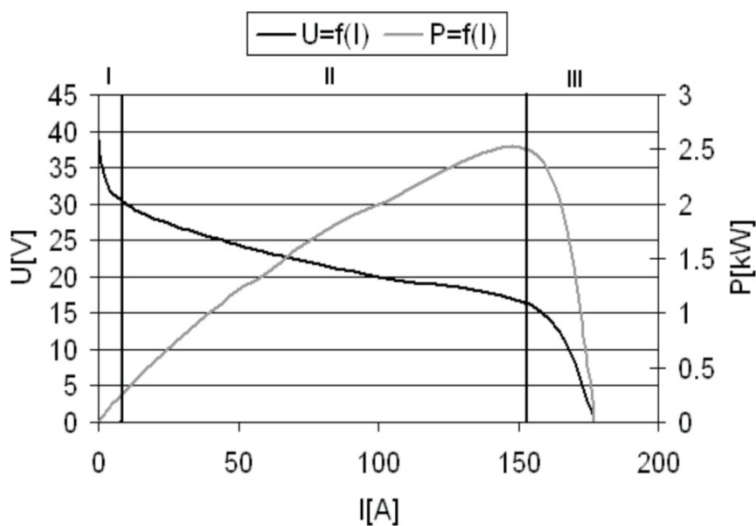
Rys. 2. Zasada działania ogniwa wodorowego z elektrolitem polimerowym PEMFC [9]

2.2. Hybrydowe układy zasilania z ogniwem wodorowym

Pojazdy wodorowe wykorzystują ogniwo wodorowe do zasilania elektrycznego układu napędowego. Masową gęstość energetyczną wodoru wynosi 38 kWh/kg, podczas gdy w przypadku benzyny jest to 12 kWh/kg, zaś obecnie stosowanych baterii 0,3 kWh/kg [4, 14, 16]. Dzięki gęstości energii, większej niż w przypadku baterii, możliwe jest uzyskanie większego zasięgu aut wodorowych w porównaniu z samochodami elektrycznymi, w których masa i pojemność baterii stanowi duży problem [8]. W przeciwieństwie do baterii, napięcie stosu ogniw nie zmienia się w czasie do momentu wyczerpania paliwa, a zależy jednak od poboru prądu z ogniwa. Problemem ogniw wodorowych jest nieliniowa charakterystyka pracy, długi czas rozruchu oraz duża bezwładność odpowiedzi na nagły wzrost obciążenia. Są to istotne cechy ogniw w ujęciu ich przydatności w układach zasilania samochodów (rys. 3). Ze względu na niejednostajne zapotrzebowanie energii przez silnik elektryczny zastosowanie ogniwa wodorowego jako jedynego źródła energii okazuje się problematyczne. Dlatego przydatne staje się stosowanie hybrydowych układów zasilania

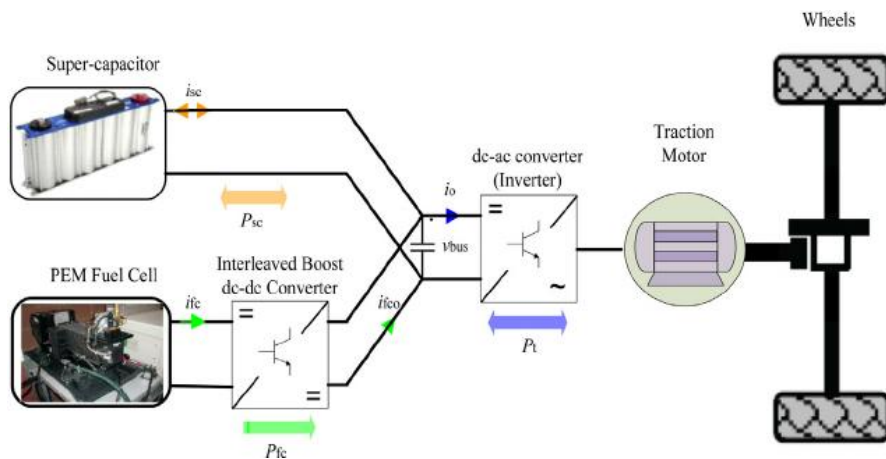
złożonych z ogniwa wodorowego oraz bufora energii w postaci baterii lub baterii superkondensatorów.

Na rysunku 3 przedstawiono przykładową charakterystykę pracy ogniwa wodorowego z zaznaczonymi trzema głównymi obszarami strat. Obszar nr I – straty spowodowane powolnym zachodzeniem reakcji, obszar nr II – straty spowodowane rezystancją wewnętrzną ogniwa (praca jako typowe źródło napięcia), obszar nr III – tzw. straty transportu masy zachodzą, kiedy gazy na elektrodach zużywane są szybciej niż mogą zostać dostarczone, praca w tym obszarze może spowodować uszkodzenie ogniwa [2].

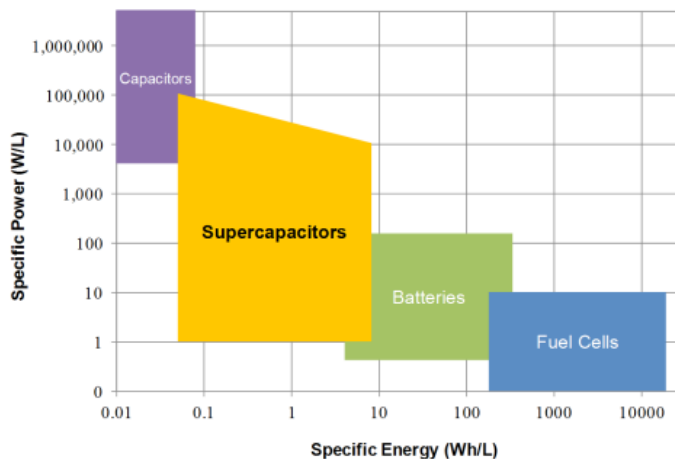


Rys. 3. Przykładowa charakterystyka ogniwa PEM z zaznaczonymi obszarami pracy [2]

Hybrydyzacja układów zasilania z ogniwem paliwowym ma na celu zwiększenie dynamiki układu, zapobieganie niedostatkowi mocy oraz niedopuszczenie do pracy ogniwa w warunkach nieoptymalnych lub nawet szkodliwych. Układy hybrydowe składają się z głównego źródła energii, jakim jest ogniwo paliwowe oraz z dodatkowego źródła pełniącego funkcję bufora energii. Zastosowanie bufora energii pozwala wyeliminować wady ogniwa, w przypadku nagłych wzrostów zapotrzebowania energetycznego układu. Dodatkowo, bufor energii powinien zaspokoić chwilowe zapotrzebowanie na energię do momentu odpowiedzi ogniwa. Bufor energii rozładowuje się podczas zwiększonego zapotrzebowania układu, a podczas zmniejszonego zapotrzebowania na energię może być ładowany przez ogniwo, utrzymując je ciągle w optymalnych warunkach pracy. Jako bufor energii stosowane są baterie litowe (LiPol, LiIon) lub baterie superkondensatorów. Oba rozwiązania mają swoje wady i zalety (rys. 5), (tab. 1).



Rys. 4. Przykładowy układ zasilania samochodu wodorowego [1]



Rys. 5. Porównanie źródeł energii elektrycznej ze względu na objętościową gęstość energii i mocy [7]

Tabela 1. Porównanie źródeł energii elektrycznej [11]

	Baterie	Kondensatory	Superkondensatory
Gęstość energii [kJ/kg]	100–360	0,36	30
Gęstość mocy [W/kg]	100–200	10^5	10^4
Cykle ładowania [1]	10^4	10^{10}	10^6
Żywotność [lata]	5	30	30
Sprawność [%]	75–85	>95	85–98

3. Hydros

Hydros jest to prototypowy pojazd wodorowy budowany przez studentów z zespołu Hydrogreen Team z koła naukowego Napędów Lotniczych, działającego na Politechnice Lubelskiej w Katedrze Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych. Głównym celem budowy pojazdu jest start w międzynarodowych zawodach Shell Eco Marathon.

3.1. Budowa pojazdu

Pojazd Hydros zbudowany jest tak, aby być jak najbardziej energooszczędnym. W tym celu zdecydowano się użyć jako głównego materiału włókna węglowego. Ponadto, pojazd nie posiada ramy, lecz jest w całości konstrukcją skorupową. Masa pojazdu wynosi około 25 kg. Kształt nadwozia charakteryzuje się niskim współczynnikiem oporu powietrza na poziomie $c_x = 0,1$. Hydros jest trójkołowym pojazdem kategorii *prototype* o napędzie wodorowym wyposażonym w hybrydowy układ zasilania składający się z ogniwa wodorowego o mocy 300 W Horizon H-300 PEMFC oraz baterii superkondensatorów. Wybrane parametry zastosowanego ogniwa przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wybrane parametry ogniwa wodorowego użytego w pojeździe [21]

Parametr	wartość
Typ ogniwa paliwowego	PEM
Ilość ogniw w stosie	60
Moc znamionowa	300 W
Parametry wyjściowe	36 V przy 8,3 A
Maksymalna temperatura stosu	65°C
Ciśnienie wodoru	0,45–0,55 bara
Chłodzenie	Wentylatory

Układ elektryczny Hydrosa ma topologię zasilania zgodną z wymogami regulaminu zawodów Shell Eco Marathon [42] i można ją podzielić na dwie części:

- wodorową, zasilającą silnik, sterownik silnika oraz sterownik przepływu energii, nazwany „Energy Flow”, będący przedmiotem tej pracy,
- akcesoryjną zasilaną z dodatkowej 12 V baterii obejmującą główny sterownik pojazdu „Master”, klakson, przełącznik bezpieczeństwa, elektrozawór, czujnik wodoru, układ telemetrii i przesyłu danych oraz sterownik kierownicy.

Wszystkie sterowniki pojazdu komunikują się ze sobą za pomocą interfejsu UART przekonwertowanego na RS485, w celu zapewnienia stabilnego połączenia w towarzystwie zakłóceń indukcyjnych.

3.2. Sterownik przepływu energii pojazdu

Sterownik z założenia spełniać miał dwie funkcjonalności:

- regulacja pracy bufora energii:
 - regulacja prądu ładowania,
 - odłączanie bufora,
 - wykonywanie szeregu pomiarów (pomiar napięcia ogniwa, napięcia superkondensatorów, prądu superkondensatorów),
- regulacja pracy ogniwa wodorowego:
 - utrzymywanie temperatury ogniwa,
 - dostarczanie tlenu do prawidłowego przebiegu reakcji w ogniwie,
 - rozładowanie ogniwa.

W przypadku użycia superkondensatorów stosuje się dwie metody ładowania: poprzez układy samoregulujące się oraz układy regulowane. Układ Hydrosa wykorzystuje tranzystory MOSFET z kanałem typu N, podłączone do ujemnego zacisku superkondensatorów, sterowane sygnałem PWM o zmiennym współ-czynniku wypełnienia, do regulacji prądu ładowania oraz MOSFET'y typu P podłączone do dodatniego zacisku bufora, w celu umożliwienia odłączenia baterii od układu. Sterowanie tranzystorami odbywa się poprzez przekazywanie sygnału z pinu mikrokontrolera STM32 f303k8 do sterowników bramek MOSFET'ów, aby zapewnić jak najmniejsze obciążenie mikrokontrolera oraz jak najszybszy czas przełączania tranzystorów.

W celu regulacji prądu zaimplementowany został regulator PID, w którym wartością sterowaną jest prąd ładowania superkondensatorów, a wielkością sterującą współczynnik wypełnienia sygnału PWM sterującego MOSFET'ami typu N. Do wykonywania niezbędnych pomiarów użyto wbudowanych w mikrokontroler przetworników analogowo-cyfrowych z jednostką DMA oraz dzielników napięciowych wraz z wtórnikami napięcia symetrycznego i asymetrycznego. Dodatkowo, układ obsługuje cztery tryby pracy, przełączane na podstawie otrzymanych danych o stanach przycisków na kierownicy:

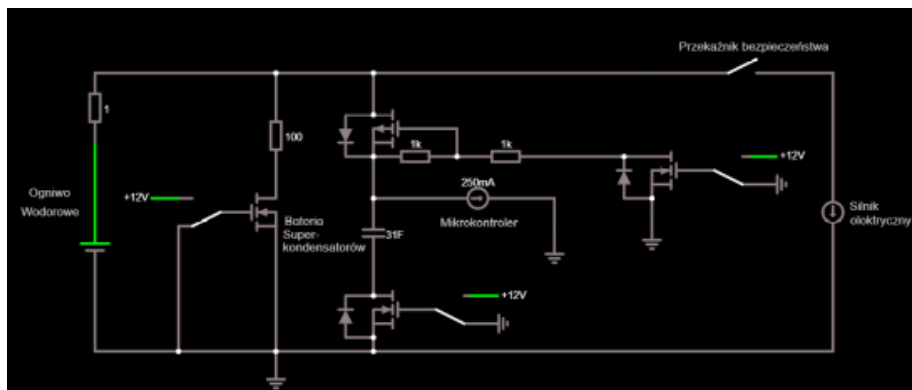
- *Prepare to race* – w tym trybie sterownik ma za zadanie wstępnie przygotować ogniwo do przejazdu pomiarowego, utrzymując zadaną temperaturę pracy.
- *Race* – w tym trybie sterownik ogniwa utrzymuje zadaną temperaturę pracy, kierowca może wybrać sposób pracy bufora: podłączony lub odłączony od układu. Dodatkowo, sterownik prądu bufora utrzymuje prąd ładowania

niższy niż zadany; tak, aby utrzymywać ogniwo w optymalnym punkcie pracy.

- *End race* – w tym trybie po naładowaniu bufora energii do poziomu napięcia, z jakim pojazd rozpoczął przejazd zostaje on odłączony od układu. Kierowca ma możliwość rozładowania ogniwa poprzez wciśnięcie odpowiedniego przycisku na kierownicy.
- *Emergency* – bufor energii jest natychmiast odłączony od układu. Do sterownika silnika stale podawany jest sygnał PWM o zerowym wypełnieniu odpowiadający zatrzymaniu się, a ogniwo wodorowe utrzymywane jest w bezpiecznej temperaturze.

Sterownik ogniwa wodorowego opiera się na pomiarze temperatury przy wykorzystaniu wbudowanego w ogniwo termistora. Na podstawie pomiaru chwilowego spadku napięcia na termistorze i odpowiednich obliczeń wyznaczana jest chwilowa temperatura ogniwa. W sterowniku zaimplementowano regulator PID temperatury, którego wielkością sterującą jest wypełnienie sygnału PWM sterującego prędkością obrotową wentylatorów ogniwa. Pomiar prędkości obrotowej wentylatorów odbywa się poprzez zliczanie impulsów z poszczególnych wentylatorów w określonym czasie, przy wykorzystaniu przerwań zewnętrznych. Po zakończeniu przejazdu należy rozładować ogniwo, odbywa się to poprzez zwarcie zacisków ogniwa przez rezystor mocy 100 Ω poprzez otwarcie tranzystora MOSFET.

W celu wstępnego oszacowania wartości niezbędnych komponentów oraz opracowania koncepcji układu regulatora przepływu energii użyto środowiska internetowego Falstad, schemat użyty we wczesnych fazach opracowywania projektu przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Okno symulacji układu w środowisku Falstad

4. Wyniki

Wykonanie płytki obwodu drukowanego zlecono firmie zewnętrznej, gotowy sterownik przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Gotowy sterownik przepływu pojazdu

W ramach pracy postanowiono wykonać testy części mocy układu sterownika przepływu energii, miały one na celu sprawdzenie, czy sterownik umożliwia zmianę parametrów pracy układu. W ramach testów przeprowadzono szereg pomiarów z wykorzystaniem narzędzie STM Studio umożliwiające podgląd wartości zmiennych w czasie rzeczywistym oraz zapisywanie ich w pliku tekstowym z wybraną częstotliwością odświeżania.

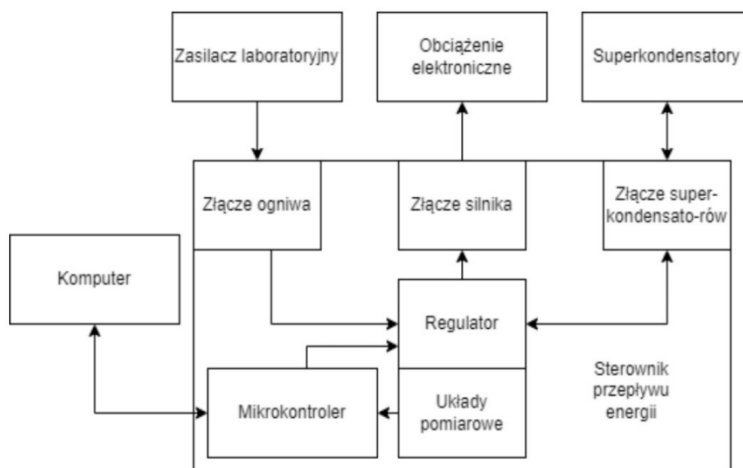
Testy podzielono na dwie części:

- wyznaczenie charakterystyki ładowania baterii superkondensatorów w zależności od wypełnienia sygnału PWM sterującego MOSFET'ami z kanałem typu N,
- wyznaczenie charakterystyki ładowania baterii superkondensatorów z wykorzystaniem zaimplementowanego regulatora PID prądu ładowania wraz z obserwacją wartości sygnału sterującego.

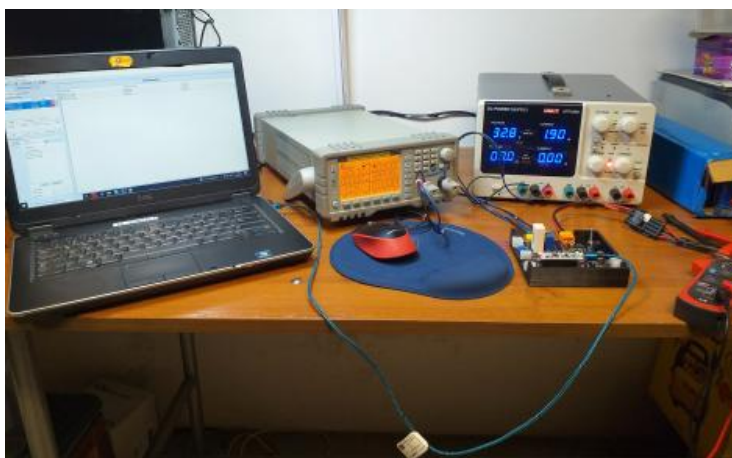
Do testów zastąpiono ogniwo wodorowe zasilaczem laboratoryjnym UNI-T UTP3305 DC. Aby zwiększyć zakres możliwych do wykonania pomiarów połączono dwa kanały równolegle dla zwiększenia wydajności prądowej urządzenia. Do rozładowania baterii posłużyło obciążenie elektroniczne

AXEL300W AXIOMET, z możliwością regulacji prądu pobieranego ze źródła zasilania.

Schemat pomiarowy dla obu badań wyglądał tak samo, składał się ze sterownika przepływu energii, zasilacza laboratoryjnego podłączonego do złącza ogniwa, obciążenia elektronicznego podpiętego do złącza silnika elektrycznego oraz baterii superkondensatorów podpiętego do złącza bufora energii. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 8, a stanowisko zostało przedstawione na rysunku 9.



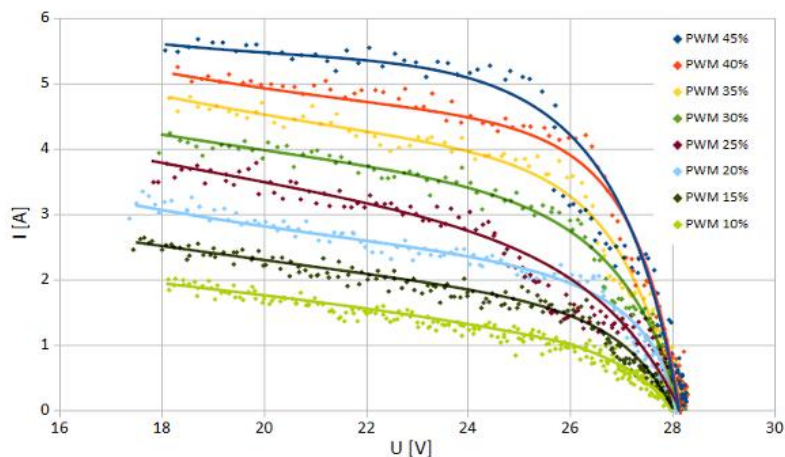
Rys. 8. Schemat układu pomiarowego



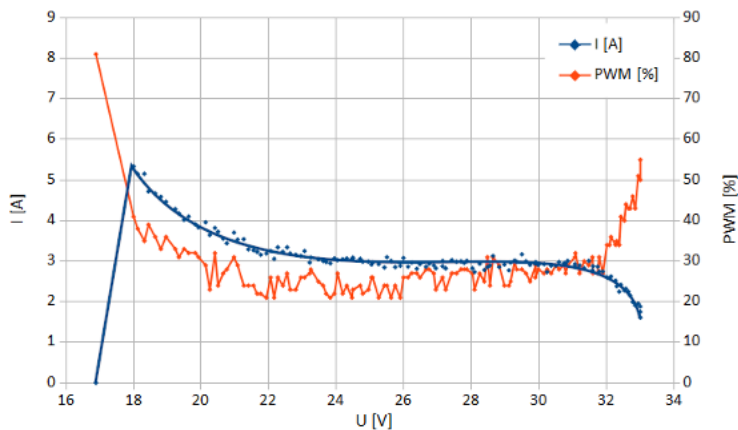
Rys. 9. Stanowisko pomiarowe

Wyniki pierwszej części badania przedstawiono na rysunku 10. Pomiary potwierdziły prawidłowe działanie układu oraz słuszność koncepcji regulowania prądu ładowania bufora poprzez impulsowo otwierane tranzystory. Zgodnie z założeniami wraz ze wzrostem współczynnika wypełnienia sygnału PWM zauważyły można wzrost prądu ładowania.

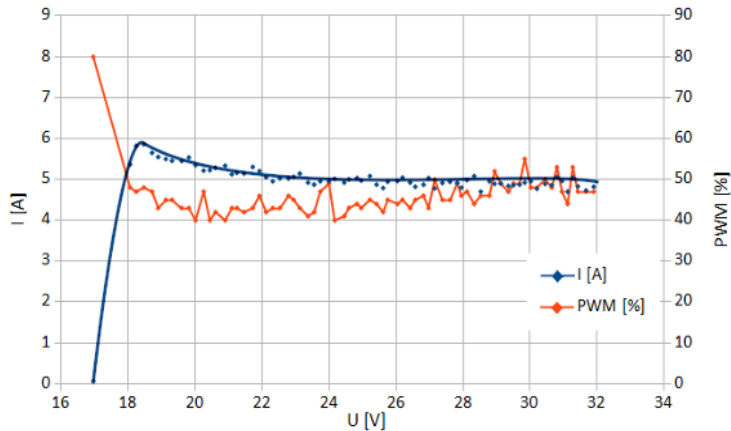
Dalsza część badań obejmowała sprawdzenie zaimplementowanego regulatora PID z organoleptycznie dobranymi nastawami do utrzymania prądu ładowania na trzech wybranych poziomach, czyli wartościach: 3 A (rys. 11), 5 A (rys. 12) oraz 7 A (rys. 13).



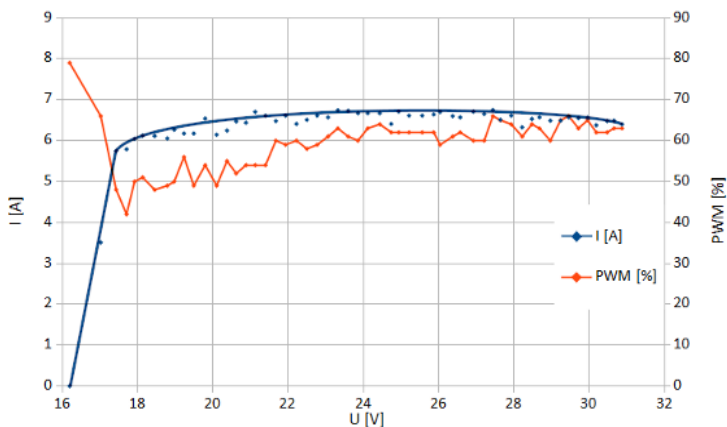
Rys. 10. Prąd ładowania baterii superkondensatorów w zależności od napięcia baterii oraz wypełnienia sygnału PWM



Rys. 11. Charakterystyka regulatora ładowania dla zadanej wartości prądu o wartości 3 A



Rys. 12. Charakterystyka regulatora ładowania dla zadanego prądu 5 A



Rys. 13. Charakterystyka regulatora ładowania dla zadanego prądu 7 A

4. Podsumowanie

Badania, mimo nieoptymalnych nastaw regulatora, wykazały prawidłowe działanie sterownika. Zaimplementowany regulator prądu ładowania umożliwia utrzymanie prądu ładowania na zadanym poziomie po ustabilizowaniu się wartości sterowanej. Przeręgulowanie, widoczne na pierwszych dwóch wykresach, spowodowane jest prawdopodobnie zbyt dużą wartością współczynnika proporcjonalnego.

W ramach prowadzonych prac udało się wykonać i przetestować sterownik przepływu energii prototypowego pojazdu wodorowego Hydros. Testy sterowników wykazały prawidłowe działanie układu.

„The project/research was financed in the framework of the project Lublin University of Technology – Regional Excellence Initiative, funded by the Polish Ministry of Science and Higher Education (contract no. 030/RID/2018/19)”.

Literatura

1. Benyahia N., Denoun H., Badji A., Zaouiaa M., Rekiouab T., Benamrouchea N., Rekiouab D., *MPPT controller for an interleaved boost dc-dc converter used in fuel cell electric vehicles*, International Journal of Hydrogen Energy Nr 39(27)/2014, s. 15196–15205.
2. Ceran B., *Charakterystyki eksploatacyjne stosu ogniw paliwowych typu PEMFC*, Energy Policy Journal Nr 17(3)/2014, s. 135–146.
3. Kazancoglu Y., Ozbiltekin-Pala M., Ozkan-Ozen Y., *Prediction and evaluation of greenhouse gas emissions for sustainable road transport within Europe*, Sustainable Cities and Society Nr 70/2021, s. 102924.
4. Khairul H., *The Oxygen Reduction Reaction in Non- aqueous Electrolytes: Li-Air Battery Applications*, Thesis, Gothenburg 2013.
5. Kihm A., Trommer S., *The new car market for electric vehicles and the potential for fuel substitution*, Energy Policy Nr 73/2014, s. 147–157.
6. Lejda K. *Wodór w aplikacjach do środków napędu w transporcie drogowym*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2013.
7. Lele S., Arora A., *Supercapacitors: A Comparative Analysis*, Engineering and Scientific Consulting, 7/2018, s. 1–10.
8. Malinowski M., *Nowe aktywne komponenty polimerowych ogniw paliwowych*, Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, Warszawa 2014.
9. Małek A., Wendeker M., *Ogniwa paliwowe typu PEM teoria i praktyka*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2010.
10. Merksiz J., Pielecha I., *Alternatywne paliwa i układy napędowe pojazdów*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004.
11. Moftah A., Al Shetiti A., *Review of Supercapacitor Technology*, International Journal of Computer Science and Electronics Engineering Nr 3(3)/2015, s. 226–231.
12. Morfeldt J., Davidsson Kurland S., Johansson D. J. A., *Carbon footprint impacts of banning cars with internal combustion engines*, Transport and Environment Nr 95/2021, s. 102807.
13. Puricelli S., Casadei S., Bellin T., Cernuschi S., Faedo D., Lonati G., Rossi T., Grosso M., *The effects of innovative blends of petrol with renewable fuels on the exhaust emissions of a GDI Euro 6d-TEMP car*, Fuel Nr 294/2021, s. 120483.
14. Surygała J., *Wodór jako paliwo*, WNT, Warszawa 2008.
15. Wilken D., Oswald M., Draheim P., Pade C., Brand U., Vogt T., *Multidimensional assessment of passenger cars: Comparison of electric vehicles with internal combustion engine vehicles*, Procedia CIRP Nr 90/2020, s. 291–296.
16. Zhang Y., Jiang J., An Y., Wu L., Dou H., Zhang J., Zhang Y., Wu S., Dong M., Zhang X., Guo Z., *Sodium-ion capacitors: Materials, Mechanism, and Challenges 2020*, ChemSusChem Nr 13(10)/2020, s. 2522–2539.

ANALIZA ZABURZEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH TROLEJBUSÓW NA PODSTAWIE TABORU MIEJSKIEGO PRZEDSIĘBIORSTWA MIEJSKIEGO

1. Wstęp

Niewątpliwym problemem obecnej cywilizacji jest wytwarzanie zaburzeń elektromagnetycznych przez urządzenia elektryczne i elektroniczne. W związku z tym, ważne jest, aby przeprowadzać badania mające na celu sprawdzanie, czy dany produkt wprowadzany na rynek jest kompatybilny elektromagnetycznie i czy nie stwarza zagrożenia i niebezpieczeństwa człowiekowi oraz aby nie miał negatywnego wpływu na środowisko.

Rozwój technologii w motoryzacji i coraz większe restrykcje nakładane na korporacje motoryzacyjne wpływają na to, że motoryzacja kieruje się w stronę pojazdów niskoemisyjnych lub nieemisyjnych. W skutek tego, produkuje się coraz większe liczby pojazdów elektrycznych i hybrydowych. Szczególnym typem pojazdu elektrycznego jest trolejbus, który służy do transportu osób. Trolejbus jest wyposażony w urządzenia i maszyny elektryczne, które mogą być źródłem zaburzeń elektromagnetycznych, dlatego ważne jest przeprowadzanie badania emisji elektromagnetycznej tych elementów, aby nie narażać podróżujących pasażerów i urządzeń elektrycznych w najbliższym środowisku na negatywne skutki pól elektromagnetycznych.

Lublin jest jednym z niewielu miast, w którym istnieje infrastruktura sieci trolejbusowej. Pozwala to na prowadzenie badań natężenia pól elektrycznych i magnetycznych trolejbusów wykorzystywanych aktualnie w taborze Miejskiego Przedsiębiorstwa Komunikacyjnego (Solaris Trollino 12MB i Solaris Trollino 18). Pomiarów własnych pozwalają stwierdzić poziomy rzeczywiste emisji w trakcie pracy trolejbusów.

2. Badanie emisji elektromagnetycznej trolejbusów

Ze względu na ciągłą eksploatację trolejbusów oraz liczbę pomiarów, które zostały zaplanowane, badania musiały być rozdzielone na kilka dni. Pomiarów były wykonywane w weekendy, kiedy transport publiczny ma rzadsze rozkłady jazdy, a co za tym idzie, mniej pojazdów wyjeżdża na miasto oraz jest mniejszy

ruch na zajezdni trolejbusowej. Jest to idealny moment, aby przeprowadzić pomiary emisyjności elektromagnetycznej. W okresie kwietnia i maja 2021 roku prowadzone były pomiary zakłóceń elektromagnetycznych wysokich częstotliwości oraz pomiar składowej elektrycznej i magnetycznej pola elektromagnetycznego w zakresie niskich częstotliwości. Pomiary przeprowadzono pomiędzy 9–15. W tym czasie ruch na zajezdni był najmniejszy, czasami wręcz zerowy, aby rezultat pracy okazał się jak najbardziej wiarygodny. Warunki atmosferyczne, jakie panowały w trakcie pomiarów, odczytano z miernika znajdującego się na zajezdni. Całość pomiarów została przeprowadzona na zajezdni trolejbusowej znajdującej się przy ul. Antoniny Grygowej 56 w Lublinie. Badane pojazdy były ustawione w tym samym miejscu na zajezdni. Miejsce to musiało się znajdować odpowiednio daleko od innych trolejbusów, które akurat nie były badane, ale też musiało mieć dostęp do sieci trakcyjnej, aby móc przeprowadzić badania emisyjności podłączonego trolejbusu do sieci trakcyjnej.

2.1. Sprzęt pomiarowy

Do przeprowadzenia pomiarów konieczne było wykorzystanie różnych rodzajów urządzeń pomiarowych. Do pomiarów zakłóceń elektromagnetycznych wysokich częstotliwości użyto zestawu pomiarowego Rohde & Schwarz EB100, który pozwala na odbieranie sygnałów w szerokim zakresie częstotliwości, od 20 MHz do 1 GHz. Do odbiornika podłączona była antena logarytmiczno-periodyczna typu DAMZ-4. Antena INCO typ DAMZ-4 typu DLA jest anteną logarytmiczno-periodyczną służącą do pomiaru składowej elektrycznej natężenia pola. Jest to szerokopasmowa antena o prostej konstrukcji, niskiej masie i dobrej konstrukcji elektrycznej. Anteny logarytmiczno-periodyczne charakteryzują się tym, iż ich impedancje i charakterystyki promieniowania powtarzają się co okres wraz z ich logarytmem częstotliwości [1]. Pomiary wykonuje się z anteną ustawioną w polaryzacji poziomej, czyli równolegle ustawionej względem ziemi. Polaryzacja pionowa polega na ustawieniu anteny prostopadle względem ziemi.

Do pomiarów pól elektrycznych zastosowano miernik pól elektrycznych TRACER EF90, TRACER EF90 jest kompaktowym, przenośnym miernikiem do wykrywania i wykonywania pomiarów zmiennych pól elektrycznych. Zapewnia dokładny pomiar pól impulsowych i zmiennych wokół urządzeń elektrycznych i elektronicznych. Zawiera w sobie dwa przyrządy pomiarowe dzięki czemu możliwe jest wykonywanie pomiarów w dwóch zakresach częstotliwości VLF (ang. *Very Low Frequency*) i ELF (ang. *Extremely Low Frequency*). VLF to bardzo niskie częstotliwości (2–500 kHz), zaś ELF to ekstremalnie niskie częstotliwości. Zakres ten mieści się w przedziale 30–300 Hz [2]. Pola elektryczne są silnie zaburzane przez ciało człowieka,

w związku z tym konieczne jest korzystanie z wysięgnika EFE-10 dołączonego do zestawu.

Natomiast, do pomiarów pól magnetycznych zastosowano miernik TENMARS 192D. TENMARS 192D to trzyosiowy miernik pola magnetycznego w zakresie częstotliwości ekstremalnie niskich (ELF). Urządzenie mierzy składową natężenia promieniowania pola magnetycznego, które jest wytwarzane przez urządzenia elektryczne. Wewnątrz miernika znajdują się trzy prostopadle położone czujniki do testowania pól elektromagnetycznych [3]. Zastosowanie trzech czujników w takiej konfiguracji pozwala na wykonywanie pomiarów w dowolnej pozycji położenia miernika.

2.2. Badane obiekty

Tabor trolejbusowy w Lublinie jest bardzo szeroki. W skład taboru wchodzi klasyczne trolejbusy bez zasilania alternatywnego, trolejbusy z alternatywnym źródłem zasilania w postaci baterii oraz trolejbusy z alternatywnym źródłem zasilania w postaci agregatu prądowórczego, który zasila silnik elektryczny. Tabor zawiera trolejbusy różnych producentów, tj. Solaris czy Ursus. Liczba pojazdów i ich rodzajów zmusiły do skoncentrowania się na dwóch modelach trolejbusów. Wybrane zostały Solaris Trollino 12MB oraz Solaris Trollino 18. Te dwa modele trolejbusów są bardzo zbliżone do siebie pod względem budowy. Główną różnicą jest realizacja alternatywnego źródła zasilania. W przypadku Solarisa Trollino 12MB jest to agregat prądowórczy, a w Solaris Trollino 18 z wykorzystaniem baterii trakcyjnych. W związku z tym, budowę napędu trolejbusu przedstawię na podstawie Solarisa Trollino 12MB, a na podstawie Solarisa Trollino 18 opisane zostanie wyłącznie alternatywne źródło zasilania.

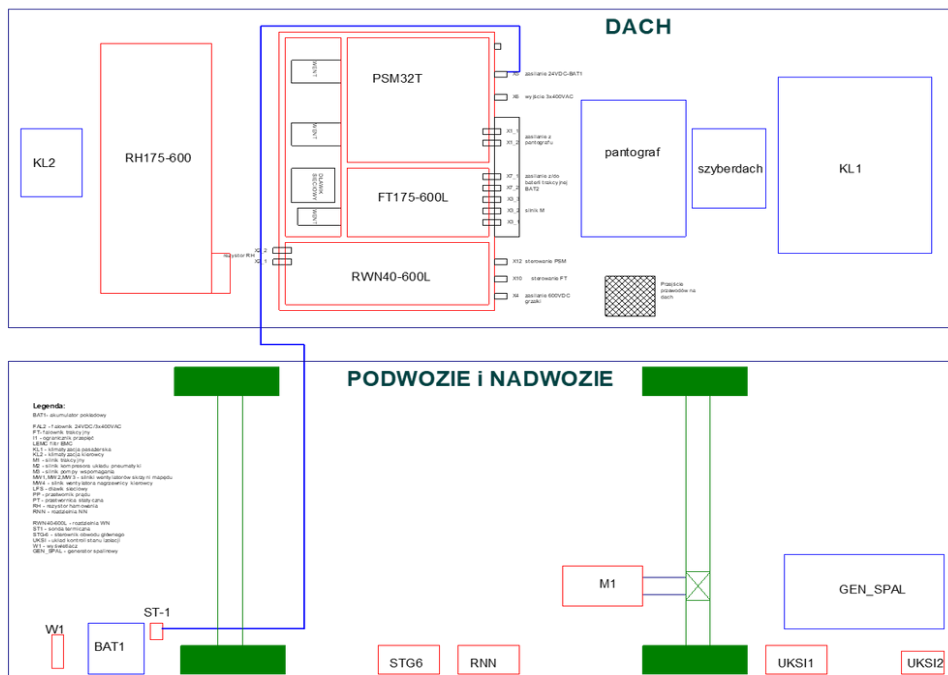


Rys. 1. Solaris Trollino 12MB

Solaris Trollino 12MB jest niskopodłogowym trolejbusem produkowanym w latach 2013–2014. Umożliwia transport 25 osób siedzących oraz 39 osób stojących. Trolejbus ma 12 m długości, 2,55 m szerokości i 3,45 m wysokości. Wyposażony jest w silnik asynchroniczny firmy EMIT ŻYCHLIN model STDA 280 6B-4 o mocy 175 kW. Silnik znajduje się bezpośrednio przed tylną, napędową osią, po lewej stronie patrząc od tyłu wozu. Podstawowym sposobem napędu Solarisa Trollino 12MB jest zasilanie z sieci trakcyjnej. Odbywa się to z wykorzystaniem technologii firmy MEDCOM, która dostarcza napęd do większości trolejbusów w Lublinie. W tym konkretnym modelu został zamontowany napęd FT175-600. Napęd składa się z przetwornicy statycznej PSM-32T, rozdzielni RWN 40-600_2012L, a także falownika trakcyjnego FT 175-600_2012L. Elementy te zostały umieszczone w skrzyni napędu na dachu przed pantografem. Skrzynia napędu podzielona jest na dwie części. W lewej komorze znajduje się falownik trakcyjny oraz rozdzielnica wysokiego napięcia, natomiast prawa komora przeznaczona jest dla przetwornicy PSM. Wymiary skrzyni (długość × szerokość × wysokość) 1,7 m × 2 m × 0,4 m. Masa całkowita skrzyni wynosi 790 kg. Pobór prądu z sieci jest realizowany za pomocą pantografu. Pantograf jest elementem składającym się z dwóch równoległe ułożonych pałaków połączonych z siecią. Kontakt z siecią jest zrealizowany z użyciem głowic, które umożliwiają swobodną zmianę kierunku jazdy trolejbusu.

Przetwornica PSM jest w zasadzie zbiorem przetwornic i falowników. Ma za zadanie zmienić napięcia do takich wartości, jakie są wymagane przez różne urządzenia znajdujące się w trolejbusie. Dzięki zastosowaniu tranzystorów IGBT, przetwornica wytwarza na wyjściu napięcie sinusoidalne o małej zawartości harmonicznych. Jest to bardzo korzystne zjawisko, ponieważ wpływa pozytywnie na straty mocy w silnikach. Napięciem wejściowym do przetwornicy PSM jest 600 VDC przychodzące bezpośrednio z sieci trakcyjnej. Napięcie wejściowe trafia na płytę HV, która zmienia napięcie na 650 VDC separowane. Następnie, napięcie 650 VDC rozdziela się na trzy płytki FAL, ZB i DC/DC. Falownik zmienia napięcie stałe na 3-fazowe napięcie 400 VAC o częstotliwości 50 Hz, które służy do zasilania dwóch silników elektrycznych M2, M3 oraz klimatyzacji KL1 $P = 16$ kW. M2 to silnik kompresora pneumatyki o mocy $P = 4$ kW, a M3 to silnik wspomaganie kierownicy o mocy $P = 2,2$ kW. Płyta ZB służy do przemiany napięcia 650 VDC na 24 VDC, ma zasilac odbiorniki 24 VDC i klimatyzacje KL2. Jeżeli sieć jest podłączona, to ma ładować akumulatory 24 V (2 akumulatory 12 V połączone szeregowo umieszczone we wnęce pod kabiną kierowcy). Natomiast jeżeli sieć nie jest załączona, to ma pobierać napięcie z akumulatorów i rozdzielać je na odbiorniki. Zaś przetwornica DC/DC, o której była mowa wyżej, ma za zadanie zmienić napięcie 400 VDC na 24 VDC separowane, służące do zasilenia wszystkich wymienionych wcześniej przetwornic i falownika. Przyjęty system sterowania

zapewnia stabilność częstotliwości oraz bardzo niski poziom zakłóceń elektromagnetycznych generowanych przez układ.

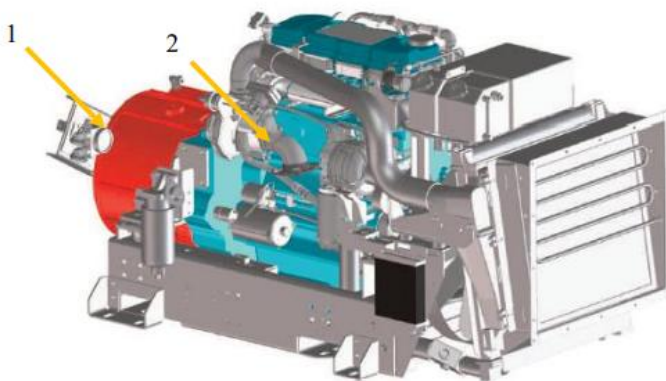


Rys. 2. Schemat rozmieszczenia elementów nadwozia Solarisa Trollino 12MB [4]

Rozdzielnia wysokiego napięcia RWN 40-600_2012L ma rozdysponować napięcia pomiędzy falownik FT175-600 i układ ogrzewania. Napięcie z sieci trakcyjnej 600 VDC lub generatora spalinowego przechodzi przez filtr EMC, który jest umieszczony przed falownikiem, aby ograniczyć wpływ prądów harmoniczných na wrażliwy układ falownika trakcyjnego. Filtry takie stosuje się dla zakłóceń sieciowych od 150 kHz do 30 MHz. Aby filtr spełniał swoje funkcje, obudowa musi być połączona z obudową falownika, natomiast filtr powinien mieć poprowadzony osobny przewód uziemiający. W rozdzielni zamontowany jest system wstępnego ładowania falownika (system *precharge*). System ten składa się z rezystora RWŁ i stycznika SWŁ, który zapewnia naładowanie kondensatora C1 z ograniczonym prądem. Gdy kondensator się naładuje, następuje załączenie stycznika SFT, po czym następuje zasilanie falownika prądem trakcyjnym. Zwarcie stycznika powoduje wyłączenie układu *precharge*. Zastosowanie układu wstępnego ładowania jest konieczne, gdy odbiornik ma charakter pojemnościowy. Ogranicza to wpływ prądu rozruchowego na inne elementy systemu.

System *precharge* ogranicza prąd rozruchowy poprzez powolne ładowanie kondensatorów wyjściowych. Zastosowanie takiego rozwiązania zapewnia dłuższą żywotność oraz większą bezawaryjność układu [5]. W RWN znajdują się również styczniki S1 i S2, które służą do zasilania obwodów ogrzewania trolejbusu.

Falownik FT175-600 ma na celu przekształcenie napięcia sieci 600 VDC na napięcie 3×430 VAC do zasilania silnika trakcyjnego M1, napięciem sterującym układem jest 24 VDC separowane. Falownik trakcyjny składa się z energo-elektronicznego nawrotnika sieci zbudowanego Q5 i Q6, trójfazowego mostka tranzystorowego Q1, Q2 i Q3, układu hamowania elektromagnetycznego Q4 i rezystora hamulcowego RH. Nadmiar energii kinetycznej wytwarzanej podczas hamowania oddawana jest do sieci za pomocą nawrotnika sieci. Jeżeli napięcie w sieci przekracza 780 VDC system ten nie zadziała. Włącza się wtedy stycznik Q4, który uaktywnia rezystor hamulcowy, przyjmujący nadmiar energii kinetycznej. Rezystor hamulcowy wykorzystywany jest również do szybkiego rozładowywania kondensatorów filtra sieciowego. Rezystor umieszczony jest poza skrzynią napędową MEDCOM. Umieszczony jest na dachu nad kabiną kierowcy.



Rys 3. Ilustracja agregatu prądotwórczego APU 100 DIPME [4]

Solaris Trollino 12MB poza klasycznym napędem trakcyjnym jest wyposażony w alternatywne źródło zasilania w postaci agregatu prądotwórczego APU 100 DIPME. Agregat prądotwórczy składa się z silnika spalinowego IVECO N40 ENT i generatora KIRSCH PME. Silnik N40 ENT o mocy $P = 118$ kW napędza generator o mocy $P = 100$ kW wytwarzając w ten sposób napięcie trójfazowe 540 VAC, które służy do zasilania silnika trakcyjnego M1, gdy trolejbus nie może być zasilany z sieci trakcyjnej. W związku z tym, że generator wytwarza prąd o mniejszej mocy niż w przypadku napędu z sieci, trolejbus napędzany alternatywnym źródłem energii przyspiesza wolniej oraz ma

niższą prędkość maksymalną. Na rysunku 3 przedstawiona została ilustracja agregatu prądotwórczego APU 100 DIPME. Numerem 1 został zaznaczony generator KIRSCH, a numerem 2 silnik spalinowy.

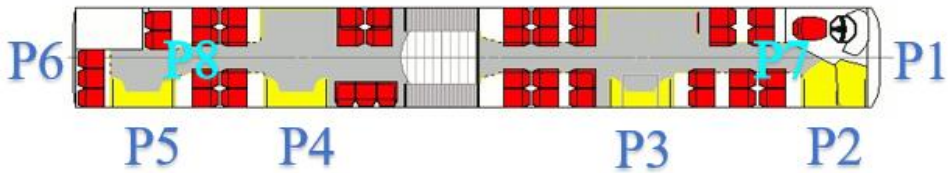
Baterie trakcyjne służą do magazynowania energii, gdy trolejbus nie będzie miał dostępu do sieci trakcyjnej. W Solarisie Trollino 18 zamontowano baterie litowo-jonowe BAT_A i BAT_B firmy WAMTECHNIK model WTPP620-689. Zastosowanie takich baterii gwarantuje dużą gęstość energii, małe samorozładowanie, długą żywotność pracy, zdolność do pracy w szerokim paśmie temperatur, szeroki zakres prądów rozładowań. Nadzór nad stanem naładowania baterii sprawuje system BMS. Zadaniem tego systemu jest ciągły pomiar napięć i prądów na poszczególnych ogniwach. W razie wykrycia jakiegось awarii rozłącza baterie.

3. Badanie promieniowania elektromagnetycznego w zakresie wysokich częstotliwości trolejbusów i sieci trakcyjnej

Pomiary promieniowania elektromagnetycznego wysokich częstotliwości zostały przeprowadzone dla dwóch modeli trolejbusów (Solaris Trollino 12MB i Solaris Trollino 18) oraz sieci trakcyjnej. Badanie zostało przeprowadzone z wykorzystaniem odbiornika ROHDE & SCHWARZ EB100 oraz anteny logarytmiczno-periodycznej firmy INCO oddalonej od obiektu na odległość 3 m i ustawionej na wysokości 1,5 m. Miejsce, w którym stał trolejbus podczas badań, musiało spełnić kilka warunków [6]:

- brak drzew, ścian, mostów, innych pojazdów w odległości min. 10m,
- antena powinna być umiejscowiona pomiędzy konstrukcjami wsporczymi sieci trakcyjnej,
- brak podstacji, izolatorów sekcyjnych, transformatorów i innych nieciągłości w sieci w odległości min. 500 m,
- unikanie sieci przesyłowych i stacji energetycznych,
- w trakcie pomiarów nie mógł być podłączony do sieci inny trolejbus w odległości 2 km.

W przypadku Solarisa Trollino 12MB pomiary zostały wykonane w 7 lokalizacjach: 5 na zewnątrz i 2 wewnątrz pojazdu. A w przypadku Solarisa Trollino 18, w 8 lokalizacjach: 6 na zewnątrz i 2 wewnątrz pojazdu. W każdym miejscu wykonano serię 27 odczytów dla częstotliwości od 20 MHz do 1 GHz. Dla częstotliwości od 20 MHz do 100 Mhz skok wynosił 10 MHz, a od 100 MHz do 1 GHz skok wzrósł do 50 MHz. Każdą serię wykonano dla dwóch położeń anteny. Antena była ustawiona w orientacji pionowej i poziomej, aby zbadać pełne spektrum zakłóceń.



Rys. 4. Schemat przedstawiający miejsca pomiarowe

W każdym miejscu pomiary były wykonywane dla 4 wariantów pracy trolejbusu.

1. Pomiar tła – trolejbus wyłączony.
2. Trolejbus ma załączone zasilanie pokładowe 24 V.
3. Alternatywne źródło zasilania (agregat/baterie) – trolejbus nie jest podłączony do sieci trakcyjnej.
4. Sieć trakcyjna – trolejbus podłączony i zasilany z sieci trakcyjnej.

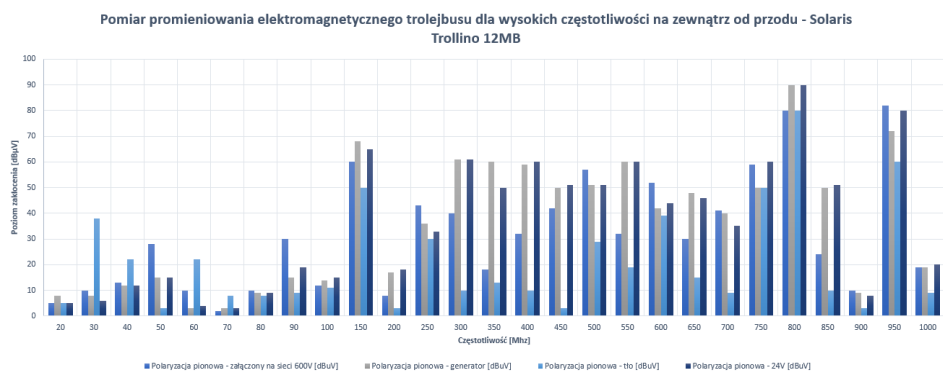


Rys. 5. Przykładowy pomiar emisji w polaryzacji pionowej

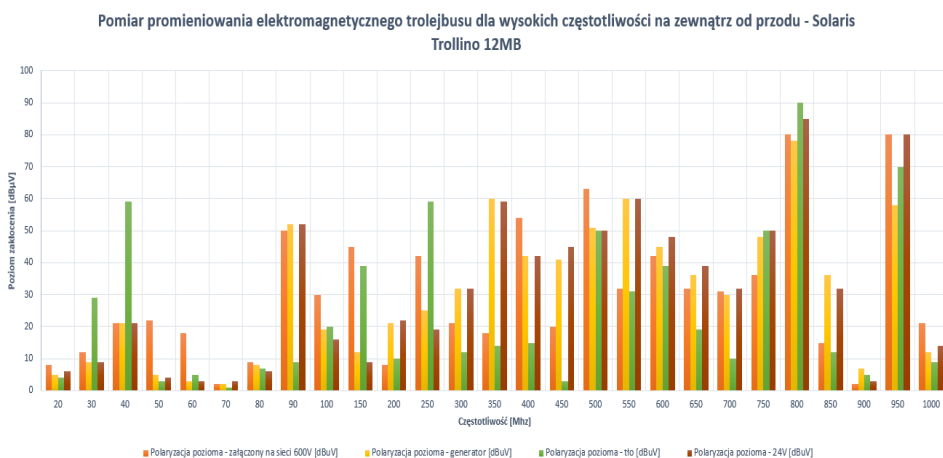
Po zrealizowaniu pomiarów należało przeprowadzić ich analizę. Pomiary były zrealizowane w szerokim zakresie częstotliwości od 30 MHz do 1 GHz. Należy zwrócić uwagę na to, że nie wszystkie zakłócenia w pomiarach są emitowane przez trolejbus. Głównymi źródłami zakłóceń mogą być: radiodyfuzja (80–108 MHz), radioastronomia (150 MHz), fale zakresu telefonii DECT (212 MHz), fale telewizji naziemnej DVBT (475–860 MHz), GSM (900 MHz) oraz SAT IF (950–2150 MHz). W związku z tym, przy analizie pomiarów częstotliwości te nie były brane pod uwagę.

Według normy EN 50121-3-1:2017, poziom dopuszczalny emisji elektromagnetycznej w przedziale częstotliwości 30 MHz – 1 GHz dla trolejbusów wynosi 50 dBuV [7]. Analiza otrzymanych danych nie wykazała żadnych rażących przekroczeń poziomów emisji pól elektromagnetycznych przez oba

rodzaje trolejbusów. Zdarzają się pojedyncze przekroczenia, jednak mogą to być inne źródła, ponieważ występują zarówno w przypadku badania tła, jak i przy uruchomionych pojazdach. W niektórych punktach widać, że w trakcie pomiaru tła poziom zakłócenia jest najwyższy. Dlatego można wysnuć wniosek, iż trolejbus może blokować zakłócenia niektórych częstotliwości. Jednak najważniejszą kwestią, która dotyczyła tych pomiarów to, czy trolejbusy spełniają normy zakłóceń dla wysokich częstotliwości oraz czy są bezpieczne dla pasażerów i kierowców. Według wykonanych pomiarów spełniają te normy, a co za tym idzie, są bezpieczne. Badanie sieci trakcyjnej pod względem zakłóceń wysokich częstotliwości również nie wykazało żadnych przekroczeń, w przypadku obciążenia sieci podłączonym w pobliżu trolejbusem oraz przy pomiarze tła bez podłączonego trolejbusu.



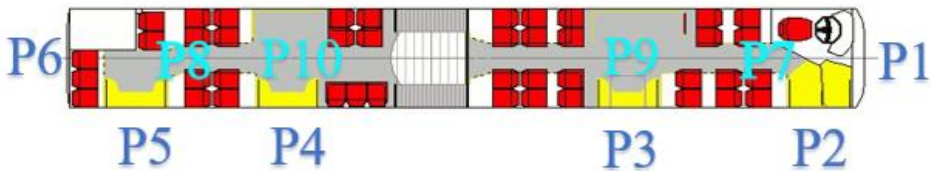
Rys. 6. Przykładowy wykres promieniowania elektromagnetycznego w polaryzacji pionowej



Rys. 7. Przykładowy wykres promieniowania elektromagnetycznego w polaryzacji poziomej

4. Badanie pola elektrycznego i magnetycznego w zakresie niskich częstotliwości trolejbusów i sieci trakcyjnej

Po przeprowadzeniu badania dla wysokich częstotliwości dodatkowej analizie poddano poziomy pól elektrycznych i magnetycznych dla częstotliwości ekstremalnie niskich ELF. W badaniu skupiono się na bardzo niskich częstotliwościach w zakresie między 30–300 Hz. W przypadku TRACER EF90 wynikiem jest składowa elektryczna E [V/m]. Jest to wartość, która jest podawana we wszystkich normach określających poziom pól elektrycznych. Urządzenie TENMARS TM192D podaje wyniki jako parametr indukcji magnetycznej B [μ T]. Natomiast, w normach poziomy pól magnetycznych podawane są jako natężenia pól magnetycznych H [mA/m]. Pomiary były wykonane w tych samych miejscach i na tych samych pojazdach, jak w przypadku wysokich częstotliwości. Jednak, w przypadku tych pomiarów w każdym miejscu został wykonany po jednym pomiarze dla pola elektrycznego i magnetycznego. W odróżnieniu do pomiarów promieniowania wysokich częstotliwości badanie nie obejmowało tylko statycznych pomiarów. Ze względu na niewielkie gabaryty urządzeń pomiarowych możliwe było wykonanie pomiarów wewnątrz trolejbusu przy każdych drzwiach w czasie hamowania i przyspieszania trolejbusu. Ponadto, zmierzono różnicę natężeń pól występujących w skrzyni napędowej MEDCOM w zależności, czy była zamknięta lub otwarta jej kłapa. W obu przypadkach wóz był uruchomiony na alternatywnym źródle zasilania (bateria lub agregat). Pomiar taki został wykonany, aby sprawdzić, jakie znaczenie dla zachowania kompatybilności elektromagnetycznej ma obudowa skrzyni.



Rys. 8. Miejsca pomiarowe pól elektrycznych i magnetycznych

Pomiary statyczne były wykonane dla 4 wariantów pracy trolejbusu.

1. Pomiar tła – trolejbus wyłączony,
2. Trolejbus ma załączone zasilanie pokładowe 24 V,
3. Alternatywne źródło zasilania (agregat/baterie) – trolejbus nie jest podłączony do sieci trakcyjnej,
4. Sieć trakcyjna – trolejbus podłączony i zasilany z sieci trakcyjnej.

Pomiary dynamiczne były wykonane dla 2 wariantów pracy trolejbusu.

1. Alternatywne źródło zasilania (agregat/baterie) – trolejbus nie jest podłączony do sieci trakcyjnej,
 - trolejbus przyspiesza – od 0 do ok. 20 km/h,
 - trolejbus hamuje – od 20 do 0 km/h.
2. Sieć trakcyjna – trolejbus podłączony i zasilany z sieci trakcyjnej,
 - trolejbus przyspiesza – od 0 do ok. 20 km/h,
 - trolejbus hamuje – od 20 do 0 km/h.



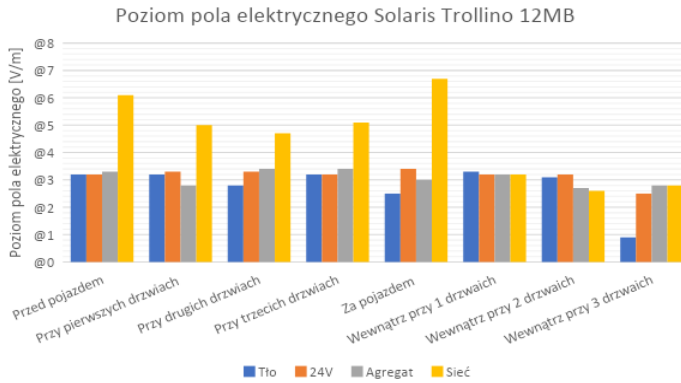
Rys. 9. Przykładowe pomiary pola elektrycznego i magnetycznego

Zagadnienie występowania składowej elektrycznej i magnetycznej pola elektromagnetycznego należy do bardzo ważnej problematyki, ponieważ trolejbusami codziennie poruszają się tysiące ludzi. Ważnym jest zatem, aby pasażerowie mogli podróżować bezpiecznie. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Zdrowia z dnia 17 grudnia 2019 r. dopuszczalnym poziomem składowej elektrycznej pola jest 1000 V/m, natomiast maksymalny dopuszczalny poziom składowej magnetycznej pola równa się $60 \text{ A/m} = 60000 \text{ mA/m}$. [8] Wraz z wejściem tego rozporządzenia limity pól elektromagnetycznych zostały podniesione. Przeprowadzone pomiary pozwalają wysnuć kilka ciekawych wniosków. Po pierwsze i najważniejsze: natężenia pól emitowane przez trolejbusy Trollino 12MB i Trollino 18 mieszczą się w normach i to z bardzo dużym zapasem. Maksymalne wartości zmierzone są na poziomie 6 V/m, a wartość dopuszczalna to 1000 V/m. Podobnie jest w przypadku natężenia pola magnetycznego maksymalna wartość zmierzona to 2500 mA/m a dopuszczalna jest 60000 mA/m. Zapas jest bardzo duży.

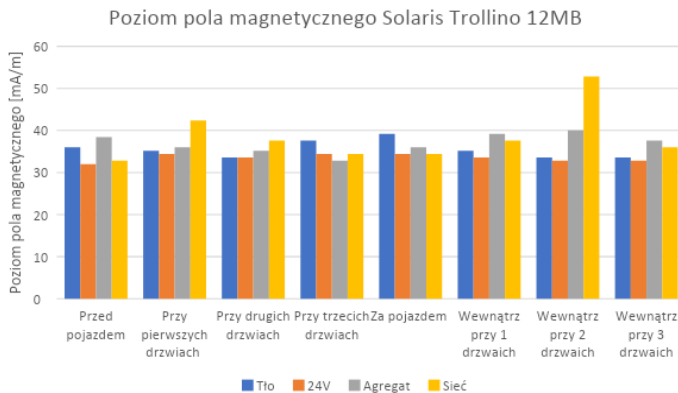
Po drugie: zauważalne jest, że poziom pola elektromagnetycznego zwiększa się, gdy trolejbus jest zasilany z sieci. Dodatkowo, większe poziomy pól występują wewnątrz w przedziale pasażerskim niż na zewnątrz w miejscach imitujących przystanek. W przypadku Trollino 12MB największe wartości wewnątrz odnotowano przy drugich drzwiach, natomiast w Trollino 18 przy trzecich drzwiach. Miejsca te są bezpośrednio pod skrzynią MEDCOM.

Po trzecie: obudowa skrzyni MEDCOM ma bardzo dobre właściwości blokujące wydobywania się pól elektrycznych i magnetycznych z jej wnętrza. Pomiary wykazały, że wartości pól elektrycznych i magnetycznych przy otwartej klapie skrzyni są w wyższe niż w przypadku zamkniętej skrzyni.

Ostatnim punktem badań był pomiar emisji sieci trakcyjnej przy obciążeniu podłączonym trolejbusem i bez obciążenia. Te pomiary również udowodniły, że wartości pól mieszczą się w normach i są bezpieczne.



Rys. 10. Przykładowy wykres poziomu pola elektrycznego



Rys. 11. Przykładowy wykres poziomu pola magnetycznego

5. Podsumowanie

Praca dotyczyła zbadania pól elektromagnetycznych, które są wytwarzane przez trolejbusy oraz pokładowe urządzenia elektryczne zamontowane wewnątrz. Przeprowadzone badania pozwoliły wysnuć następujące wnioski:

1. Natężenia pól emitowane przez Solaris Trollino 12MB i Solaris Trollino 18 mieszczą się w normach i to z dużym zapasem. Oznacza to, iż długie przebywanie w tym środowisku jest bezpieczne zarówno dla pasażerów, jak i kierowcy.
2. Zauważalne jest, iż największe poziomy zaburzeń elektro-magnetycznych występują w przedziale pasażerskim przy 2 drzwiach w przypadku Solaris Trollino 12MB i 3 drzwiach w przypadku Solarisa Trollino 18. Spowodowane jest to umiejscowieniem skrzyni napędów, która jest umieszczona na dachu nad wymienionymi wcześniej drzwiami. Wartości te jednak nie przekraczają norm.
3. Pomiar dodatkowy skrzyni napędu MEDCOM potwierdził, iż obudowa ma bardzo dobre właściwości ekranujące, ograniczające emisję zaburzeń elektromagnetycznych z jej wnętrza.
4. Sieć trakcyjna, która służy do zasilania trolejbusów również, nie emituje zaburzeń, jakie przekraczałyby normy.
5. Ze względu na ciągłą eksploatację oraz objętość założonych pomiarów możliwe było przeprowadzenie jednej tury pomiarów. Przeprowadzenie kolejnej tury pomiarów sprawiłoby, że byłyby pozbawione błędów pomiarowych, które mogły wystąpić w trakcie badań.

Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, iż podróżowanie miejską komunikacją zbiorową jest bezpieczne dla pasażerów, kierowców i pracowników warsztatu. Potwierdzone to zostało wynikami pomiarów, które zostały porównane z obowiązującymi normami.

Literatura

1. Szóstka J., *Fale i anteny*, WKŁ, Warszawa 2001.
2. *Instrukcja obsługi miernika TRACER EF90*.
3. *Instrukcja obsługi miernika TENMARS 192D*.
4. *Dokumentacja dopuszczenia pojazdów*, MPK, 2021.
5. Munari B., Schneer A., *How to design precharge circuit for hybrid and electric vehicle applications*, <https://www.sensata.com/white-paper-how-design-precharge-circuit-hybrid-and-electric-vehicle-applications>, dostęp 15.02.2022.
6. Patoka M., *The measurements of the chopper supplied tram electromagnetic field*, Konferencja Transcom, Żylna 2011.

7. Norma EN 50121-3-1:2017 *Zastosowania kolejowe – Kompatybilność elektromagnetyczna. Część 3.1: Tabor – Pociąg i kompletny pojazd.*
8. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 17 grudnia 2019 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku, (Dz.U. 2019. poz. 2448.)

Dominik WOŹNIAK

Politechnika Lubelska, Koło Naukowe Elektroekologów ELMECOL

WYKORZYSTANIE ARDUINO W BUDOWIE APARATURY MEDYCZNEJ – PROJEKT STANOWISKA Z PULSOKSYMETREM

1. Wstęp

Obecna sytuacja pandemiczna na świecie wzmocniła globalną świadomość odnośnie ludzkiego zdrowia. Ludzie zaczęli bardziej dbać o swoje zdrowie oraz starają się monitorować jego stan poprzez regularne badania. Dzięki postępowi technologicznemu możliwym stało się monitorowanie stanu pacjenta w czasie rzeczywistym poprzez urządzenia elektryczne bez udziału lekarza. Coraz większą rolę zaczynają odgrywać proste i przenośne sprzęty medyczne, które dostarczają informacji na temat parametrów organizmu. Regularne badanie parametrów organizmu takimi urządzeniami daje możliwość wczesnego reagowania przy ich nagłych zmianach poprzez wizytę u lekarza lub szpitalu. Niestety, nie wszystkie tego typu sprzęty medyczne o odpowiedniej jakości są dostępne dla wszystkich ze względu na wysoką cenę. Jako alternatywę można potraktować możliwość zbudowania takiego urządzenia na własną rękę.

Na rynku obecnych jest kilka platform mikrokontrolerów, na postawie których można zbudować własne funkcjonalne urządzenie medyczne. Jednym z urządzeń możliwym do zbudowania i aktualnie bardzo popularnym jest pulsoksymetr, czyli urządzenie pozwalające na pomiar saturacji krwi, której to poziom przy obecnej pandemii COVID-19 można uznać za wyznaczniki poziomu zdrowia w przypadku zarażenia. W niniejszym artykule omówiona została budowa i działanie prostego pulsoksymetru bazując na platformie Arduino.

2. Istota funkcjonowania pulsoksymetru

Aby zrozumieć to, jak funkcjonuje pulsoksymetr, należy rozdzielić jego prace na dwie kwestie. Pierwsza z nich dotyczy, tego co tak naprawdę mierzy pulsoksymetr i ta kwestia ma podłoże biologiczne odnoszące się do pracy naszego organizmu. Drugą zaś jest sposób, w jaki jest dokonywany pomiar, jak zarejestrowany został biologiczny parametr i jak możliwe było jego przetworzenie na mierzalną wartość.

2.1. PODSTAWA BIOLOGICZNA

Saturacja, która mierzona jest w pomiarze puls oksymetrem, według najpopularniejszej definicji określa jest miarą wysycenia tlenu we krwi i określana jest w wartości procentowej. Zagłębiając się w szczegóły należy dopowiedzieć, że tlen znajdujący się we krwi tak naprawdę związany jest z hemoglobina, która transportuje go po całym organizmie. Ta hemoglobina zawiera w sobie heme, która zawiera w swojej budowie żelazo i to pozwala jej na wiązanie do siebie tlenu. Wszystkie cząstki hemoglobiny mogą przenosić do 4 cząsteczek tlenu. Jeżeli zajętych jest wszystkie 4 miejsca, oznacza to, że hemoglobina jest nasycona. Więc tak naprawdę wartością saturacji jest to, ile cząsteczek tlenu w danej chwili czasu jest przyłączona do cząsteczek hemoglobiny. Choć wyróżniane jest wiele rodzajów hemoglobiny, w przypadku pomiaru pulsoksymetrem następuje rozdzielenie na tą nasyconą i nienasyconą. Za normę saturacji u zdrowej dorosłej osoby uznawana jest wartość w przedziale 95% do 99% [1]. Jeżeli wartość saturacji znajduje się poniżej tego przedziału, może to oznaczać trwającą chorobę lub nadchodzące gwałtowne zmiany w organizmie. Jeżeli wartości tlenu zaczęłyby spadać w nagły sposób o duże wartości, to jego braki doprowadziłyby do nieodwracalnych uszkodzeń tkanki komórkowej organów, takich jak serce czy kora mózgowa, które są najważniejsze w naszych organizmach [2].

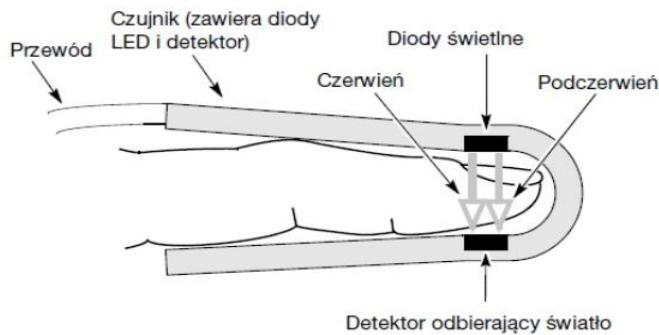
2.2. Podstawa fizyczna

Pomiar, którego dokonuje pulsoksymetr jest tak naprawdę pomiarem tego, jak hemoglobina absorbuje światło o konkretnej długości fali. Ponieważ wszystkie znane substancje wykazują w pewnym stopniu absorpcję fal elektromagnetycznych w sposób selektywny, to mając dwa rodzaje hemoglobiny należało odnaleźć tylko fale o odpowiedniej długości. Najlepszymi falami, ze względu na współczynnik absorpcji oraz dobrą penetrację tkanek, okazały się fale światła czerwonego i bliskiej podczerwieni [3]. Jeżeli hemoglobina jest utleniona, to pochłania ona światło podczerwone o długości 940 nm, a w przypadku hemoglobiny nieutlenionej, jest to światło czerwone o długości fali 660 nm [4]. Fale, które nie zostały wchłonięte, są rejestrowane przez pulsoksymetr i zliczane jako transmitancja. Następnie, na podstawie tego, jak zostały pochłonięte zostaje obliczona saturacja, całość można przedstawić w postaci poniższego wzoru:

$$SaO_2 = \frac{\textit{oksyHb}}{\textit{oksyHb} + \textit{deoksyHb}} \times 100\%, \quad (1)$$

gdzie: SaO_2 – saturacja krwi tętniczej, \textit{oksyHb} – utleniona hemoglobina, $\textit{deoksyHb}$ – nieutleniona hemoglobina.

Należy wziąć pod uwagę to, że w nieutlenionej hemoglobinie również zawiera się hemoglobina ze związanym tlenkiem węgla, utleniona hemoglobina powstała z nieodwracalnych reakcji przyłączania tlenu oraz niefunkcjonalna hemoglobina. Te rodzaje nie są brane pod uwagę podczas obliczeń, ponieważ pulsoksymetry wykorzystywane zazwyczaj do badań są urządzeniami prostymi oraz nieinwazyjnymi i nie są w stanie dokonywać pomiaru tak dokładnych parametrów [5]. Głównymi miejscami pomiaru pulsoksymetrów jest palec, nos, czoło oraz płatek uszny ze względu na to, że skóra w tych miejscach ma znacznie większą gęstość naczyniową niż w reszcie ciała [4]. Proces pomiaru polega na wygenerowaniu promieniowania przez dwie diody światłne. Fale, które przeszły np. przez palec, docierają do detektora po drugiej stronie, po czym wynik absorpcji analizowany jest przez układ obliczeniowy pulsoksymetru. Całość procesu pomiaru została przedstawiona na schemacie na rysunku 1.



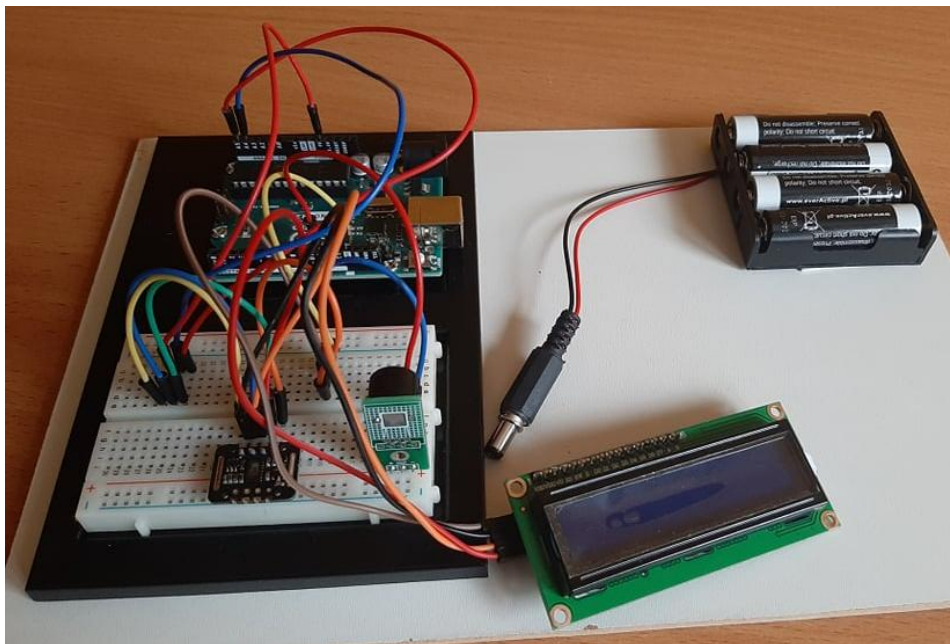
Rys. 1. Schemat działania pulsoksymetru napalcowego [6]

Proste pulsoksymetry zazwyczaj wykonują do kilkuset pomiarów na sekundę, a następnie określają średnią w odstępach kilkusekundowych i ją wyświetlają. Oprócz pomiaru saturacji wykonują też pomiar tętna wraz z wykreśleniem jego krzywej. Prawidłowe wartości saturacji oscylują w przedziale 92–98%, a granica błędów pomiarowych wynosi ok. 2% [6].

3. Projekt pulsoksymetru

Projekt z założenia ma w późniejszym czasie pełnić funkcje dydaktyczną, więc przyjęta konstrukcja różni się od standardowych rozwiązań w komercyjnych pulsoksymetrach. Naturalnym wyborem podczas projektowania był wybór mikrokontrolera jako jednostki sterującej, aby projekt był jak najwierniejszym odwzorowaniem oryginałów. Schemat wykonanego projektu

został przedstawiony na rysunku 2. Poniżej zostaną krótko omówione poszczególne elementy oraz całość wykonanego projektu.



Rys. 1. Schemat zbudowanego projektu pulsoksymetru

3.1. Platforma oraz płytki bazowa

Wśród najpopularniejszych platform mikrokontrolerów można wyróżnić dwie najbardziej popularne, jedną z nich jest Raspberry Pi, a drugą Arduino. Do wykonania projektu została wybrana platforma Arduino, ponieważ jej komponenty posiadają mniejsze gabaryty oraz sama platforma posiada mniejsze skomplikowanie budowania układów wykonujących proste zadania jak pomiar saturacji. Platforma Arduino posiada szeroki wybór płytek sterujących, każda wyspecjalizowana do innego rodzaju zadań. Najbardziej optymalnym wyborem do wykonania pulsoksymetru wydałaby się płytka Arduino Nano, ponieważ przystosowana jest do budowania urządzeń przenośnych, które zajmują małą powierzchnię. Ze względu na to, że projekt miał funkcjonować jako stacjonarna stacja pomiarowa, której działanie może być analizowane do projektu, wybrana została płytka Arduino Uno. Ta płytka, choć posiada większe wymiary, uznawana jest za płytkę uniwersalną, w swojej budowie posiada cyfrowe i analogowe piny wejścia/wyjścia, piny zasilania uziemienia i resetowania oraz port wejścia USB [7].

3.2. Wykorzystane czujniki, podzespoły

Do prawidłowego pomiaru saturacji, jest odpowiedni czujnik, na rynku obecne są dwa czujniki, występujące pod nazwą MAX30100 oraz MAX30102. Do projektu wstępnie zostały wybrane oba czujniki, ale podczas fazy budowania projektu okazało się, że czujnik MAX30100 posiada wadę projektową. Wada dotyczy tego, że dwa piny wykorzystywane w projekcie podłączone są przez rezystory 4,7 k Ω do 1,8 V. Wada ta oznacza, że czujnik nie współpracuje z mikrokontrolerami o wyższych poziomach logicznych. Płytki Arduino Uno wykrywają minimalne wysokie napięcie równe 2 V, więc niemożliwa była współpraca płytki z czujnikiem bez ingerencji w strukturę płytki za pomocą precyzyjnych narzędzi lutowniczych. Z powodu braku odpowiedniego sprzętu, czujnik MAX30100 został odrzucony i wykorzystano tylko MAX30102 (rys. 3). Czujnik zakupiony do projektu posiada w swojej budowie układy elektroniczne niwelujące wpływ światła zewnętrznego na pomiar, przystosowany jest do urządzeń zarówno mobilnych, jak i stacjonarnych. Oprócz tego, posiada dosyć dobrą odporność na zakłócenia pomiaru podczas ruchu, niski pobór prądu podczas pomiaru od zakres temperaturowy w przedziale od – 40 do 85 °C [8].



Rys. 3. Moduł MAX30102 wykorzystany w projekcie [8]

Do pozostałych wykorzystanych komponentów zalicza się wyświetlacz, zasilanie oraz brzęczyk. Wykorzystanym wyświetlaczem jest wyświetlacz typu LCD 16x2 ze względu na dobrą integralność oraz łatwą w obsłudze bibliotekę. Niestety, nie umożliwia wykreślenia krzywych oraz animacji. Aby wykreślać krzywą tętna, należałoby wykorzystać wyświetlacz typu OLED. Nie został on użyty w projekcie ze względu na to, że wyświetlacze OLED o dużych rozmiarach posiadają stosunkowo wysoką cenę, która wykraczała poza budżet projektu. Wyświetlacz OLED o małych rozmiarach mógłby zostać wykorzystany w przypadku projektu pulsoksymetru napalcowego, lecz nie do stacji pomiarowej, ponieważ zastosowanie go odbiłoby się na czytelności pomiarów. Ze względu na to, że projekt jest stacją pomiarową, która miała zachować cechę mobilności najbardziej optymalnym zasilaniem jest zasilanie bateryjne lub przy pomocy małego akumulatora. Do projektu zastosowany został

koszyk na baterie mieszczący 4 baterie typu AAA z budową półotwartą, pozwalającą na łatwą wymianę baterii. W swojej obudowie nie posiada przycisku włączania/wyłączania, więc zasilanie należy odpinąć i podpinąć ręcznie do układu do zewnętrznego złącza zasilania. Ostatnim elementem jest brzęczyk, który pełni bardziej funkcje kosmetyczną. Został zaprogramowany w ten sposób, aby przy prawidłowym pomiarze wydawać charakterystyczny dźwięk podobny do dźwięku wydawanego przez szpitalny monitor pacjenta. Jeżeli pomiar został wykonany w sposób nieprawidłowy i dane pomiarowe nie mogą zostać wyświetlone, to również zostaje wydany ostry, krótki dźwięk.

3.3. Środowisko programistyczne

Platforma Arduino wykorzystuje dedykowany język programowania, który bazuje na języku C++. Programowanie odbywa się w środowisku IDE. Kod zbudowany do obsługi pulsoksymetru składa się z programu głównego oraz kilku podprogramów, które zajmują się wyliczaniem wartości saturacji i tętna, wykrywaniem czujnika i wyświetlaniem wyników pomiarów. Oprócz podprogramów do obsługi urządzenia, wykorzystano gotową bibliotekę obsługującą czujnik MAX30102. Pozwala ona między innymi na regulowanie parametrów czujnika, takich jak jasność diody LED, częstotliwość próbkowania oraz zakres pomiarowy. Ponadto, dodana została biblioteka obsługująca wyświetlacz LCD.

4. Analiza działania projektu

Wykonany pulsoksymetr został zaprojektowany, by wykonywać nieprzerwane pomiary, dopóki układ jest podłączony do zasilania. Jeżeli czujnik nie będzie w stanie zebrać prawidłowych pomiarów, zostanie wyświetlony odpowiedni komunikat „Błędne wartości”. Ważne przy korzystaniu z układu jest to, że układ wyświetla średnią z pomiarów sprzed sekundy. Dlatego dobrze jest utrzymać palec nad czujnikiem przez chwilę i jeżeli układ dalej nie będzie poprawnie mierzył wartości, dopiero wtedy zmienić jego umiejscowienie. Aby przetestować działanie układu wykonano serię 10 pomiarów na 3 osobach. Wykonana została także seria pomiarów, z jednoczesnym pomiarem pulsoksymetrem komercyjnym, w celu kalibracji i obliczenia błędu pomiarowego.

4.1. Testy działania urządzenia

W tabeli 1 zostały zaprezentowane 3 serie po 10 pomiarów wykonane na osobach w różnym wieku i o różnej płci. Po przeanalizowaniu uzyskanych wyników można zauważyć, że niektóre z pomiarów znacznie przekraczają

zakresy adekwatne dla osoby zdrowej, czyli dla pomiaru tętna jest to zakres od 60 do 100 uderzeń na minutę, a dla saturacji pomiędzy 90% a 100%. Wyniki, które znajdują się poza tymi przedziałami, należy określić jako błędy grube. Zauważyć można, że większość błędów występuje w pomiarach tętna. Możliwych źródeł błędów jest wiele, ale jako główne można wyróżnić następujące z nich:

- niepoprawne ułożenie palca nad czujnikiem,
- zanieczyszczona powierzchnia skóry palca,
- zbyt gruba skóra,
- naturalnie występujące drobne ruchy palcem,
- błędy wynikające z budowy czujnika.

Tabela 1. Wyniki testowych serii pomiarowych

Pomiar	Test projektu					
	Seria pomiarowa nr 1		Seria pomiarowa nr 2		Seria pomiarowa nr 3	
	Tętno	Saturacja	Tętno	Saturacja	Tętno	Saturacja
	[bpm]	[%]	[bpm]	[%]	[bpm]	[%]
1	125	99	88	99	93	98
2	136	99	100	97	136	98
3	136	100	125	88	75	98
4	83	99	107	93	136	98
5	115	100	100	95	115	98
6	75	93	107	96	107	100
7	93	100	76	93	115	98
8	125	94	71	93	93	99
9	115	100	136	77	107	97
10	150	85	125	94	83	97

4.2. Porównanie z rozwiązaniem komercyjnym

Po przetestowaniu projektu, porównano uzyskane wyniki z pulsoksymetrem komercyjnym o nazwie Finger Clip Pulse produkowanym przez Shenzhen Jiangnan Medical Technology. Pomiarzy były dokonywane jednocześnie, jeden pulsoksymetr znajdował się na palcu jednej dłoni, a drugi na palcu drugiej. Aby pomiary były miarodajne, biorąc pod uwagę wyniki uzyskane podczas testu, do porównania brane były tylko wyniki znajdujące się w zakresie normy i zbliżone do wyników uzyskiwanych na pulsoksymetrze komercyjnym. Podczas badania zostało wykonane, tak jak w przypadku pomiarów testowych, po 10 pomiarów na tych samych osobach. W tabelach 2 i 3 zestawiono oddzielnie pomiary saturacji oraz tętna.

Po eliminacji pomiarów będących błędami grubymi, można zauważyć więcej zbieżności pomiędzy pomiarami obu pulsoksymetrów. Analizując pomiary

saturacji można również zauważyć, że w serii pomiarowej nr 3 duże wahania pomiędzy wartościami tętna. Mogą one występować w przypadku różnych chorób układu krwionośnego. W przypadku badanej osoby, tą chorobą jest nadciśnienie.

Tabela 2. Pomiar porównawczy saturacji

Pomiar	Pomiar saturacji					
	Seria pomiarowa nr 1		Seria pomiarowa nr 2		Seria pomiarowa nr 3	
	Pulsoksymetr					
	Projektowy	Komercyjny	Projektowy	Komercyjny	Projektowy	Komercyjny
	Saturacja(SP02)					
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	97	99	97	97	98	96
2	95	94	97	97	96	96
3	98	99	98	96	100	96
4	98	99	100	96	97	94
5	99	99	94	96	99	94
6	95	99	95	92	99	96
7	100	99	93	93	100	95
8	99	99	99	94	100	94
9	96	98	96	96	99	94
10	100	99	96	93	99	94

Tabela 3. Pomiar porównawczy tętna

Pomiar	Pomiar tętna					
	Seria pomiarowa nr 1		Seria pomiarowa nr 2		Seria pomiarowa nr 3	
	Pulsoksymetr					
	Projektowy	Komercyjny	Projektowy	Komercyjny	Projektowy	Komercyjny
	Tętno(HR)					
	[bpm]	[bpm]	[bpm]	[bpm]	[bpm]	[bpm]
1	75	67	93	89	76	72
2	60	65	88	89	71	79
3	75	70	80	86	71	88
4	75	72	93	82	88	95
5	71	73	75	80	75	91
6	60	65	75	80	88	82
7	78	68	75	80	75	84
8	71	70	75	83	100	91
9	75	75	88	86	100	92
10	60	66	88	89	100	91

4.3. Błąd pomiarowy

W wykonanych seriach pomiarowych pulsoksymetr komercyjny został potraktowany jako wzorcowy, choć sam oczywiście obciążony jest pewnym błędem. Dla saturacji wynosi on 2% w przedziale 70–100% oraz dla pulsu 2 bpm w przedziale 30–250 bpm. Do obliczania błędu pomiarowego pulsoksymetru projektowego wykorzystano podstawowe operacje matematyczne, takie jak:

- średnia z pomiarów,
- błąd względny,
- błąd bezwzględny.

Po obliczeniu błędów dla pomiaru saturacji udało się uzyskać błąd znajdujący się w przedziale 0,71–4,0% w przedziale pomiarowym 90–100%. Błędy uzyskane dla pomiaru tętna znajdują się w przedziale 1,30–2,43% dla przedziału pomiarowego 60–100 bpm. Uzyskane wartości błędów są akceptowalne w porównaniu do tych występujących w pulsoksymetrze komercyjnym.

5. Podsumowanie

Obecnie, zminiaturyzowane urządzenia odnajdują coraz częstsze zastosowanie w życiu codziennym. Naturalnym jest, że dążymy do jak najmniejszych wymiarów urządzeń, ponieważ łatwiej stają się ogólnodostępne. Choć dawniej pulsoksymetry były urządzeniem stosowanym przez służby medyczne, to w obecnych czasach są już rutynowym narzędziem w domach, tak jak termometry. Posiadanie własnych urządzeń mierzących parametry biologiczne pozwala na łatwiejszą i szybszą diagnozę w przypadku aberracji zdrowotnych. Stosowanie coraz to nowszych urządzeń diagnostycznych zwiększa globalną świadomość w tematyce zdrowia, a także samoczynnie napędza tę gałąź przemysłu.

Wykonany projekt miał na celu udowodnić prostotę budowy takiego urządzenia diagnostycznego. Zbudowanie pulsoksymetru nie wymaga wiedzy specjalistycznej, bo wiele rozwiązań jest oferowanych już gotowych do kolejnych etapów budowy. Pulsoksymetr zbudowany na Arduino, dzięki wszechstronności tej platformy, wciąż jest otwarty na edycje. Wprowadzając kilka dodatkowych rozwiązań, można przekształcić takie urządzenie w pełnosprawny monitor pacjenta. Jedynym mankamentem projektu jest czujnik wykonujący pomiary. Jak wykazały przeprowadzone badania, niektóre z jego pomiarów obciążone są błędami grubymi. Możliwe, że stosując lepszy czujnik, błędy tego typu mogłyby zostać wyeliminowane. Jednakże, taki pulsoksymetr jak najbardziej może spełniać funkcje edukacyjną, ucząc o tym, jak działają urządzenia tego typu i jak ważną funkcję spełniają.

Literatura

1. Betts J., Young K., Wise J., Johnson E., Poe B., Kruse D., Korol O., Johnson J., Womble M., DeSaix P., *Anatomy and Physiology*, OpenStax, Texas 2017.
2. Webster J., *Design of Pulse Oximeters*, IOP Publishing Ltd, Wisconsin-Madison 1997.
3. Chan E., Chan M., Chan M., *Pulse oximetry: Understanding its basic principles facilitates appreciation of its limitations*, *Respiratory Medicine* Nr 107(6)/2013, s. 789–799.
4. Urone P., Hinrichs R., *College Physics*, OpenStax, Sacramento, New York 2012.
5. *Materiał dla studentów – Pulsoksymetria*, Uniwersytet Medyczny im. Karola Marciniowskiego, Katedra Biofizyki, <https://biofizyka.ump.edu.pl/rpowm> dostęp 10.03.2022.
6. *Pulsoksymetria w praktyce ratownika medycznego*, <http://paramedicpoland.blogspot.com/2016/06/pulsoksymetria-w-praktyce-ratownika.html>, dostęp 14.03.2022.
7. *Arduino Uno vs NANO: Which Board Is Better?*, <https://chipwired.com/arduino-uno-vs-nano-which-board-is-better/?fbclid=IwAR16jDippncbd7-PPxOIEeRIoicOpNYhoF0t6lDuo7asMGu6utJsctVFz24>, dostęp 14.03.2022.
8. *Internetowy sklep Elty*, <https://elty.pl/pl/p/MAX30102-czujnik-pulsu-oraz-natlenienia-krwi-/2597>, dostęp 21.03.2022.

ANALIZA WYBRANYCH UKŁADÓW PRZETWÓRNIC DC-DC

1. Wstęp

Układy DC-DC można spotkać w wielu rozwiązaniach, zarówno w nowoczesnych, jak i już przestarzałych układach elektronicznych. Mogą one występować w pojedynczym układzie scalonym, do którego podłączone są cewki, diody i kondensatory w odpowiedniej topologii oraz w bardziej złożonych elementach z oddzielnymi kontrolerem i tranzystorem kluczującym, mogącymi być sprzężonymi z cewkami oraz odseparowanymi z wejściem i wyjściem. Dla różnych potrzeb występują odpowiednie topologie i rozwiązanie. W tym artykule zaprezentowano ogólną analizę działania dwóch układów, które mogą podwyższać (ang. *step up, boost*) albo obniżyć napięcie wyjściowe (ang. *step down, buck*), w zależności od napięcia wejściowego, lub dawać stałe napięcie wyjściowe niezależnie od wartości napięcia wejściowego (ang. *step up-step down, buck-boost, sepic*).

1.1. Podstawowe pojęcia do analizy układów

W układach przełączających się tysiące razy na sekundę, ważne jest określenie rozkładu napięć i rozptywu prądów w każdym momencie trwania sygnału. Do tego stosuje się równania wyznaczające napięcia cewek i prądy kondensatorów dla jednego cyklu działania układu:

$$0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_L(t) dt \quad (1)$$

$$0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_C(t) dt, \quad (2)$$

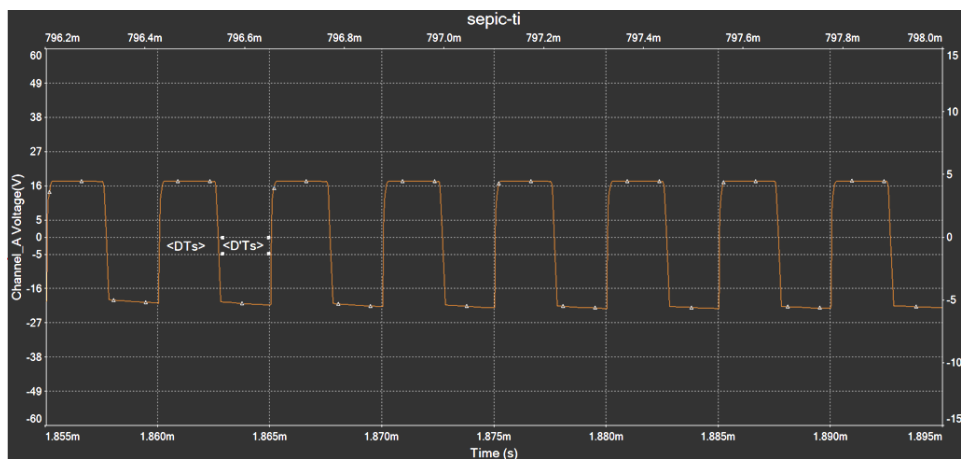
gdzie $v_L(t)$ jest wartością napięcia na zaciskach cewki, $i_C(t)$ jest wartością prądu przepływającego przez kondensator, T_s jest okresem.

Ponieważ prąd induktora sieci wynosi zero, powierzchnia pod napięciem i czasem induktora wynosi zero. Nazywa się to *induktor volt-sec balance* dla jednego cyklu napięcia w odniesieniu do czasu w stanie ustalonym. Średni prąd kondensatora wynosi zero dla całego cyklu z powodu bilansu ładowania kondensatora (ang. *Capacitor charge balance*).

Po całkowaniu tych wzorów otrzymuje się różnicę: $v_L(T_s) - v_L(0)$ lub $i_C(T_s) - i_C(0)$, która jest równa 0. Te dwie wartości w wyniku całkowania

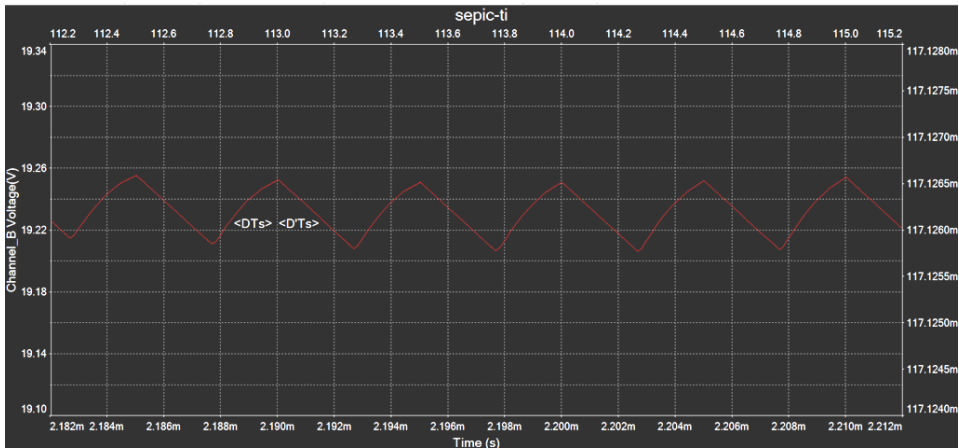
określają wartość napięcia lub prądu w jednej z dwóch części półokresu. Biorąc pod uwagę wzory 1 i 2, da się określić, w jaki sposób można zmienić napięcia wyjściowe. W każdym półokresie zmienia się układ i razem z nim napięcia i prądy. Zmianę układu przeprowadza się za pomocą kluczującego tranzystora, który ciągle się otwiera i zamyka. Poprzez zmianę czasów otwarcia i zamknięcia tranzystora jest prowadzona zmiana napięcia wyjściowego. Takie działanie nazywa się współczynnikiem wypełniania, a sygnał podawany na bramkę tranzystora jest sygnałem PWM (ang. *Pulse-Width Modulation*).

Przykładowy przebieg napięcia na cewce przedstawiono na rysunku 1. Jest to przebieg na cewce L1 przetwornicy SEPIC. Przy współczynniku wypełnienia $D = 0,5$, napięcia w każdym z półokresów są sobie równe. Natomiast, jeśli zwiększyć D do wartości 0,6, to czas drugiego półokresu będzie mniejszy oraz samo napięcie osiągnie jeszcze mniejszą wartość.



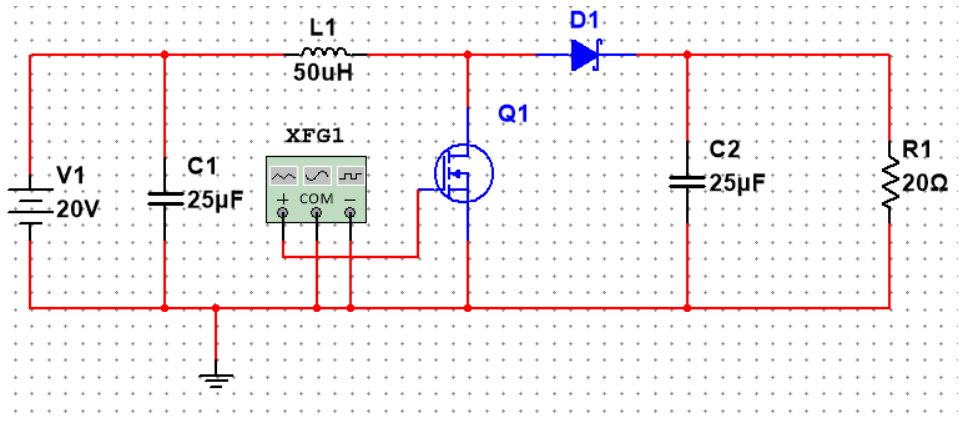
Rys. 1. Przebieg napięcia na cewce w stanie ustalonym przy $D = 0,5$

Inaczej jest z napięciem wyjściowym, które jest też brane do analizy, ponieważ obciążenie jest podłączone równolegle z kondensatorem. Napięcie, które zgodnie z prawem komutacji nie może się zmieniać skokowo, ma kształt składowej stałej z tętnieniem o kształcie trójkątnym. Przykładowy przebieg przedstawiono na rysunku 2, dla tego samego układu przetwornicy, co w poprzednim przykładzie. Pomimo tego, przebiegi mają niewielką składową sinusoidalną, której przyczyny pojawienia nie będą omawiane w tym artykule, natomiast można się o nich dowiedzieć więcej z pracy [1]. Takie przebiegi można obserwować na napięciach kondensatorów i prądach dławików. Tętnienia zależą od wartości pojemności i indukcyjności oraz częstotliwości sygnału sterowania. Zalecane wartości tętnienia w [%] od napięcia wyjściowego lub prądu cewki różnią się w zależności od źródeł. W pracy [1] jest to około 10%, natomiast na stronie firmy Texas Instruments są to wartości od 20% do 40%.

Rys. 2. Przebieg napięcia wyjściowego w stanie ustalonym przy $D = 0,5$

2. Analiza działania przetwornicy podwyższającej

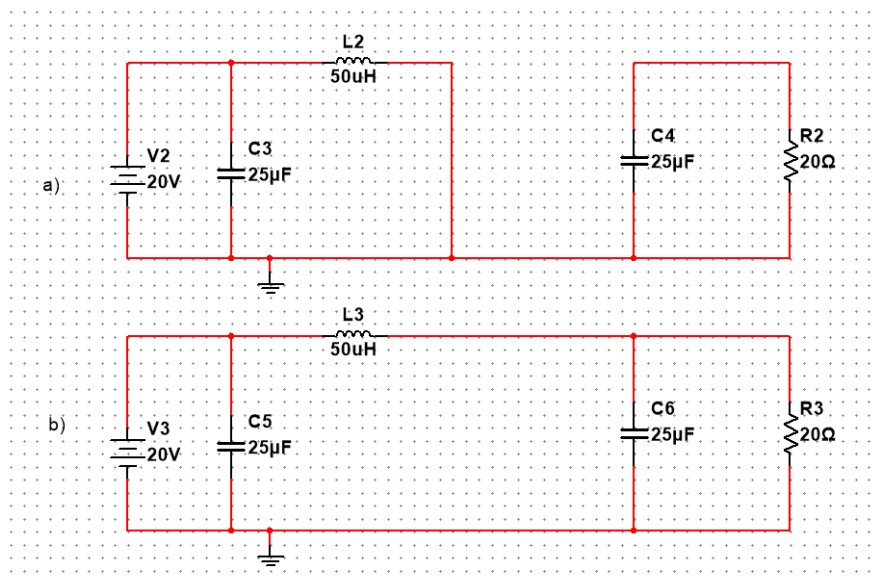
Układ ten w literaturze angielskiej nazywa się *boost converter*. Potrafi on zwiększać napięcie oraz zmniejszać prąd wejściowy w zależności od współczynnika wypełnienia D sterującego sygnału. Układ został pokazany na rysunku 3. W odróżnieniu do innego układu mogącego obniżyć napięcie – *buck converter*, tej przetwornicy nie można zrobić synchroniczną poprzez zmienienie diody na tranzystor polowy.



Rys. 3. Układ podwyższającej przetwornicy

Łatwo można zrozumieć zasadę działania, jeśli się zobaczy, jak zmienia się układ w zależności od stanu tranzystora i polaryzacji diody. W tym przypadku

można zrobić 2 układy jak na rysunku 4. W pierwszym układzie tranzystor jest otwarty, a dioda jest spolaryzowana w kierunku zaporowym. W drugim układzie zasilanie podłączone jest do obwodu i prąd płynie przez cały układ.



Rys. 4. Układy przetwornicy podczas trwania: a) pierwszego półokresu , b) drugiego półokresu

W obu układach elementy półprzewodnikowe zamienione są przerwą lub zwarcie w obwodzie. Dla analizy układów użyto elementów idealnych, ale równania można uzupełnić wartościami pasożytniczych elementów (tab. 1), gdzie DT_s i $D'T_s$ są podokresami okresu T_s .

Tabela 1. Równania dla układu obniżającego [1]

podokres	v_L	i_{C2}
DT_s	V_{in}	$-\frac{V_{out}}{R}$
$D'T_s$	$V_{in} - I_{out}R$	$I - \frac{V_{out}}{R}$

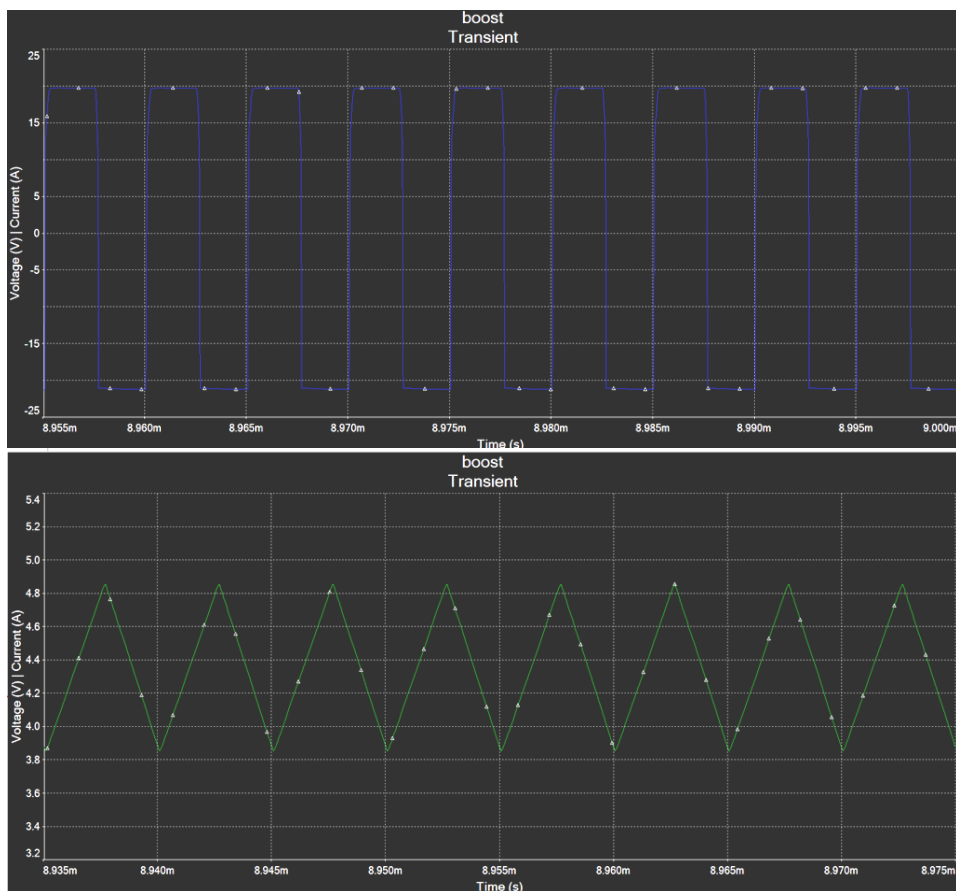
Z tych równań można otrzymać pełne wzory na napięcia i prądy oraz zależności napięcia wyjściowego od wejściowego. W tym celu należy połączyć 2 równania z każdego półokresów. Wygląda to następująco:

$$0 = D(V_{in}) + D'(V_{in} - I_{out}R) = V_{in} - D'I_{out}R \quad (3)$$

$$0 = D\left(-\frac{V_{out}}{R}\right) + D'\left(I - \frac{V_{out}}{R}\right) = D'I - \frac{V_{out}}{R} \quad (4)$$

W równaniach korzystamy z zasady, że $D + D' = 1$, natomiast te wzory w rzeczywistości rzadko są stosowane. Wykorzystuje się je do zrozumienia zasady działania układu. Zamiast tworzenia rzeczywistego modelu i obliczeń często można użyć kalkulatorów od producentów zawierających już wszystkie topologie, mające również możliwość obliczeń strat w elementach aktywnych, dobór innych elementów i pętli sprzężenia zwrotnego dla kontrolerów. Więcej o tym można znaleźć w pracy [2].

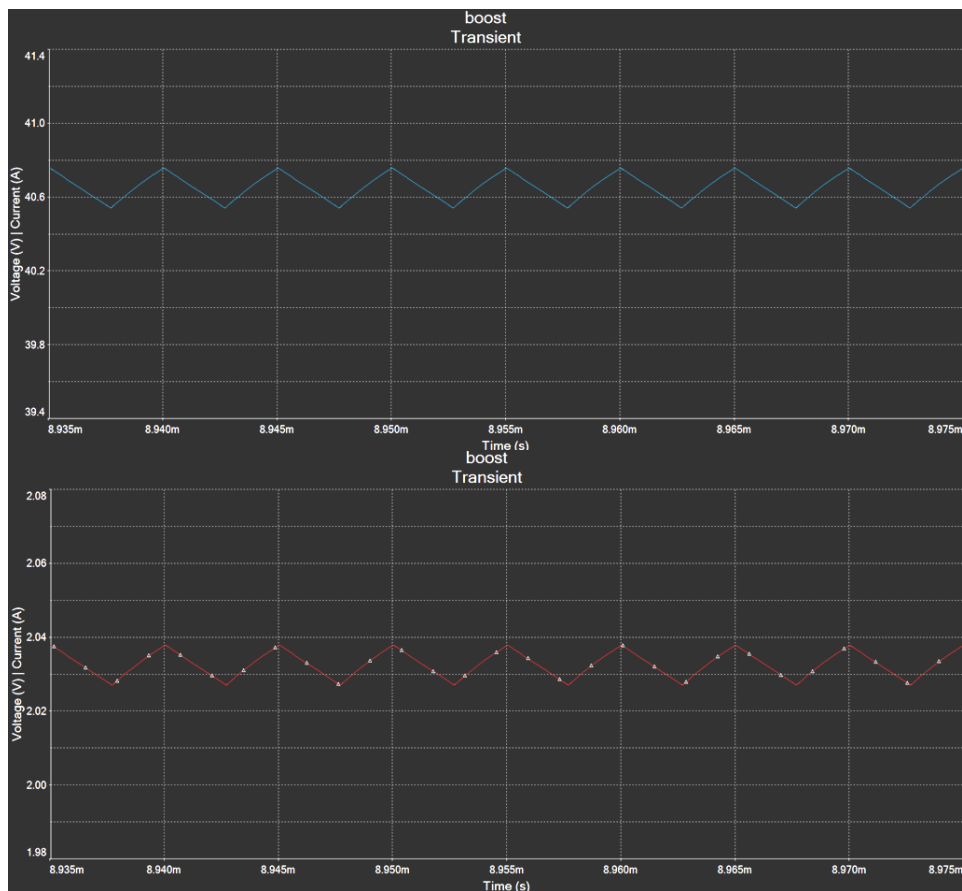
Przykładowo został zasymulowany układ o parametrach: $V_{in} = 20 \text{ V}$, $V_{out} = 40 \text{ V}$, $f_{sw} = 200 \text{ kHz}$, $I_{out} = 2 \text{ A}$, $\Delta I_{out} = 25\%$, $\Delta V_{out} = 25\%$.



Rys. 5. Przebiegi napięcia (góra) i prądu (dół) cewki

Korzystając z kalkulatora od firmy Texas Instruments, utworzono taki układ jak na rysunku 3. Do symulacji użyto programu NI Multisim 14.2. Otrzymane przebiegi dla cewki przedstawiono na rysunku 5. Uzyskany sygnał napięciowy

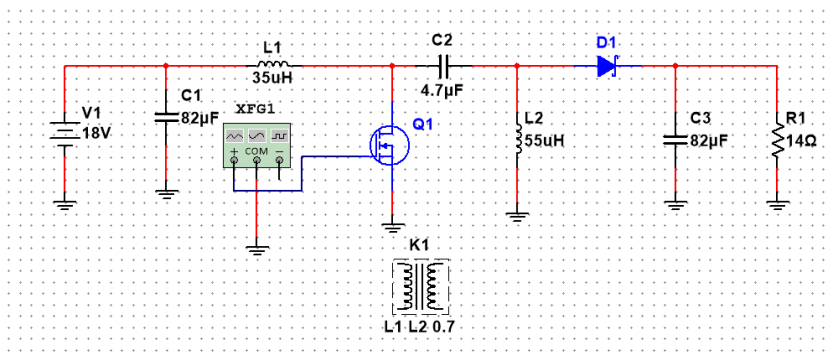
jest prostokątny, okres wynosi $5 \mu\text{s}$, wartość międzyszczytowa tętnień zgadza się z założeniami. Przebiegi na obciążeniu zaprezentowano na rysunku 6.



Rys. 6. Przebiegi napięcia (górną) i prądu (dół) na obciążeniu

3. Analiza przetwornicy SEPIC

Przetwornica SEPIC może i zwiększać i zmniejszać napięcie w zależności od napięcia wejściowego i współczynnika wypełnienia. Ogólnie wszystkie topologie takich przetwornic, oprócz buck-boost, jak na przykład: zeta i cuk są połączeniem 2 podstawowych przetwornic – *buck* i *boost*. Na rysunku 7 można zobaczyć, że są to 2 układy rozłączone kondensatorem, gdzie lewy układ jest przetwornicą podwyższającą, a drugi obniżającą, a dławik i dioda są zamienione miejscami.

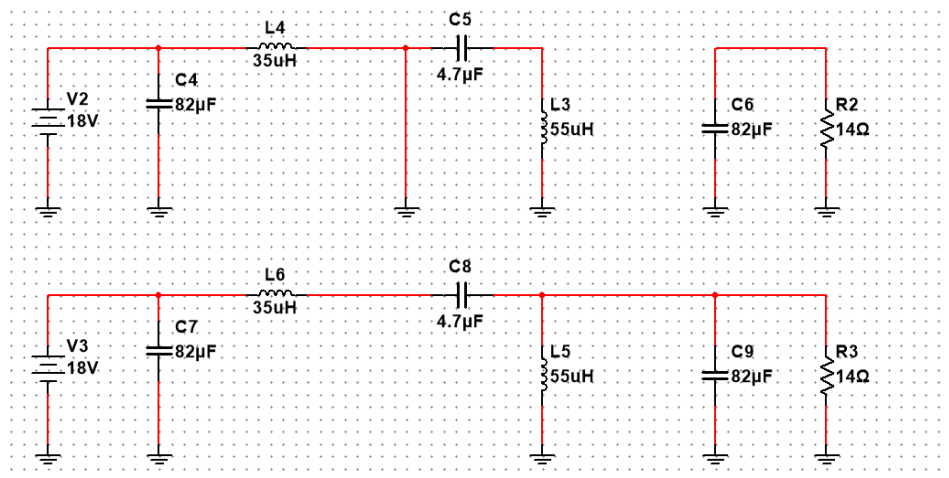


Rys. 7. Układ SEPIC

W przedstawionym układzie K1 jest elementem sprzężenia zwrotnego cewek. Można zaprojektować układ bez sprzężenia, co spowoduje zmniejszenie gabarytów elementów indukcyjnych oraz samych wartości indukcyjności. Ale wystąpią również problemy, np. trzeba mieć liczbę uzwojeń cewek sprzężonych w stosunku 1:1. Może pojawić się problem w znalezieniu takich cewek w wersji komercyjnej. W przypadku projektowanego układu, dławik zostanie wykonany samodzielnie. Układ został przedstawiony na rysunku 8, zaś równania układu zamieszczono w tabeli 2. Ze względu na większą ilość elementów, analiza jest bardziej skomplikowana niż w poprzednim przykładzie. W układzie pokazanym na rysunku 8 (górze) płyną prądy z dławików L1 i L2 przez zwarcie, które jest zamiast tranzystora polowego, w drugim układzie (dół) wszystkie prądy płyną intuicyjnie.

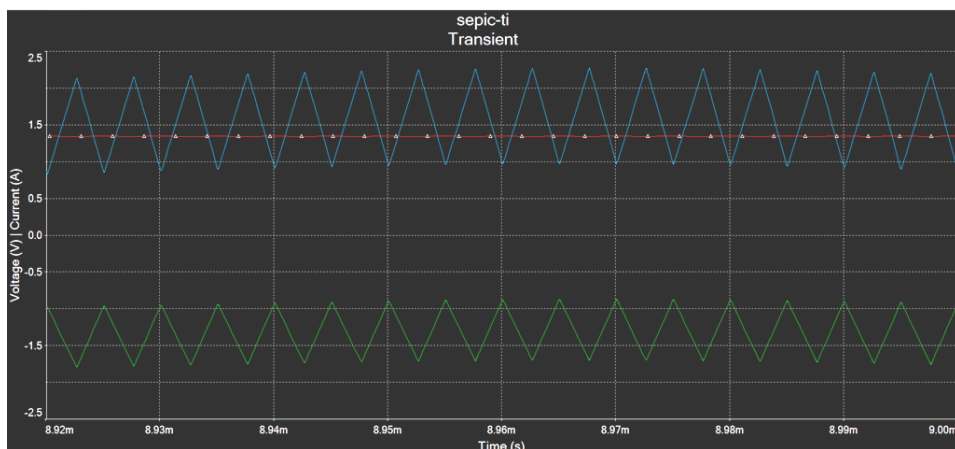
Tabela 2. Równania układów przedstawionych na rysunku 8

podokres	v_{L1}	v_{L2}	i_{C1}	i_{C2}
DT_s	V_{in}	V_{C1}	$-i_{L2}$	$-\frac{V_{out}}{R}$
$D'T_s$	$V_{in} - V_{C1} - I_{out}R$	$-V_{C2}$	i_{L1}	$i_{L1} + i_{L2} - \frac{V_{out}}{R}$

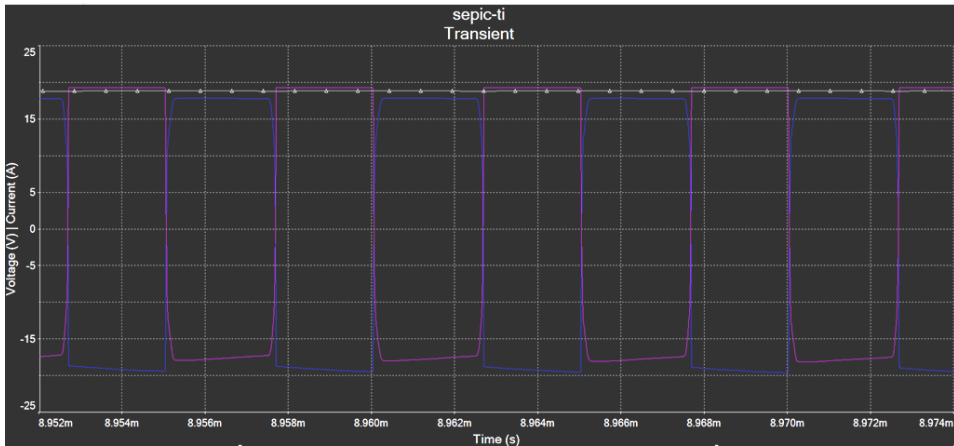


Rys. 8. Układ SEPIC

W tym przypadku więcej uwagi poświęcono realizacji tego układu. Do przykładu będzie użyty układ z rysunku 7. Dane obwodu są następujące: $V_{in} = 18\text{ V}$, $V_{out} = 28\text{ V}$, $f_{sw} = 200\text{ kHz}$, $I_{out} = 2\text{ A}$, $\Delta I_{L1} = 25\%$, $\Delta V_{C1} = 25\%$, $I_{L2} = 25\%$, $\Delta V_{C2} = 1\%$. Prądy w tym układzie pokazano na rysunku 10, tętnienia prądu wyjściowego w porównaniu do prądów dławiku nie są widoczne.



Rys. 9. Prądy L1 (niebieski), L2 (zielony) oraz R1 (czerwony)



Rys. 10. Napięcia L1 (niebieski), L2 (fioletowy) oraz R1 (szare)

W tym przypadku, napięcie wyjściowe też ma tętnienia, ale są one na tyle małe, że można je pominąć. Ważne jeszcze jest to, że prądy mają składową sinusoidalną, która może wynikać ze zjawiska o nazwie RHPZ. W celu jego eliminacji można by było zastosować kontroler PWM, ale dodaje on dodatkowe bieguny do transmitancji układu i przy niepoprawnym zaprojektowaniu układu może nie dać oczekiwanych parametrów.

4. Podsumowanie

W ramach pracy przedstawiono wyniki modeli i symulacji układów przetwornic zwiększających i zmniejszających napięcie na wyjściu w zależności od napięcia wejściowego. Prace symulacyjne są nadal kontynuowane przez autora. W przedstawionych 2 układach nie zostały pokazane dodatkowe układy kontrolerów PWM, ponieważ testy nie zostały jeszcze zakończone.

Literatura

1. Erickson R., *Fundamentals of Power Electronics*, Second Edition, Springer Science+Business Media, LLC Colorado, 2004.
2. Betten J., *Benefits of a coupled-inductor SEPIC converter*, Analog Applications Journal, Texas Instruments, 2011.
3. Texas Instruments, *Power Topologies Handbook*, 2017.
4. Schaeffer B., Gilbert D., *Analysis of the SEPIC Converter*, http://web.cecs.pdx.edu/~tymerski/ece445/groups/SEPIC_analysis_Team_2.pdf, dostęp 12.11.2021.

Yelyzaveta SIRKO, Matvii AKSENKO, Sonia DOLECKA, Aliaksei SHCHAPILA

Politechnika Lubelska, Koło Naukowe Elektroniki Samochodowej i Użytkowej PRIVE

PARAMETRY TECHNICZNE W DIAGNOSTYCE SYSTEMU COMMON RAIL METODĄ DMC

1. Wstęp

Zadaniem diagnosty badającego wtrysk paliwa CR (ang. *Common Rail*) jest wykrycia uszkodzeń w najkrótszym czasie i przy jak najmniejszych kosztach wykonywanych pomiarów. W niniejszej pracy zastosowano autorską metodę diagnostyczną DMC opracowaną przez S. M. Słupskiego, polegającą na tym, że wybiera się jedno miejsce w samochodzie, w którym jest najwięcej dostępnych parametrów technicznych pozwalających na wykrycie uszkodzenia. W przypadku systemu wtrysku paliwa CR, miejscem określonym jako minicentrum jest zasobnik paliwa. Analizę uszkodzenia przeprowadza się na podstawie oscylogramów z poszczególnych wtryskiwaczy i czujnika ciśnienia paliwa.

2. Diagnostyka systemu wtrysku CR

Do przeprowadzenia diagnostyki systemu Common Rail niezbędna jest specjalistyczna aparatura pomiarowa. Odpowiedni sprzęt poznano w warsztacie. Zapoznano się z przyrządami od strony teoretycznej, czyli sposobu pomiarów parametrów technicznych, a także funkcji obliczeniowych zaimplementowanych w sprzęcie pomiarowym. W warsztacie samochodowym zdobyto niezbędne doświadczenie w podłączaniu sond pomiarowych. W wielu przypadkach instalowanie przyrządów pomiarowych wymaga doświadczenia, ponieważ wiąże się z demontażem elementów przy silniku. Wtedy należy skorzystać z pomocy fachowców. Po zamontowaniu sprzętu diagnostycznego, wykonywano pomiary, nagrywając przebiegi oscyloskopowe. Standardowe nagrywanie wykonuje się podczas rozruchu silnika. Dodatkowe pomiary przeprowadza się w różnych fazach pracującego silnika, w zależności od występujących objawów usterki. Następnie analizuje się oscylogramy, prognozuje uszkodzenia i przeprowadza dalsze pomiary, aż do wykrycia usterki. Po wykryciu usterki samochód jest naprawiany [12–15, 21].



Rys. 1. Oscyloskop EDIA-PRO

3. Zastosowana aparatura diagnostyczna

Analizę zjawisk fizycznych zachodzących w systemie CR najlepiej jest przeprowadzić na podstawie parametrów bieżących dostępnych na wykresach. W tym celu używa się oscyloskopów umożliwiających nagranie przebiegów zmiennych fizycznych. W niniejszej pracy oscylogramy były nagrane specjalistycznym oscyloskopem przystosowanym do badania zjawisk zachodzących w systemie wtrysku paliwa typu Common Rail. Ze względu na specyfikę tego systemu wtrysku paliwa, oscyloskopy ogólnego przeznaczenia nie rejestrują przebiegów prądów i napięć w sposób umożliwiający analizę diagnostyczną badanego systemu. Istnieje wprawdzie możliwość przystosowania oscyloskopu uniwersalnego do tego typu badań, ale koszt takich czynności jest bardzo wysoki, kilkukrotnie wyższy od kosztów oscyloskopu specjalistycznego do systemów CR. Dlatego w pracy przeprowadzono obliczenia na oscylogramach wykonanych analizatorem sygnałów systemu wtrysku paliwa EDIA-PRO firmy DeltaTech Electronics z najnowszym oprogramowaniem z lutego 2022 roku [1–11].



Rys. 2. Analiza parametrów bieżących systemu CR oscyloskopem EDIA-PRO

4. Baza pomiarowa przebadana w pracy

Bazę pomiarową stanowiły badania oscyloskopowe wykonane w warsztacie Auto-Elektor-Service SAHIB w marcu i kwietniu 2022. Zarejestrowano 67 przypadków w samochodach marki Opel, Ford i Volvo z silnikami wysokoprężnymi typu CR. Dokumentacja uzyskana z serwisu została podzielana na następujące grupy:

- oscylogramy do analizy czasowej,
- oscylogramy do analizy kształtu,
- oscylogramy do analizy ciśnienia paliwa.

Ponadto do oscylogramów zostały dołączone notatki z uwagami diagnostów, którzy wykonywali jazdy próbne naprawianymi pojazdami.

5. Algorytm przeprowadzonych obliczeń i badań

Zgodnie z zaleceniami diagnostów, przebiegi oscyloskopowe były analizowane na różne sposoby, rozpatrując zjawiska fizyczne zachodzące podczas wtrysku paliwa. Wyliczono wartości typowych parametrów bieżących wykorzystywanych standardowo w diagnostyce, ale wykonywano także obliczenia i rozważania w sposób znacznie odbiegający od standardowych. Na przykład obliczano spadek ciśnienia na listwie CR nie całkowity, ale tylko w czasie trwania wtrysku paliwa. Typowy spadek ciśnienia trwa znacznie dłużej niż okres wtrysku paliwa i w taki sposób jest obliczany i podawany w literaturze specjalistycznej. Obliczenia wykonywane w pracy miały na celu dostarczenie danych eksploatacyjnych nietypowych, aby sprowokować inne podejście do tematu diagnostyki. Takie postępowanie może wyłonić nowe sposoby i metody analizy przebiegów parametrów technicznych [19, 20, 22].

5.1. Funkcje diagnostyki EDIA-PRO umożliwiające diagnostykę i rozwój nowych metod poszukiwania usterek

Funkcja zakresu ciśnienia paliwa ułatwia przeskalowanie wykresu tak, aby był widoczny tylko dla określonych wartości ciśnień. Dobierając odpowiedni zakres można zobaczyć i zmierzyć bardzo małe wahania ciśnienia. Dotyczy to analizy pracy wtryskiwacza, który jest podejrzewany o nieprawidłowe funkcjonowanie.

Funkcja wyrównania przebiegu pozwala na nałożenie na siebie dwóch lub więcej przebiegów w celu wzajemnego porównania. Przebiegi są wyświetlane w różnych kolorach, w takich samych jak sondy założone na przewodach elektrycznych wtryskiwaczy, co ułatwia identyfikację uszkodzeń. Ponadto przebiegi nałożone na siebie można przesuwac wertykalnie w celu przeprowadzenia obliczeń.

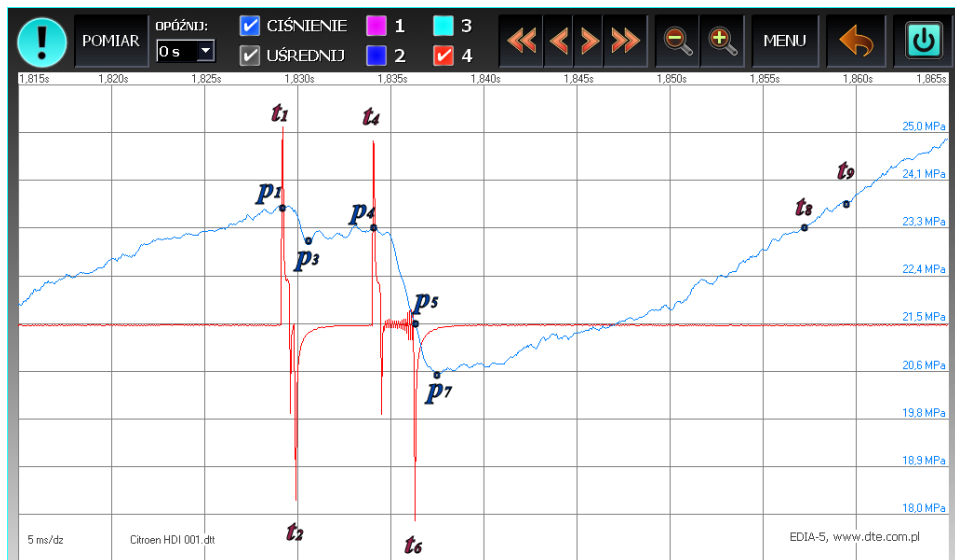
Funkcja wyboru wyświetlania ciśnienia bezwzględnego i ciśnienia w formie pulsacji, dostępna w analizie czasowej ułatwia właściwe zobrazowanie wykresu ciśnienia w zależności od badanego przypadku uszkodzenia. Ciśnienie może być rejestrowane w formie wartości bezwzględnej albo w formie pulsacji, co z kolei pozwala na analizę małych wahań ciśnień. W trybie pulsacji oscyloskop filtruje składową stałą i pokazuje tylko zmiany ciśnienia. Zmienne przebiegi są dodatkowo wzmacniane tak, aby przygotowywać wykres do analizy przez diagnostę.

Automatyczne wyliczenie przez diagnostę szybkości spadku ciśnienia paliwa w trakcie wtrysku. Parametr ten określa wydatek paliwa w trakcie wtrysku wyrażony w jednostkach umownych. Przez pojęcie wydatku rozumie się sumę dawki i przelewu pobraną z szyny wysokiego ciśnienia w trakcie pojedynczego wtrysku. Te wartości umożliwiają porównanie poprawnej pracy

wtryskiwaczy. Zgodnie z zaleceniami diagnostów, w celu uzyskania miarodajnych wyników obliczeń, uśredniano uzyskane wartości dla pięciu kolejnych wtrysków [23].

5.2. Parametry techniczne uzyskane z oscylogramów

Parametry techniczne uzyskano bezpośrednio z wykresów z wykorzystaniem suwaków poziomych i pionowych. Ponadto, wykonano obliczenia matematyczne, aby uzyskać dane, które mogłyby być potencjalnie wykorzystane w poszukiwaniu usterek. Dane te były dokumentowane do danego samochodu i udostępniane diagnostom [16–18].



Rys. 3. Wykres prądu wtryskiwacza i ciśnienia paliwa, gdzie: Δt_{12} czas wtrysku pilotującego, 0,00071 s; Δt_{46} czas wtrysku zasadniczego, 0,0022 s; Δt_{14} czas między wtryskiem pilotującym, a zasadniczym, 0,005 s; Δt_{48} czas odbudowy ciśnienia paliwa po wtrysku zasadniczym, 0,0229 s;

Δt_{49} czas odbudowy ciśnienia paliwa po wtrysku pilotującym i zasadniczym, 0,0231 s;

Δp_{13} spadek ciśnienia po wtrysku pilotującym, 0,72 MPa; Δp_{47} spadek ciśnienia po wtrysku zasadniczym, 2,655 MPa; Δp_{17} spadek ciśnienia po wtrysku pilotującym i zasadniczym, 3,15 MPa;

Δp_{45} spadek ciśnienia w czasie trwania wtrysku zasadniczego, 1,81 MPa

6. Praktyczne przykłady wykorzystania obliczeń w poszukiwaniu usterek

Krzywa pracy jednego wtryskiwacza odbiegała nieznacznie od pozostałych. Podczas pracy diagnostów te małe różnice zostały uznane za nieistotne. Otrzymując zadanie znalezienia usterki przez dokładną analizę oscylogramów, skupiono uwagę na tym jednym wtryskiwaczu. Odcinek krzywej dotyczącej

zamykania wtryskiwacza odbiegający od innych, różnił się o 0,154 ms. Zostało to zmierzone na wykresie i przekazane diagnostom w warsztacie, którzy, mając te dane, zidentyfikowali uszkodzenie w sterowniku silnika. Objawami złej pracy były lekkie poszarpywanie silnika, zwłaszcza na biegu jałowym. W tym wypadku, systemy samodiagnozy nie wykrywały żadnego uszkodzenia, a więc nie było kodów błędów. Ta sytuacja spowodowała trudności w znalezieniu uszkodzenia. Dopiero wyniki przeprowadzonych obliczeń z oscylogramów umożliwiły wskazanie uszkodzonego elementu, czyli sterownika silnika. Objawami usterki był sporadyczny brak mocy silnika. Systemy samodiagnozy nie rejestrowały żadnego błędu. W samochodzie pracującym w warsztacie nie można było wykryć spadku mocy silnika. Usterka była trudna do wykrycia. Do analizy dostarczono oscylogramy z pracy wtryskiwaczy. Po dokładnej analizie i wykonaniu obliczeń nie zauważono istotnych różnic w przebiegu napięcia, prądu na wtryskiwaczach, a także w spadkach ciśnienia paliwa. Dostarczone pierwotnie oscylogramy były nagrywane tylko podczas rozruchu silnika, dlatego postanowiono nagrać przebiegi oscyloskopowe podczas różnych stanów pracy silnika. Przebiegi nagrano kilkadziesiąt razy podczas zmian położeniu pedału przyspieszenia. Potem przeprowadzono dokładną analizę wykresów. Na jednym z nich odnaleziono zmniejszony prąd wyzwalający wtryskiwacz. Zauważono też, że w tym momencie spadek ciśnienia paliwa był mniejszy niż na pozostałych wykresach. Wykrycie tej różnicy było podstawą dla diagnostów do przeprowadzanie dodatkowych pomiarów. Okazało się, że przewód elektryczny wprowadzał dodatkową rezystancję do obwodu. Różnica w rezystancji, w stosunku do pozostałych przewodów wynosiła 0,324 Ω . Ta wartość wprowadzała chwilowe zmiany w pracy układu wtryskowego.

7. Podsumowanie

Wyniki obliczeń przeprowadzone przez osoby nie mające praktycznego doświadczenia w diagnostyce samochodowej, okazały się cennymi uwagami i sugestiami dla praktyków, wykonujących codziennie diagnostykę. Podstawowe określenia parametrów bieżących odczytywalnych z oscylogramów są powszechnie używane w literaturze technicznej. W ten sposób określa się na przykład spadek ciśnienia w zasobniku paliwa po wtrysku paliwa albo czas wtrysku paliwa. Inne określenia parametrów bieżących z oscylogramów, wprowadzone w tej pracy, nie są w literaturze specjalistycznej i naukowej powszechnie opisywane. Ponadto, Autorzy publikacji stosują różne kryteria w nazewnictwie i w definicji tych pojęć. Stosowany w niniejszej pracy system nazewnictwa został przyjęty jako opisowy. W ten sposób zapewniono prawidłową interpretację tych parametrów przez personel inżynierski.

Literatura

1. Rydzewski J., *Pomiary oscyloskopowe*, WNT, Warszawa 2007.
2. Kamieniecki A., *Współczesny oscyloskop*, BTC, Legionowo 2014.
3. Słupski S. M., *Oscyloskop w warsztacie samochodowym I*, Nowoczesny Warsztat, Nr 04/2004.
4. Słupski S. M., *Oscyloskop w warsztacie samochodowym II*, Nowoczesny Warsztat, Nr 05/2004.
5. Słupski S. M., *Oscyloskop w warsztacie samochodowym III*, Nowoczesny Warsztat, Nr 07–08/2004.
6. Słupski S. M., *Oscyloskop w warsztacie samochodowym IV*, Nowoczesny Warsztat, Nr 09/2004.
7. Słupski S. M., *Zaprzyjaźnij się z oscyloskopem*, Nowoczesny Warsztat, Nr 02/2008.
8. Słupski S. M., *O testach*, Nowoczesny Warsztat, Nr 06/2008.
9. Słupski S. M., *Oscyloskop w warsztacie samochodowym*, Auto Elektro, Nr 02/2009.
10. Słupski S. M., *Pracujemy z oscyloskopem*, Nowoczesny Warsztat, Nr 02/2014.
11. Słupski S. M., *Zaprzyjaźnij się ze swoim oscyloskopem*, Nowoczesny Warsztat, Nr 10/2017.
12. Günther H., *Common – Rail - Systeme*, Krafthand Verlag Walter Schulz GmbH, 2007.
13. Słupski S. M., *Szybka ocena wtryskiwaczy*, Nowoczesny Warsztat, Nr 12/2010.
14. Słupski S. M., *Common Rail najprościej*, Nowoczesny Warsztat, Nr 05/2012.
15. Słupski S. M., *Common Rail, co zrobić, aby go zrozumieć*, Rynek Części, Nowoczesny Warsztat, 2012.
16. Słupski S. M., *Wtryskiwacze w systemie Common Rail*, Auto Moto Serwis, Nr 04/2012.
17. Słupski S. M., *Diagnostyka CR na podstawie ciśnienia paliwa*, Serwis Motoryzacyjny Nr 04/2012.
18. Słupski S. M., *Zasobnik paliwa CR*, Serwis Motoryzacyjny Nr 04/2013.
19. Słupski S. M., *Liczby na wykresach*, Serwis Motoryzacyjny Nr 10/2013.
20. Słupski S. M., *Diagnozowanie rutynowe czy analityczne* Serwis Motoryzacyjny, Nr 11/2013.
21. Słupski S. M., *Trudności z zapalaniem*, Serwis Motoryzacyjny Nr 02/2014.
22. Słupski S. M., *Aparatura wymagająca myślenia*, Serwis Motoryzacyjny Nr 05/2014.
23. *Analizator sygnałów systemu wtrysku EDIA-PRO*, Instrukcja obsługi, DeltaTech Electronics, 2022.

PRZEGLĄD METOD WYZNACZANIA PRZEBYTEJ TRASY DLA MOBILNYCH PLATFORM ROBOTYCZNYCH

1. Wstęp

Tworząc mobilną platformę robotyczną należy zapewnić możliwość jej sterowania. W prostych przypadkach, sterowanie odbywać się będzie manualnie. Nad robotem często czuwa człowiek, który wykonuje pracę warstwy orientacji robota. Taka osoba może wizualnie ocenić sytuację i określić, jaki ruch powinien wykonać robot, żeby dotrzeć do punktu docelowego. Nie jest to jednak rozwiązanie idealne – nie zawsze będzie możliwy wizualny podgląd warunków pracy robota w czasie rzeczywistym. Klasycznym przykładem są tutaj łąziki marsjańskie – manualne sterowanie za pomocą łącza radiowego. Na podstawie danych z kamer łązika i satelity jest to możliwe, lecz ze względu na dość długi czas transmisji danych między planetami, jest to dość powolny proces, ponieważ czas oczekiwania na otrzymanie informacji zwrotnej z wykonania pojedynczej operacji może wynosić nawet do pół godziny.

Rozwiązaniem tego problemu jest przeniesienie warstwy orientacji z człowieka na robota. Żeby zaimplementować algorytmy orientacji w otoczeniu, potrzebna jest metoda akwizycji danych dotyczących tego otoczenia. Należy więc zastanowić się, jakiego rodzaju informacje można pobrać i przetworzyć, w celu otrzymania przebytej drogi przez platformę robotyczną. Jednym z rodzajów informacji, które popularnie wykorzystuje się w tym celu, jest obraz. Można analizować go zarówno pod kątem określania otoczenia platformy robotycznej, jak również i położenia oraz ruchu za pomocą kamer jednosoczewkowych [1] lub wielosoczewkowych [2], a także kamer RGB-D z laserowym skanerem odległości [3]. Innym źródłem danych na temat przebytego ruchu mogą być czujniki zliczeniowe lub inercyjne, takie jak enkodery, akcelerometry i żyroskopy.

W niniejszym artykule zostaną opisane metody śledzenia trasy oparte na odometrii wizualnej (bazujące zarówno na obrazie z kamery jednosoczewkowej, jak i dwusoczewkowej), czujnikach inercyjnych oraz czujnikach zliczeniowych. Zaprezentowane zostaną przykładowe implementacje oraz ogólne zasady działania opisywanych metod pomiarowych, poprzez odniesienie się do prac naukowych, które opisują dane systemy.

2. Odometria wizualna z użyciem kamer

Odometria wizualna jest procesem wyznaczania zmiany położenia modelu na podstawie obrazu z kamer (jednej lub wielu). W tym celu można wykorzystać kamery dwusoczewkowe, dzięki którym otrzymujemy dwa obrazy, na podstawie których możemy wyznaczyć bezwzględną odległość między kamerą a obiektami znajdującymi się w polu widzenia obu soczewek (co również jest popularnie wykorzystywane do nagrywania filmów 3-D), lub kamery jednosoczewkowe.

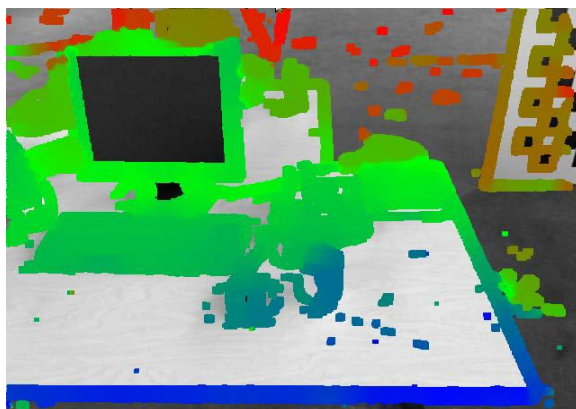
W przypadku kamer stereo (dwusoczewkowych), estymacja odległości opiera się na zjawisku błędu paralaksy oraz obliczaniu rozbieżności między obrazami z lewej i prawej soczewki [4, 5]. Obserwując zmianę odległości w czasie można estymować wykonany ruch. Estymacja odległości może być przeprowadzana z użyciem metod probabilistycznych (np. filtrowania Bayesowskiego oraz rozszerzonego filtru Kalmana) lub paradygmatu *Structure from Motion (SfM)* [6]. W przypadku kamer jednosoczewkowych nie otrzymuje się informacji na temat błędu paralaksy, dlatego konieczne jest zastosowanie odpowiednich algorytmów, które umożliwiają wyznaczenie odległości z „płaskiego” obrazu. Typowo, zmiana odległości w takich systemach jest wyznaczana na podstawie różnicy między obrazami (*pixel-by-pixel*) w czasie, lub różnicy między punktami kluczowymi wykrytymi na kolejnych klatkach obrazu.

2.1. Metody śledzenia trasy z kamery jednosoczewkowej

W przypadku kamer jednosoczewkowych istnieje kilka różnych koncepcji wyznaczania odległości na podstawie strumienia pojedynczych klatek obrazu. Wiele z typowo stosowanych podejść opartych jest na porównywaniu cech. Polega to na wyznaczaniu konkretnych obiektów lub cech obrazu (na przykład krawędzi lub nieregularności), które następnie są ze sobą porównywane w kolejnych klatkach obrazu. Zostaje określona różnica między nimi, która następnie pozwala na wyznaczenie zmiany odległości w czasie z użyciem geometrii epipolarnej [7]. W klasycznym podejściu jest to jednak dość wymagające obliczeniowo zadanie, które nie zawsze jest możliwe do implementacji w systemach mobilnych o ograniczonej mocy obliczeniowej. W ostatnich dekadach pojawiło się jednak wiele alternatywnych metod, które opierają się w pełni lub częściowo na śledzeniu wyznaczonych z obrazu „cech”. Jedną z takich metod jest „pół-gęsta odometria wizualna” [1]. Metoda ta polega na wyznaczaniu mapy głębokości w obszarach, które zawierają odpowiednią ilość informacji na temat szukanej cechy, czyli nie są jednolitymi częściami obrazu. Przykładowa klatka z wyznaczoną pół-gęstą mapą głębokości widoczna jest na rysunku 2. Mapa jest propagowana od klatki do klatki, a różnice między głębokościami wyznaczonymi w ten sposób umożliwiają estymację przebytej odległości.

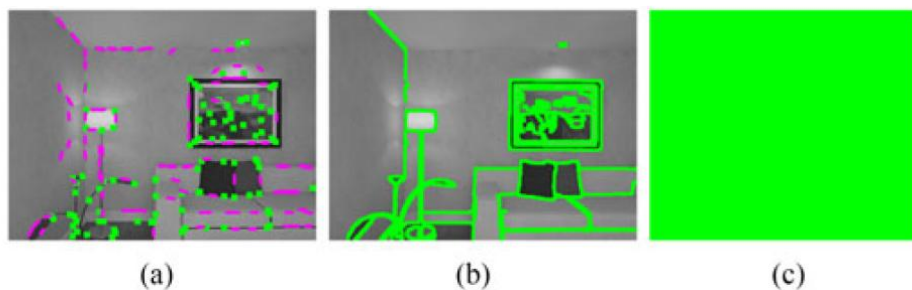


Rys. 1. Oryginalny obraz przed przetworzeniem [1]



Rys. 2. Obraz z nałożoną na niego pół-gęstą mapą głębokości [1]

Inną metodą wyznaczania odległości na podstawie obrazu z kamery jednosoczewkowej jest „półbezpośrednia odometria wizualna” [8], wprowadzająca alternatywny algorytm dopasowywania klatek obrazu na podstawie wykrytych krawędzi. Różni się to od metody wykorzystanej w algorytmach gęstych i pół-gęstych. W algorytmach gęstych do dopasowywania wykorzystane są wszystkie piksele obrazu. W algorytmach pół-gęstych wyznaczone są typowo krawędzie obiektów, na podstawie lokalnych intensywności gradientów w obrazie. W przypadku opisywanego algorytmu wykorzystywane są tylko wybrane piksele na krawędziach obiektów z wysoką intensywnością gradientu, co jest przedstawione na klatce (a) rysunku 3.



Rys 3. Klatka obrazu z zaznaczonymi pikselami wykorzystywanymi przez algorytm wyznaczania cech. Od prawej: na klatce (c) piksele wykorzystywane w metodzie gęstej, która używa całego obrazu jako cechy; na klatce (b) piksele wykorzystywane w metodzie pół-gęstej, opartej na intensywności gradientów lokalnych; na klatce (a) piksele wykorzystywane w metodzie półbezpośredniej

Inne popularne podejście do analizy obrazu w celu wyznaczenia zmiany odległości jest oparte na śledzeniu zmian w wygładzie obrazu i intensywności pikseli [9]. W tym przypadku nie zostają wyznaczone żadne cechy obrazu, określające konkretne obiekty. Zamiast tego, wyznaczony zostaje „szablon” (typowo część oryginalnego obrazu z kamery), który jest śledzony na kolejnych klatkach obrazu z kamery. Obliczając przemieszczenie szablonu możliwe jest określenie wykonanego przez kamerę ruchu. To podejście jest znacznie efektywniejsze w niektórych środowiskach w porównaniu z odometrią wizualną opartą na cechach obrazu, ponieważ wyznaczony szablon może być dość jednolitą częścią obrazu. Przykładowo – w terenie pustynnym, gdzie typowo nie rejestruje się ostrych i wyraźnych krawędzi w obrazie (szczególnie, jeśli jest to obraz o niskiej rozdzielczości), ilość danych użytecznych dla algorytmu opartego na cechach będzie stosunkowo mała. W takim samym środowisku, algorytm oparty o szablony będzie sprawdzał się znacznie lepiej ze względu na brak wymogu istnienia wyraźnych lokalnych różnic w intensywności pikseli na pojedynczych klatkach obrazu. Jednym z rodzajów tej techniki odometrii wizualnej jest *optical flow*. Jest on popularnie wykorzystywany w optycznych myszkach komputerowych – jeśli znana jest wysokość kamery od podłoża, można stosunkowo łatwo obliczyć wykonany ruch na podstawie różnic między kolejnymi klatkami obrazu. W takim przypadku „szablone” referencyjnym staje się pełny obraz z kamery, która typowo jest dość niskiej rozdzielczości, co przekłada się na niski koszt obliczeniowy tego algorytmu. Ta technika również może być stosowana w celu śledzenia przebytej trasy mobilnej platformy [10].

3. Nawigacja zliczeniowa i inercyjna

Nawigacja zliczeniowa (ang. *dead reckoning*) jest ogólnym pojęciem, za którym stoją wszystkie metody nawigacji oparte na zliczaniu różnic w pozycji i orientacji badanego systemu. Najprostszym przykładem przyrządu pomiarowego, na podstawie którego można stworzyć system nawigacji zliczeniowej, jest enkoder (rys. 4).



Rys. 4. Enkoder inkrementalny, popularnie stosowany do śledzenia ruchu kół w platformach robotycznych [13]

Enkoder to urządzenie, które przekształca ruch mechaniczny w sygnał elektryczny. W popularnie stosowanych enkoderach, ruch jest reprezentowany dwoma, zsynchronizowanymi ze sobą, sygnałami cyfrowymi. Ruch jest reprezentowany jako impuls elektryczny na jednym z wyjść enkodera, a w zależności od kierunku ruchu, zmienia się przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałami wyjściowymi, dzięki czemu, można w prosty i wydajny sposób zaimplementować pomiar wykonanej odległości na mikrokontrolerze obsługującym przerwania zewnętrzne. Znając parametry koła, do którego zamocowany został enkoder obrotowy, jak również i przełożenie oraz dokładność enkodera, możliwe jest obliczenie pokonanej drogi. Najpoważniejszym problemem stosowania nawigacji zliczeniowej opartej wyłącznie na enkoderach jest brak możliwości wykrycia poślizgu kół. Enkoder pozwala wyłącznie na pomiar ruchu wykonanego przez koło, lecz nie zawsze ruch koła poprawnie reprezentuje ruch platformy robotycznej. W sytuacji, gdy koła zaczynają się ślizgać, dane z enkodera będą poprawnie informować o ruchu, lecz fizycznie platforma może się nie przemieszczać. W celu kompensacji tego błędu, należy zastosować dodatkowe systemy odometrii – na przykład nawigację inercyjną, która jest jednym z przypadków nawigacji zliczeniowej.

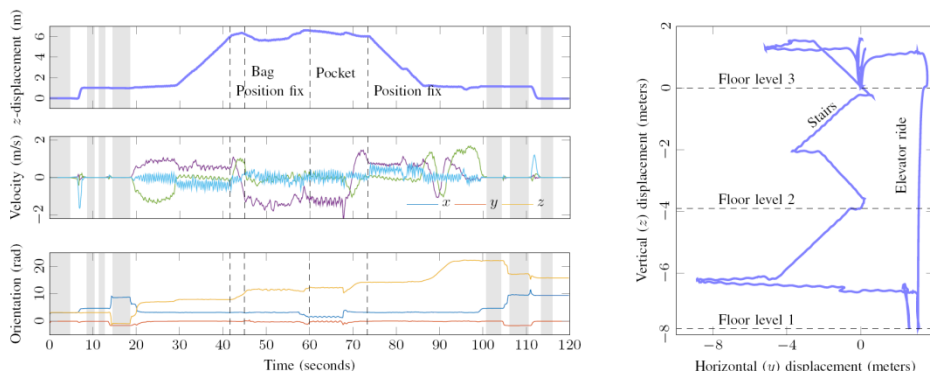
Nawigacja inercyjna opiera się na danych zebranych z wykorzystaniem czujników inercyjnych. Typowo, czujnikami tymi są IMU (ang. *Inertial Measurement Units*), czyli akcelerometry i żyroskopy 3DoF lub 2DoF (ang. *Degrees of Freedom*).

Akcelerometry zwracają zmianę przyspieszenia w czasie. Zakładając, że prędkość początkowa mierzonego układu jest równa 0, można zamienić przyspieszenie zmierzone w pewnym czasie na przebytą drogę za pomocą wzoru:

$$s = \frac{at^2}{2}, \quad (1)$$

gdzie s to przebyta droga, a to suma zmierzonych przyspieszeń, t to okres pojedynczego pomiaru. Obliczoną drogę należy wektorowo sumować dla każdej mierzonej płaszczyzny, w celu otrzymania przebytej w czasie t odległości na płaszczyźnie dwuwymiarowej lub w przestrzeni 3D. Podobne obliczenia należy wykonać dla przyspieszeń kątowych wykonywanych przez żyroskop, jeśli wymagana jest informacja o orientacji platformy robotycznej. Jeśli wymagane są tylko dane na temat położenia w czasie, wystarczającym źródłem danych jest akcelerometr *2DoF* lub *3DoF*, w zależności od tego czy chodzi o informację o zmianie wysokości platformy, czy nie. Dodatkowo, w celu dokładniejszego pomiaru wysokości, na której znajduje się platforma robotyczna, można wykorzystać barometr. Istnieją modele o wysokiej precyzji, które umożliwiają obliczenie różnicy w wysokości z dokładnością do kilku centymetrów.

W celu dokładniejszej estymacji odległości, stosuje się najczęściej filtr Kalmana lub rozszerzony filtr Kalmana [11, 12]. Stosowanie filtru Kalmana (lub innej metody estymacji danych uwzględniającej szumy statystyczne) jest wymagane ze względu na fakt, że dane mierzone przez IMU nie są idealne. Każdy pomiar wykonany przez czujnik inercyjny jest obarczony pewnym błędem. Ze względu na to, że częstotliwość próbkowania danych w systemach nawigacji inercyjnej znajduje się typowo w przedziale od kilkunastu do kilkuset hertzów, błąd pomiarowy bardzo szybko się kumuluje i będzie rosł proporcjonalnie do czasu wykonywania pomiarów. Filtracja z wykorzystaniem algorytmu Kalmana pomaga skompensować niepewności w systemie, w celu uzyskania precyzyjniejszego wyniku. Jeśli platforma robotyczna nie posiada żadnego systemu odniesienia, względem którego będzie możliwa kalibracja systemu nawigacji inercyjnej, pojawi się dryft pozycji. Z tego powodu, najczęściej spotyka się systemy nawigacji inercyjnej działające jako suplement dla innych metod nawigacji – na przykład odometrii wizualnej [11]. Istnieją jednak modele, które umożliwiają dość precyzyjne śledzenie pozycji wyłącznie za pomocą czujników inercyjnych, dzięki zastosowaniu odpowiednich (przykładowo – nieliniowych) metod analizy i filtracji danych [12].



Rys. 5. Przykładowe dane zebrane z użyciem czujników inercyjnych, dostępnych w telefonie komórkowym iPhone 6; w lewej kolumnie widoczne od góry: przemieszczenie w osi Z, szybkość i orientacja; w prawej kolumnie widoczne dane dotyczące wysokości telefonu [12]

4. Podsumowanie

W artykule zostały zaprezentowane najpopularniejsze metody śledzenia trasy pokonanej przez platformy robotyczne. Najbardziej zaawansowaną i zyskującą na popularności metodą jest odometria wizualna. Głównie ze względu na rosnącą wydajność systemów wbudowanych, które umożliwiają wykonywanie prostej analizy obrazu bezpośrednio na mikrokontrolerach oraz pojawianie się algorytmów umożliwiających śledzenie trasy na podstawie obrazu z jednosoczewkowych, łatwo dostępnych kamer. Tańsze i prostsze w aplikacji metody, bazujące na czujnikach zliczeniowych, są również powszechnie stosowane – zarówno jako główne elementy systemów śledzenia, jak i suplementy lub odniesienia dla innych części systemu.

Literatura

1. Engel J., Sturm J., Cremers D., *Semi-Dense Visual Odometry for a Monocular Camera*, IEEE International Conference on Computer Vision, Sydney, 2013.
2. Cumani A., Guiducci A., *Fast Stereo-based Visual Odometry for Rover Navigation*, Wseas Transactions on Circuits And Systems Nr 7(7)/2008, s. 648–657.
3. Huang A. S., Bachrach A., Henry P., Krainin M., Maturana D., Fox D., Roy N., *Visual Odometry and Mapping for Autonomous Flight Using an RGB-D Camera*, Robotics Research Nr 100/2017, s. 235–252.
4. Praveen S., *Efficient Depth Estimation Using Sparse Stereo-Vision with Other Perception Techniques*, Coding Theory, IntechOpen, London 2019.

5. Zaarane A., Slimani I., Okaishi W. A., Atouf I., Hamdoun A., *Distance measurement system for autonomous vehicles using stereo camera*, Array Nr 5/2020, s. 100016.
6. Fanfani M., Bellavia F., Colombo C., *Accurate Keyframe Selection and Keypoint Tracking for Robust Visual Odometry*, Machine Vision and Applications Nr 27/2016, s. 833–844.
7. Scaramuzza D., Fraundorfer F., *Visual odometry [tutorial]. Part I: The first 30 years and fundamentals*, IEEE Robotics & Automation Magazine Nr 18(4)/2011, s. 80–92.
8. Forster C., Zhang Z., Gassner M., Werlberger M., Scaramuzza D., *SVO: Semidirect Visual Odometry for Monocular and Multicamera Systems*, IEEE Transactions on Robotics Nr 33(2)/2016, s. 1552–3098.
9. Gonzalez R., Rodriguez F., Guzman J. L., Pradalier C., Siegwart R., *Combined visual odometry and visual compass for off-road mobile robots localization*, Robotica Nr 30/2012, s. 865–878.
10. Palacin J., Valganon I., Pernia R., *The optical mouse for indoor mobile robot odometry measurement*, Sensors and Actuators A Nr 126/2006, s. 141–147.
11. Li M., Mourikis A. I., *High-precision, consistent EKF-based visual-inertial odometry*, The International Journal of Robotics Research 32(6)/2013, s. 690–711.
12. Solin A., Cortes S., Rahtu E., Kannala J., *Inertial Odometry on Handheld Smartphones*, 21st International Conference on Information Fusion 2018.
13. *Katalog enkoderów i akcesoriów*, <https://termoregulATORY.pl/enkodery-i-akcesoria/enkoder-inkrementalny-hy38-360-2s>, dostęp 27.04.2022.

Kludia NOWAK, Paulina NOWAKOWSKA

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Studenckie Koło Naukowe Zarządzania i Ekonomii

APLIKACJE MOBILNE JAKO SKUTECZNY SPOSÓB KOMUNIKACJI Z KLIENTEM

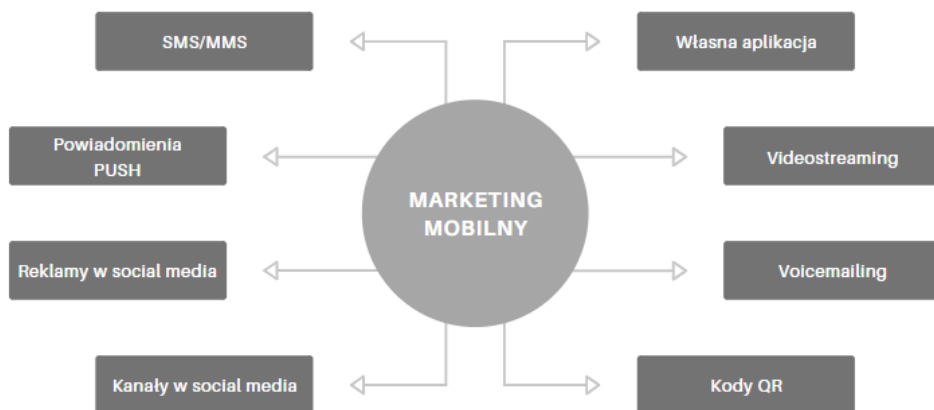
1. Wstęp

Współczesny świat i zachodzące w nim zmiany sprzyjają rozwojowi nowoczesnych technologii. Najczęściej mają one służyć ułatwianiu życia i sprzyjać oszczędności czasu, energii i pieniędzy. Powstanie Internetu, stron i serwisów internetowych było początkiem wielkich przemian. Wzrost popularności urządzeń mobilnych, tj. smartfonów czy tabletów, w ostatnich latach przyczynił się natomiast do skupienia uwagi na rozwiązaniach skierowanych dla posiadaczy takich urządzeń. Liczba ich użytkowników rosła w zaskakująco szybkim tempie i aktualnie wiele osób korzysta ze smartfonów nawet kilkanaście godzin dziennie. Te urządzenia towarzyszą konsumentom w codziennym życiu i są najszybszym i najskuteczniejszym narzędziem w procesie przekazywania informacji. Jednym z najpopularniejszych źródeł komunikacji między przedsiębiorcami a ich klientami w ostatnich latach stały się aplikacje mobilne. Ten kanał stał się przestrzenią do rozwoju handlu internetowego oraz wszelkiego rodzaju rozwiązań webmarketingowych. Aplikacje pozwalają stworzyć przestrzeń do prezentacji danej marki i jej działalności, posiadają większość cech oferowanych przez serwisy internetowe, jednak charakteryzują się też wieloma innymi zaletami, które nie są dostępne w żadnej innej formie. Aby aplikacje były atrakcyjne dla konsumentów muszą spełniać kilka podstawowych wymagań takie jak: estetyczny, przyciągający uwagę projekt czy interesujące i przynoszące korzyści programy lojalnościowe pozwalające budować relację między marką a klientem. Poprawnie zbudowane i prowadzone aplikacje mobilne mogą być źródłem wielu korzyści zarówno dla klientów, jak i przedsiębiorców, którzy w łatwy i szybki sposób mogą dotrzeć do konsumentów, w celu przedstawienia swoich produktów i usług oraz dopasowania swojej działalności do profilu wymagań klienta.

Artykuł ma na celu przedstawienie zmian zachodzących na rynku aplikacji mobilnych oraz analizę preferencji konsumentów związanych z korzystaniem z tego kanału komunikacji między przedsiębiorstwem a klientem.

2. Istota aplikacji mobilnych

Aplikacje mobilne stanowią istotę narzędzi komunikacji marketingowej oraz wizerunkowej firm. Aplikacje mobilne są także integralną częścią marketingu mobilnego. *Mobile marketing* to rodzaj marketingu polegający na nawiązywaniu relacji z klientami poprzez urządzenia mobilne, tj. smartfony lub tablety. Mobilność oznacza zdolność do elastycznego działania oraz dowolność i szybką zmianę miejsca w każdym czasie. Zatem, taki marketing pozwala na dotarcie do szerokiego grona odbiorców w każdym miejscu o każdej porze [1].



Rys. 1. Wybrane formy marketingu mobilnego

Składa się na to marketing w formie reklamy tekstowej przesyłanej poprzez SMS (ang. *Short Message Service*), ale także forma reklamy graficznej wysyłana rozszerzoną funkcją MMS (ang. *Multimedia Messaging Service*). Wiadomości tak w formie tekstowej, jak i graficznej są przekazywane również formą powiadomień *push* w aplikacjach mobilnych. Powiadomienia *push* wysyłane są z inicjatywy właścicieli danych aplikacji, a odbiorcami są osoby posiadające te aplikacje. Ustalany jest konkretny czas wysyłania od odbiorców takich powiadomień. Działanie powiadomień *push* jest podobne do formy SMS/MMS, jednak te powiązane są z numerem telefonu odbiorcy, a *push* działają jedynie z aplikacjami.

Social media, czyli media społecznościowe (np. Facebook, Instagram, Youtube itp.) to rozwiązania umożliwiające komunikację oraz interakcję przy wykorzystaniu technologii internetowych oraz mobilnych. W mediach społecznościowych możliwe jest prowadzenie marketingu poprzez tekstową lub graficzną reklamę na stworzonych już kontach przez inne osoby, organizacje bądź firmy. Możliwe jest również stworzenie odrębnych kanałów dla jednej firmy i przedstawianie na nich treści marketingowych związanych konkretnie z tą jedną firmą [2].

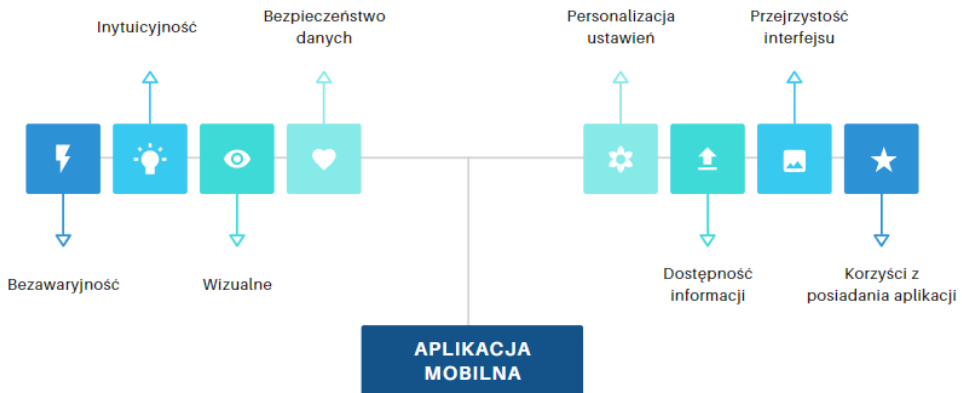
Poza tymi formami marketingu wymienione są jeszcze: *videostreaming* (marketing bądź sprzedaż poprzez prowadzenie transmisji wideo na żywo), *voicemailing* (reklamowe kampanie telefoniczne, komunikaty głosowe), kody QR (kody graficzne wczytywane poprzez kamery w smartfonach wyświetlające konkretnie zakodowane informacje) czy własna aplikacja mobilna dla przedsiębiorstwa.

Aplikacje mobilne są oprogramowaniem działającym na urządzeniach przenośnych tworzonych na konkretne systemy operacyjne. Obecnie najbardziej powszechne systemy operacyjne to Android oraz iOS. W tabeli 1 przedstawiono najpopularniejsze języki programowania aplikacji mobilnych.

Tabela 1. Najpopularniejsze języki programowania aplikacji mobilnych

Języki programowania aplikacji mobilnych
Java
Swift
PHP
C++
JavaScript
Ruby

Ważne aspekty aplikacji mobilnych

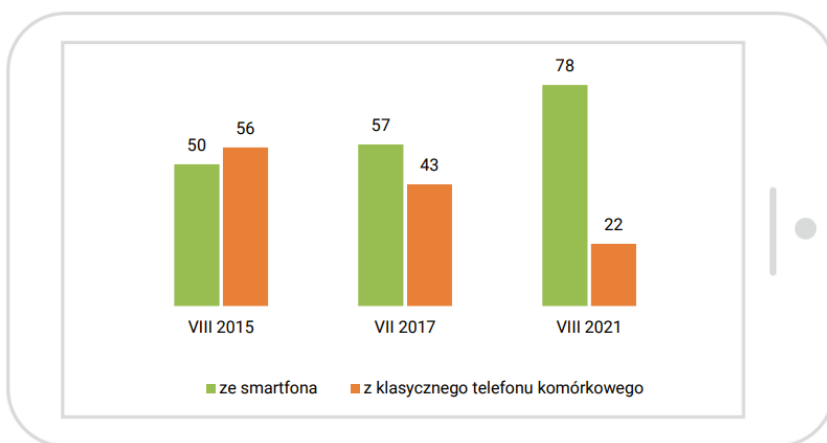


Rys. 2. Ważne aspekty aplikacji mobilnych (opracowanie własne na podstawie [4])

Tworzenie aplikacji mobilnych nie jest łatwym wyzwaniem. Ważne jest spojrzenie na aspekty, jakie biorą pod uwagę przyszli użytkownicy takich aplikacji (rys. 2).

3. Rozwój rynku aplikacji mobilnych w Polsce i na świecie

Rozwój nowoczesnych technologii napędza zmiany zachodzące w gospodarce na całym świecie. Przedsiębiorcy, aby dorównać konkurencji, muszą dostosowywać swoją działalność do innowacyjnych rozwiązań, które wzbudzają zainteresowanie nowych klientów lub pozwalają zatrzymać te osoby, które korzystają z danych usług lub produktów od dawna. Aplikacje mobilne są nieodłącznie związane z urządzeniami, które umożliwiają ich obsługę, czyli smartfonami oraz tabletami. Jak można zobaczyć na rysunku 5, ich popularność na przestrzeni ostatnich lat stale rośnie i aktualnie większość użytkowników urządzeń mobilnych deklaruje używanie smartfonów w codziennym życiu. Według badań opublikowanych przez CBOS pod koniec roku 2021 96% dorosłych Polaków korzysta z telefonów komórkowych, a większość z nich używa smartfona (rys. 3) [5].

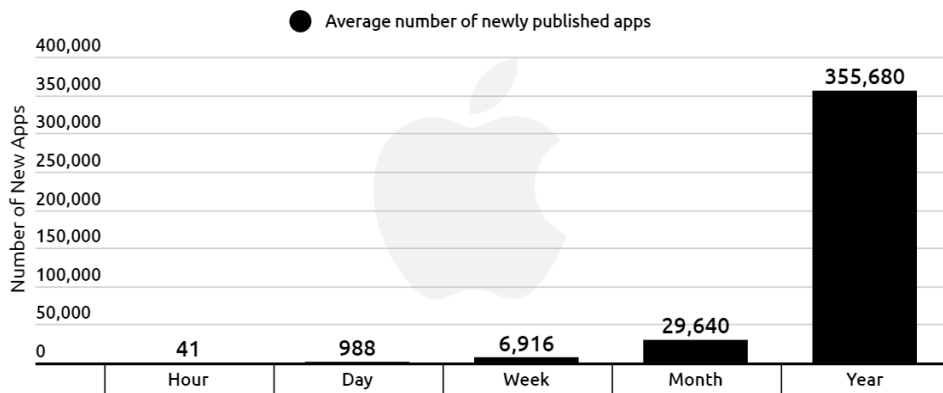


Rys. 3. Korzystanie z telefonów komórkowych – smartfon czy klasyczny telefon? [5]

Momentem przełomowym dla rozwoju rynku aplikacji mobilnych było zdecydowanie powstanie platform umożliwiających przeglądanie, zapoznanie się z funkcjami danych aplikacji oraz pobranie ich. Pierwsza tego typu możliwość powstała 11 lipca 2008, kiedy to Steve Jobs ukazał światu innowacyjne rozwiązanie nazwane App Store. Zaledwie kilka miesięcy później, bo już w 22 października 2008, powstała platforma Android Market, aktualnie funkcjonująca pod nazwą Google Play. Mimo tego że w latach ubiegłych powstawały już pierwsze aplikacje mobilne, to dopiero te wydarzenia przyczyniły się do rozpowszechnienia wielu aplikacji na szeroką skalę [6].

Aby ocenić, czy rynek aplikacji mobilnych na przestrzeni lat stale się rozwija, konieczne jest przeanalizowanie, jak wiele nowych platform przybywa

w przestrzeni czasu. Według raportu opublikowanego przez serwis *Burga*, ukazującego stan na dzień 5 września 2021, rocznie przybyło ok. 355 tysięcy nowych aplikacji dostępnych na platformie App Store (rys. 4) [7].



Rys. 4. Liczba aplikacji publikowanych w App Store [7]

Jak widać na rysunku 3, liczba aplikacji mobilnych stale rośnie. Można więc wnioskować, że zainteresowanie konsumentów jest coraz większe, zapotrzebowanie na tego typu usługi pogłębia się, a przedsiębiorcy stają na wysokości zadania. Odpowiadają na potrzeby klientów i tworzą aplikacje, które mają ułatwiać funkcjonowanie na wielu życiowych płaszczyznach.

4. Metody badawcze

Badanie zostało przeprowadzone przy użyciu formularza ankietowego sporządzonego i udostępnionego online. Grupa badawcza obejmowała dokładnie 104 osoby (zakładane było 100 osób) i była ona zróżnicowana pod względem płci, wieku, miejsca zamieszkania oraz wykształcenia. Formularz zawierał pytania dotyczące podejścia konsumentów do zagadnień związanych z użytkowaniem aplikacji mobilnych. Ankieta została stworzona w celu określenia, czy aplikacje są przydatne z perspektywy klienta oraz czy niosą one takie korzyści, których nie dostarcza żadna inna forma komunikacji.

Pytania zadane w ankiecie [8]:

1. Metryczka: płeć, wiek, miejsce zamieszkania, wykształcenie, status zawodowy.
2. Z jakich aplikacji mobilnych ankietowany korzysta w życiu codziennym (z wyłączeniem aplikacji mediów społecznościowych)?

3. Z jakich powodów najczęściej ankietowany decyduje się na instalację danej aplikacji mobilnej?
4. Jakie opcje aplikacji wpływają na chęć korzystania z niej dla ankietowanego?
5. Jakie wady dostrzega ankietowany podczas korzystania z aplikacji mobilnych?
6. Gdzie według ankietowanego dostępność informacji jest łatwiejsza do uzyskania?
7. W jakiej formie ankietowany częściej korzysta z programów lojalnościowych?
8. W jakiej formie ankietowany woli korzystać z usług oraz zakupów?
9. Jakie opcje według ankietowanego powinna posiadać aplikacja mobilna dobrze prosperującej firmy.
10. Jaka powinna być aplikacja według ankietowanego?
11. Jak często ankietowany korzysta z aplikacji mobilnych?

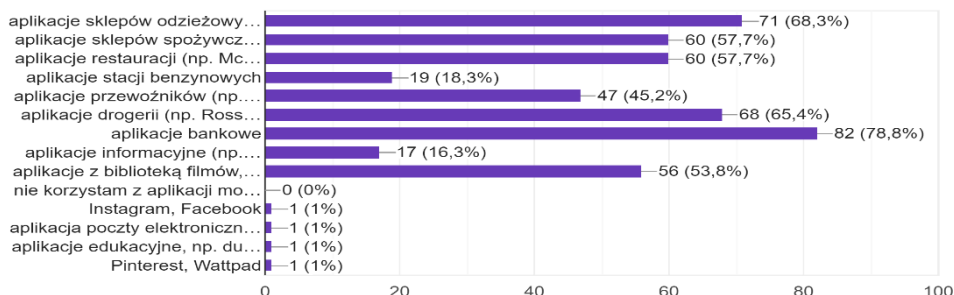
5. Wyniki

Na rysunku 5 przedstawiono odpowiedzi na pytanie „Z jakich aplikacji mobilnych korzysta Pan/i w codziennym życiu z wyłączeniem aplikacji mediów społecznościowych?”. Ankietowani mieli do wyboru kilka odpowiedzi podanych, jak i również możliwość dopisania własnych. Tutaj rozkład odpowiedzi wskazuje na to, że zainteresowanie wśród aplikacji jest bardzo szerokie pod kątem kategorii sklepów bądź usług. Są to aplikacje zakupowe (sklepy spożywcze, sklepy odzieżowe, sklepy drogeryjne), aplikacje informacyjne, edukacyjne, rozrywkowe (streaming filmów) oraz usługowe (bankowe, restauracyjne, poczta elektroniczna). Warto tutaj dodać, że spośród badanych, nikt nie wskazał, że nie użytkuje takich aplikacji mobilnych.

Na rysunku 6 przedstawiono rozkład odpowiedzi na pytanie “Z jakich powodów najczęściej decyduje się Pan/Pani na instalację danej aplikacji mobilnej?”. Ankietowani mieli możliwość wybrania trzech odpowiedzi i najczęściej wskazywanymi powodami były: informacje o promocjach, korzystanie z programów lojalnościowych oraz związanymi z nimi zniżkami oraz szybsza obsługa klienta w aplikacji mobilnej niż poprzez inne dostępne formy.

Z jakich aplikacji mobilnych korzysta Pan/i w codziennym życiu (poza aplikacjami mediów społecznościowych)?

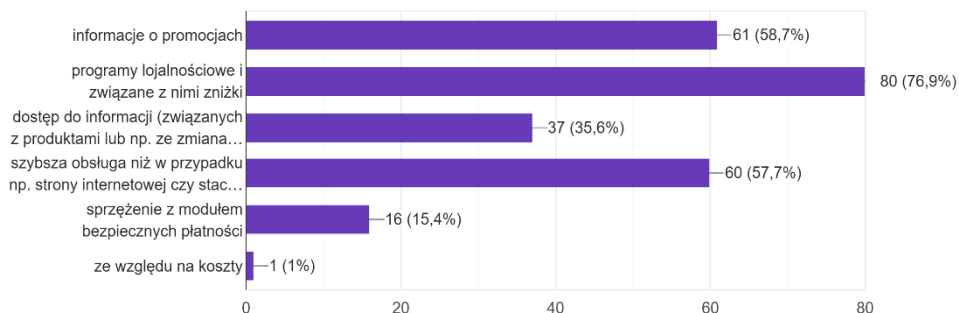
104 odpowiedzi



Rys. 5. Ankieta; pytanie: „Z jakich aplikacji mobilnych korzysta Pan/Pani w codziennym życiu (poza aplikacjami mediów społecznościowych)?” [8]

Z jakich powodów najczęściej decyduje się Pan/i na instalację danej aplikacji mobilnej?

104 odpowiedzi

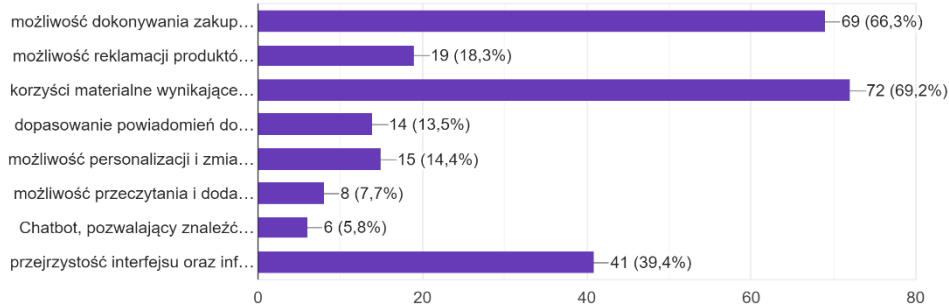


Rys. 6. Ankieta; pytanie: „Z jakich powodów najczęściej decyduje się Pan/Pani na instalację danej aplikacji mobilnej?” [8]

Na rysunku 7 przedstawiono wynik ankiety z pytaniem „Jakie opcje wpływają na chęć korzystania z danej aplikacji?”. Tutaj również możliwość wyboru odpowiedzi wynosiła maksymalnie trzy. Najczęściej wskazywane opcje, które wpływają na chęć korzystania z aplikacji to: korzyści materialne wynikające z użytkowania danej aplikacji, możliwość dokonywania zakupów w danej aplikacji produktów bądź usług oraz przejrzystość interfejsu i informacji.

Jakie opcje aplikacji wpływają na chęć korzystania z niej?

104 odpowiedzi

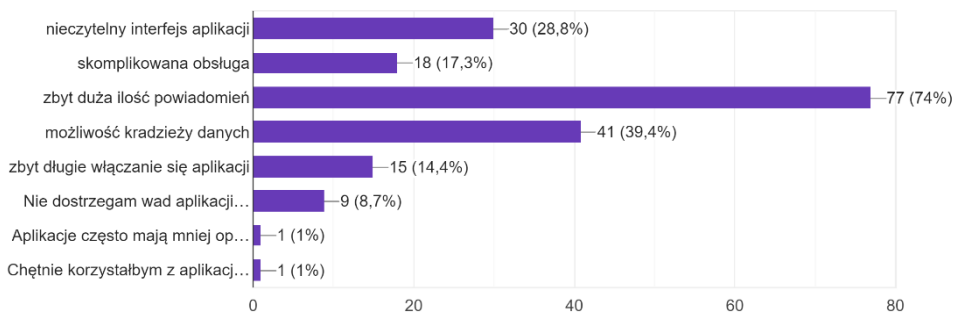


Rys. 7. Ankieta; pytanie: „Jakie opcje aplikacji wpływają na chęć korzystania z niej?” [8]

Kolejne pytanie (rys. 8) to „Jakie wady Pan/Pani dostrzega podczas korzystania z aplikacji mobilnych?” Najczęściej wskazywane odpowiedzi to: nieczytelność interfejsu danej aplikacji, zbyt duża liczba powiadomień z aplikacji oraz obawa o możliwą utratę oraz kradzież danych podanych w aplikacji.

Jakie wady Pan/i dostrzega podczas korzystania z aplikacji mobilnych?

104 odpowiedzi

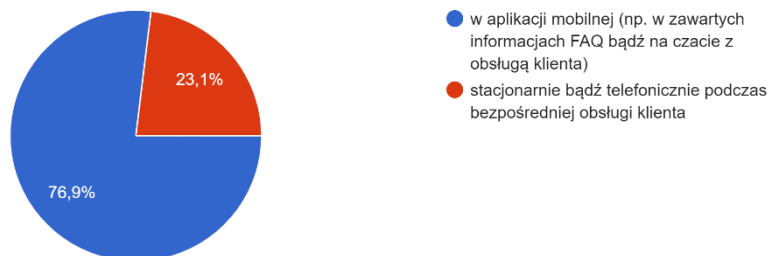


Rys. 8. Ankieta; pytanie: „Jakie wady Pan/i dostrzega podczas korzystania z aplikacji mobilnych?”

Na rysunku 9 przedstawiono odpowiedzi na pytanie, gdzie jest łatwiejsza możliwość uzyskania informacji: w aplikacji mobilnej czy stacjonarnie, podczas bezpośredniej obsługi klienta. Ankietowani w przeważającej liczbie (76,9%) wskazali, że dostępność informacji jest większa podczas używania aplikacji mobilnych.

Według Pana/i dostępność informacji łatwiej można uzyskać:

104 odpowiedzi

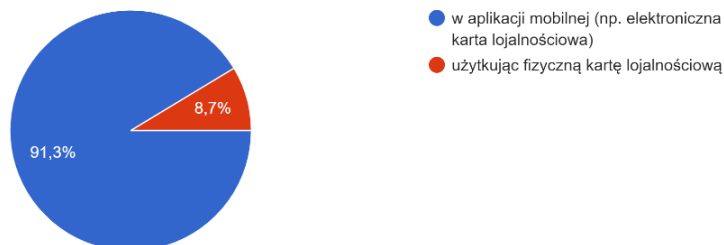


Rys. 9. Ankieta; pytanie: „Według Pana/i dostępność informacji łatwiej można uzyskać...” [8]

Kolejno pytanie brzmiało, czy ankietowany częściej korzysta z programów lojalnościowych poprzez aplikacje mobilne czy fizyczną kartę lojalnościową (rys. 10). Większość odpowiedzi z badanej grupy wskazuje, że klienci chętniej korzystają z programów lojalnościowych poprzez aplikacje mobilne, które dostępne są w smartfonach.

Częściej korzysta Pan/i z programów lojalnościowych:

104 odpowiedzi



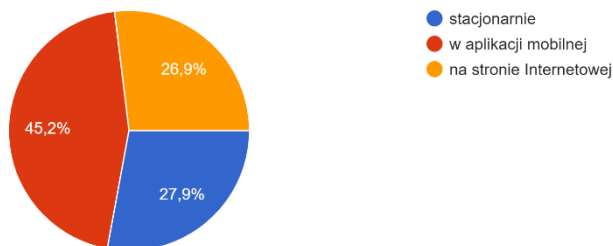
Rys. 10. Ankieta; pytanie: „Częściej korzysta Pan/i z programów lojalnościowych...” [8]

Na rysunku 11 przedstawiono pytanie, w jakiej formie ankietowany chętniej korzysta z usług oraz zakupów. Tutaj odpowiedzi plasowały się różnorodnie, jednak największa liczba głosów (45,2%) wskazała, że preferowane do zamawiania usług czy dokonywania zakupów są aplikacje mobilne.

Na rysunku 12 przedstawiono kolejno zadane pytanie z ankiety „Jakie opcje według Pana/Pani powinna posiadać aplikacja mobilna dobrze prosperującej firmy?”. Tutaj możliwość wyboru odpowiedzi, jak w poprzednich pytaniach, wynosiła trzy, a najczęściej wskazywane odpowiedzi to przede wszystkim: bezpieczeństwo danych, czytelny interfejs, przejrzystość informacji oraz dostępny program lojalnościowy powiązany z daną firmą w aplikacji.

Woli Pan/i korzystać z usług oraz zakupów:

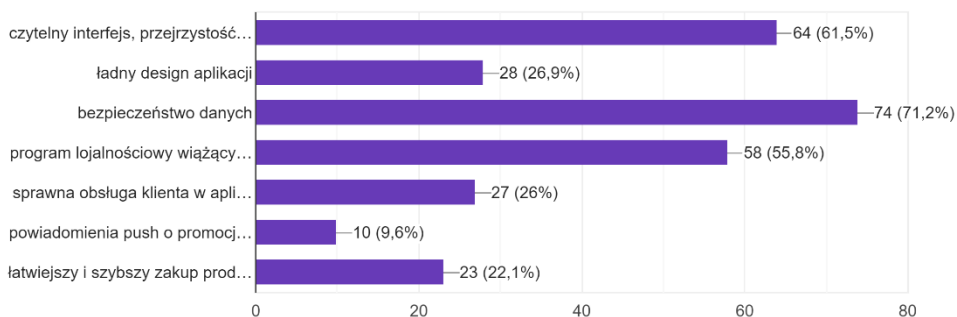
104 odpowiedzi



Rys. 11. Ankieta; pytanie: „Woli Pan/i korzystać z usług oraz zakupów...” [8]

Jakie opcje według Pana/i powinna posiadać aplikacja dobrze prosperującej firmy?

104 odpowiedzi

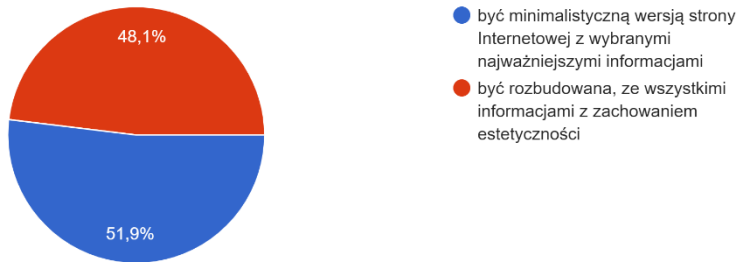


Rys. 12. Ankieta; pytanie: „Jakie opcje według Pana/i powinna posiadać aplikacja dobrze prosperującej firmy?” [8]

Kolejne pytanie to: „Jaka powinna być aplikacja według ankietyowanego?” (rys. 13). Grupa badawcza miała do wyboru jedną z pośród dwóch odpowiedzi: aplikacja powinna być minimalistyczną wersją strony internetowej z wybranymi najważniejszymi informacjami bądź aplikacja powinna być rozbudowana z dostępnymi wszystkimi informacjami, z oczywistym zachowaniem estetyki i spójności całej aplikacji. Odpowiedzi były zróżnicowane i ciężko wskazać dominującą odpowiedź na to pytanie. Aby sprostać tak różnym wymaganiom należy wziąć pod uwagę aspekt estetyczny i zarys minimalizmu w danej aplikacji. Należy również i postarać się zawrzeć wszystkie informacje o usługach bądź produktach w szerszym zakresie, aby klienci mogli dowiedzieć się wszystkiego i zdecydować, czy dany zakup bądź użytkowanie danej aplikacji będzie dla nich satysfakcjonujące.

Według Pana/i aplikacja powinna:

104 odpowiedzi

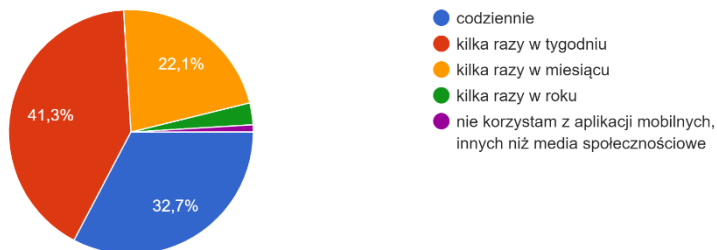


Rys. 13. Ankieta; pytanie: „Według Pana/i aplikacja powinna...” [8]

Ostatnim z najważniejszych pytań (rys. 14) jest to „Jak często ankietowany korzysta z aplikacji mobilnych?” z wyłączeniem aplikacji mediów społecznościowych. Najczęściej powtarzana (41,3%) odpowiedź to: kilka razy w tygodniu oraz codziennie (32,7%). Wskazuje to, że klienci danych aplikacji mobilnych poświęcają bardzo dużą część swojego czasu na ich użytkowanie i mają bardzo duży wpływ na firmy, które chcą pozyskać odbiorców, muszą sprostać narzucanym im wymaganiom.

Jak często korzysta Pan/i z aplikacji mobilnych (pomijając aplikacje mediów społecznościowych)?

104 odpowiedzi



Rys. 14. Ankieta; pytanie: „Jak często korzysta Pan/i z aplikacji mobilnych (pomijając aplikacje mediów społecznościowych)?” [8]

6. Podsumowanie

Poruszanie się w tematyce aplikacji mobilnych wymaga stałych obserwacji ze strony przedsiębiorców oraz badań w danych grupach odbiorców. Ta przestrzeń działalności niesie ze sobą wiele możliwości rozwoju firmy, ale, aby była wykorzystana w optymalny sposób, rozwiązania powinny być odpowiedziami

na wymagania klientów. Potrzeby konsumentów stale się zmieniają, a więc aplikacje na przestrzeni lat również powinny doświadczać transformacji. Jak wynika z przeprowadzonych badań, konsumenci chętnie korzystają z aplikacji mobilnych. Mimo wad, które zauważają, wskazują wiele korzyści płynących z tego kanału komunikacji. Kolejne lata niosą pozytywne prognozy dla tego sposobu porozumiewania się między konsumentami a przedsiębiorstwom. Można więc stwierdzić, że stworzenie aplikacji mobilnej to bardzo korzystna inwestycja dla firm z praktycznie każdego sektora gospodarki. Wykorzystanie wspomnianych platform będzie niosło coraz więcej korzyści, a przedsiębiorcy, którzy nie chcą pozostać w tyle za swoją konkurencją, powinni przemyśleć możliwość stworzenia aplikacji oraz dostosować jej funkcjonowanie pod swoją grupę odbiorców.

Literatura

1. PushAd, *Marketing mobilny – czym jest?*, <https://push-ad.com/blog/marketing-mobilny-czym-jest/>, dostęp 01.05.2022.
2. Sadowska E., *Marketing mobilny a komunikacja marketingowa*, Studia Ekonomiczne, Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach, Nr 140/2013, s. 122–132.
3. Codeberry, <https://codeberryschool.com>, dostęp 3.05.2022.
4. WebDevExperts, <https://stronywww.pro/jaka-aplikacja-mobilna-bedzie-najlepsza>, dostęp 3.05.2022.
5. Centrum Badania Opinii Społecznej, *Komunikat z badań – Telefony komórkowe czy smartfony?*, 2021.
6. Rotalewska M., *Rozwój aplikacji mobilnych*, Polityka ekonomiczna Nr 487/2017, s. 262–272.
7. Burga, *Raport – aplikacje mobilne*, 2021.
8. *Autorska ankieta na potrzeby badań do publikacji pokonferencyjnej*, <https://forms.gle/Juv1iW6286jzHyN98>, dostęp 03.05.2022.

STANOWISKO Z MIERNIKIEM CZASU REAKCJI

1. Wstęp

Nasza cywilizacja liczy sobie tysiące lat. Pierwszy pojazd powstał w XIX wieku i od tego czasu motoryzacja jest cały czas rozwijana wprowadzając nowe rozwiązania. Wraz z rozwojem motoryzacji wzrósł ruch na drogach, co wymusiło powstanie zasad. Tak powstał kodeks drogowy, sygnalizacja, jak i również znaki drogowe. W celu odpowiedniej reakcji na dany bodziec dźwiękowy, np. klakson lub bodziec wzrokowy w postaci sygnalizacji, kierowca musiał zaznajomić się z systemem. Dodatkowo, kierowca spotyka się z innymi bodźcami podczas jazdy, takimi jak np. zjawisko olśnienia.

Aby zbadać czas, jaki kierowca potrzebuje do poprawnej reakcji na różne bodźce, wykorzystuje się mierniki czasu reakcji. Posiadają one odrębną budowę od mniej zaawansowanych, w których odbywa się przy pomocy zazwyczaj mobilnego stanowiska, przechodząc do tych bardziej zaawansowanych polegających już na bardziej skomplikowanych symulatorach lub stanowisk w zmodyfikowanych pojazdach. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie prostego budżetowego miernika czasu reakcji oraz przeprowadzonych badań potwierdzających działanie urządzenia.

2. Czynniki wpływające na czas reakcji oraz bodźce kierowcy

Kierowca podczas prowadzenia pojazdu spotyka się z wieloma bodźcami. Najważniejszymi są z pewnością bodźce wizualne oraz dźwiękowe. Do tych pierwszych można zaliczyć wszelakiego rodzaju znaki drogowe, jak i sygnalizację świetlną. Znaki drogowe można podzielić na pionowe, poziome oraz ze względu na rodzaj: znaki ostrzegawcze, zakazu, nakazu, informacyjne itp. Sygnalizacja świetlna opiera się na kolorach, na które reaguje kierowca. Sygnał zielony informuje nas o pozwoleniu wjazdu za sygnalizator. Żółty zakaz wjazdu za sygnalizator, chyba, że należy gwałtownie zahamować, by zatrzymać pojazd przed sygnalizacją. Czerwony zaś oznacza bezwzględny zakaz wjazdu za sygnalizator [1]. Bodźce dźwiękowe to różnego rodzaju np. syreny pojazdów uprzywilejowanych lub klaksony innych pojazdów uczestniczących w ruchu drogowym. Stosowanie muszą być jednak z rozwagą. Istnieją także miejsca

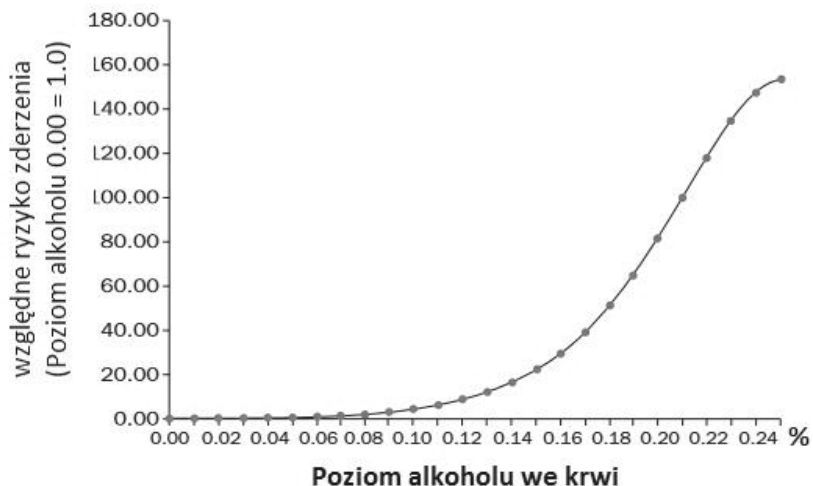
oznaczone znakami zabraniającymi stosowania sygnałów ostrzegawczych w samochodzie.

Przy reakcji na bodźce wizualne i dźwiękowe pojawiają się również czynniki wpływające na czas, w jakim zareagujemy na dany bodziec. Jednym z czynników wizualnych są schorzenia wzroku. Jednym ze schorzeń jest daltonizm, powoduje znaczne trudności z identyfikacją barw lamp sygnalizacyjnych. Stworzenie sygnalizacji świetlnej wiarygodnie identyfikowanej przez wszystkie osoby ze schorzeniami widzenia barw jest niemożliwe [2], [3]. Innym schorzeniem utrudniającym odpowiednią reakcję jest astygmatyzm. Objawia się rozmytymi plamami w miejscu tylnych reflektorów w pojeździe przed nami. Korzysta się wtedy z korygujących okularów [4]. Wraz z wiekiem również znacząco pogarsza się nam wzrok. Do siatkówki oka zdrowego 60-lataka dociera 1/3 światła w porównaniu do 20-lataka. Następuje także pogorszenie jakości rozróżniania kolorów. W wieku 70 lat zauważalna jest utrata od 20° do 30° pola widzenia [5].

Kolejnym czynnikiem są warunki pogodowe, z którymi mamy do czynienia na swojej drodze podczas prowadzenia pojazdu. Przy terenach wodnych, często na ranem, powstaje mgła, która zależnie od gęstości znacznie zmniejsza widoczność drogi i wymusza zwolnienie prędkości poruszania się. Mgła bywa bardzo nieprzewidywalna i może się pojawić w każdej chwili nawet podczas dobrej pogody. Oprócz mgły, często spotykane są opady deszczu, szczególnie gdy są ulewne nie tylko utrudniają widoczność, ale także wydłużają drogę hamowania. Podczas okresu zimowego problemem są opady śniegu, które pod wpływem silnego wiatru mogą powodować zamiecie [6]. Ważnym czynnikiem wpływającym na czas reakcji jest zjawisko olśnienia. Jest to krótkotrwałe oślepienie kierowcy mocnym światłem. Najczęściej spotykane jest podczas nocy, gdy nadjeżdżający z naprzeciwka pojazd włączy światła długie. Również zjawisko to może wystąpić w biały dzień np. poprzez odbicie od śniegu światła słonecznego. Jednym z efektów olśnienia jest brak widoczności trasy, zakrętów lub przeszkód leżących na drodze [7].

Wraz z wiekiem pogarsza się również słuch. Pogorszenie się wzroku może mieć wpływ także na pogorszenie słuchu. U osób starszych może się to objawiać szumem w uszach utrudniającym poruszanie się pojazdem [8].

Bardzo ważnym czynnikiem wpływającym na czas reakcji jest stan upojenia alkoholowego. Wraz z większym upojeniem alkoholowym wrasta ryzyko wypadku, jak i zderzenia z innymi uczestnikami ruchu. Przedstawia to rysunek 1., gdzie przedstawiono ryzyko zderzenia wraz z większym poziomem alkoholu we krwi. Alkohol ma też wpływ na to jak zachowamy się po wypadku. Utrudnia wchłanianie podawanych leków, a także może mieć szkodliwy wpływ w ich połączeniu z alkoholem [9].

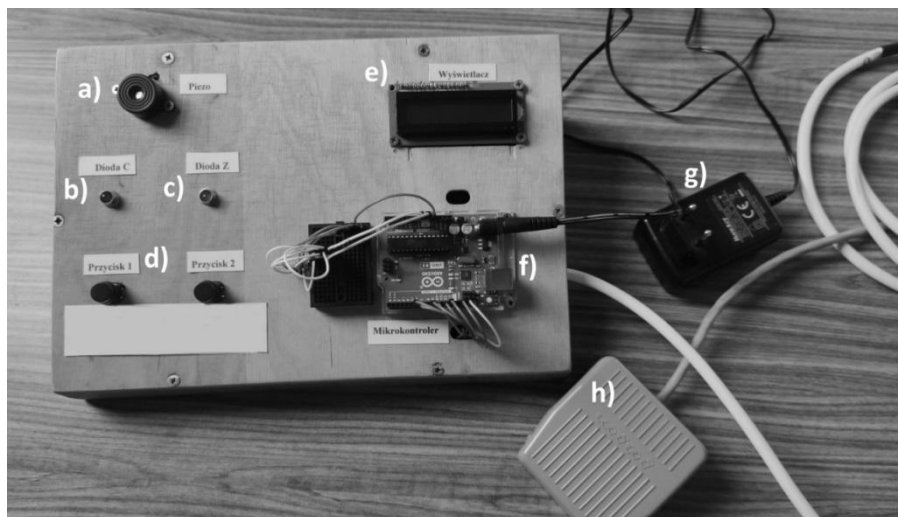


Rys.1. Ryzyko zderzenia pod wpływem alkoholu [9]

Prócz alkoholu negatywny efekt także napotykamy w przypadku spożycia narkotyków przed tym, jak wsiądnąć do pojazdu. Powodują one różne efekty zależnie od narkotyku, jaki dana osoba spożyje. Efektami może być np. przecenienie swoich własnych umiejętności, co kończy się zazwyczaj wypadkiem. Możliwy jest także wzrost zwiększoną nerwowość oraz czujności, co jednak przekłada się pogorszone podejmowanie decyzji. Istnieją też narkotyki, które nie pogarszają reakcji kierowcy, lecz ich spożywanie jest też przeciwwskazane. Najgorszym możliwym połączeniem jednak będą narkotyki wraz z alkoholem [9].

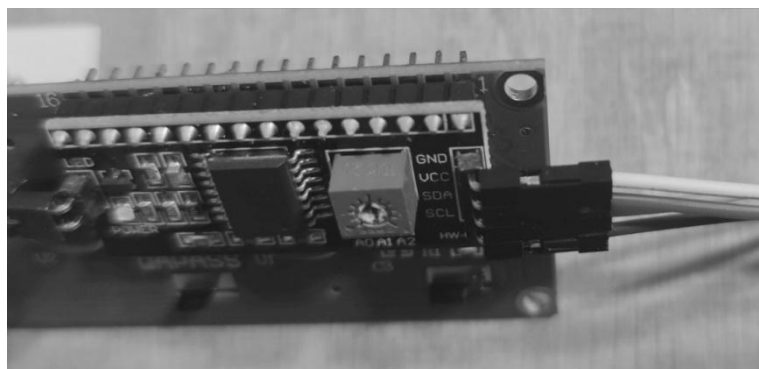
3. Stanowisko do pomiaru czasu reakcji

Stanowisko MCR (Miernik Czasu Reakcji) zostało zbudowane z szeregu pojedynczych elementów i obudowy ze sklejki skręconej wkrętami (rys. 2). Główna płyta sklejki jest pochylona pod kątem w celu większej widoczności. Elementy, jakie zostały użyte to diody, przyciski *tact switch*, wyświetlacz, przycisk nożny, zasilacz oraz mikrokontroler.

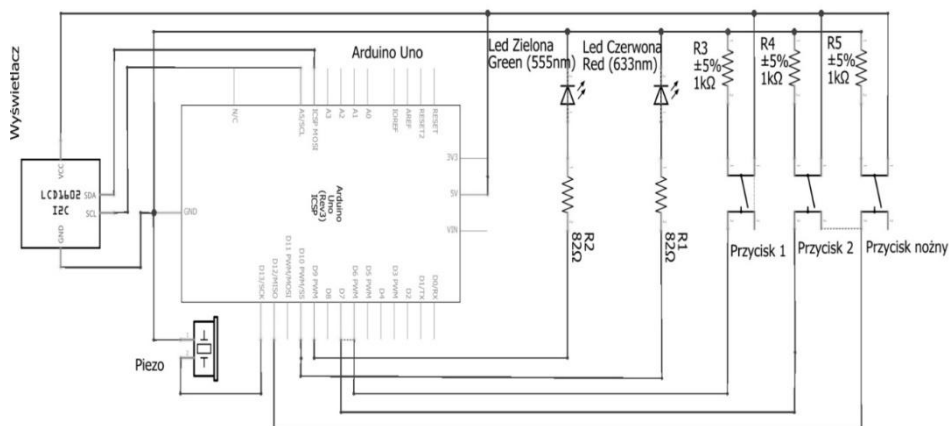


Rys. 2. Stanowisko MCR: a) brzęczyk, b) dioda czerwona 5 mm, c) dioda zielona 5 mm, d) 2 przyciski *tact switch*, e) wyświetlacz LCD, f) platforma Arduino, g) zasilacz Huntkey, h) przycisk nożny

Ze względów ekonomicznych użyto najprostszego brzęczyk i diody LED. Rodzaj przycisków, jaki został wykorzystany, to przyciski monostabilne. Użyty wyświetlacz to LCD na 2x16 znaków niebieskich marki Pi. W celu zniwelowania zajętych miejsc na mikrokontrolerze do wyświetlacza dolutowany został konwerter IC2, który posiada swoją własną bibliotekę w programie IDE. Na schemacie ideowym (rys. 4) widoczne jest połączenie wszystkich elementów z mikrokontrolerem Arduino Rev 3.



Rys. 3. Wyświetlacz po wlutowaniu konwertera IC2

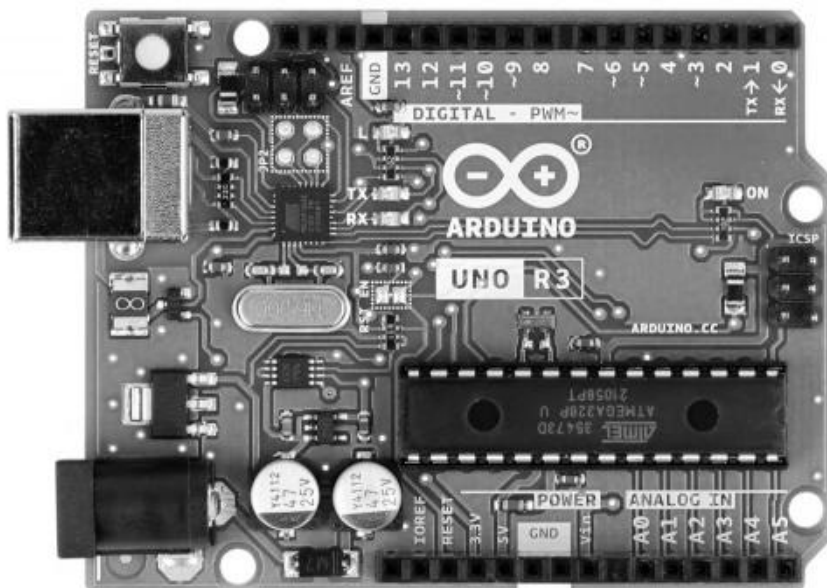


Rys. 4. Schemat ideowy układu elektronicznego

Działanie stanowiska jest stosunkowo proste. Po włączeniu wyświetla na wyświetlaczu krótką instrukcję użytkownika. W przypadku wciśnięcia przycisku jeden, pojawia się test wizualny polegający na wyświetleniu się losowej diody (czerwonej lub zielonej) w obrębie czasu, który też jest losowy. Badany ma zareagować tylko na diodę czerwoną, wciskając przycisk. Objawia się to wyświetleniem wyniku na wyświetlaczu. W przypadku naciśnięcia przycisku podczas działania diody zielonej pokazuje się komunikat o błędzie. Podczas przyciśnięcia przycisku 2 zaczyna się test dźwiękowy. Uczestniczący w badaniu ma wcisnąć przycisk w chwili, gdy zacznie się sygnał dźwiękowy i, tak jak w przypadku testu wizualnego, wynik reakcji pojawi się na wyświetlaczu.

4. Platforma Arduino

Platforma programowalna z mikrokontrolerem, zastosowana w zbudowanym stanowisku MCR, jest to Arduino Rev3 [10]. Sterowany jest aplikacją IDE, która obsługuje uproszczony język C++. Jest to na tyle przyjazny mikrokontroler, że ciężko go w jakiś sposób uszkodzić. Płytkę posiada wiele wejść analogowych, cyfrowych, jak i wejścia zasilania, uziemienia. Samo pisanie kodu jest ułatwione ze względu na gotowe biblioteki zastępujące części kodu, które są dostępne na stronie producenta. Na stronie są również opisane wszystkie funkcje.



Rys. 5. Platforma programowalna Arduino Rev 3 [24]

Na rynku istnieją różne mikrokontrolery. Producent Arduino posiada na swoim stanie różne modele, które są wymienione na ich stronie internetowej. Arduino Rev 3 został jednak wybrany przez jego niską cenę.

5. Wyniki

W badaniu z wykorzystaniem zbudowanego stanowiska miernika czasu reakcji brało udział 17 osób w wieku od 14 do 82 lat. Było to 6 osób płci żeńskiej oraz 11 płci męskiej. Wszystkie badane osoby były trzeźwe i wypoczęte. Na początku trzeba zwrócić uwagę na wyniki badań w tabeli 1. W tabeli umieszczone są czasy reakcji na bodziec wizualny ułożone od osoby najmłodszej do najstarszej. Widoczne w tabeli jest, że wraz z wiekiem wydłuża się tak czas reakcji, jak i możliwość pojawienia się błędu, czyli wciśnięcia błędnego przycisku podczas zapalenia się diody zielonej.

W tabeli 2 przedstawiony jest także czas reakcji na bodziec dźwiękowy. W przypadku dźwięku czas nie pogorszył się znacząco. Mogło to być spowodowane faktem braku losowości bodźców podczas tego testu.

STANOWISKO Z MIERNIKIEM CZASU REAKCJI

Tabela 1. Czas reakcji na bodziec wizualny

LP	Wiek	Reakcja wizualna					
		Średnia	Min	Max	Rozstęp	Mediana	Błąd
1	14	0,46	0,35	0,7	0,35	0,45	0
2	22	0,36	0,24	0,41	0,17	0,36	0
3	23	0,4	0,3	0,5	0,2	0,42	0
4	23	0,35	0,29	0,44	0,15	0,33	1
5	23	0,35	0,27	0,8	0,53	0,34	0
6	23	0,35	0,28	0,45	0,17	0,35	0
7	24	0,29	0,24	0,41	0,17	0,27	0
8	24	0,35	0,24	0,52	0,28	0,34	2
9	25	0,41	0,3	0,65	0,35	0,36	0
10	45	0,43	0,31	0,69	0,38	0,41	1
11	45	0,43	0,27	0,93	0,66	0,34	0
12	53	0,34	0,26	0,54	0,28	0,31	0
13	54	0,39	0,28	0,51	0,23	0,38	2
14	56	0,41	0,31	0,56	0,25	0,4	1
15	57	0,52	0,26	0,54	0,28	0,53	3
16	60	0,41	0,26	0,77	0,51	0,34	1
17	82	1,05	0,7	1,38	0,68	1,08	1

Tabela 2. Czas reakcji na bodziec dźwiękowy

LP	Wiek	Reakcja dźwiękowa				
		Średnia	Min	Max	Rozstęp	Mediana
1	14	0,34	0,24	0,74	0,5	0,31
2	22	0,28	0,18	0,29	0,11	0,29
3	23	0,26	0,21	0,31	0,1	0,25
4	23	0,26	0,23	0,3	0,07	0,26
5	23	0,3	0,24	0,37	0,13	0,3
6	23	0,31	0,23	0,38	0,15	0,31
7	24	0,21	0,18	0,29	0,11	0,2
8	24	0,21	0,17	0,27	0,1	0,21
9	25	0,28	0,2	0,39	0,19	0,28
10	45	0,43	0,21	0,91	0,7	0,35
11	45	0,25	0,22	0,29	0,07	0,26
12	53	0,24	0,19	0,33	0,14	0,23
13	54	0,26	0,22	0,34	0,12	0,25
14	56	0,3	0,25	0,34	0,09	0,3
15	57	0,33	0,19	0,33	0,14	0,31
16	60	0,31	0,19	0,61	0,42	0,25
17	82	0,61	0,39	0,8	0,41	0,65

Tabela 3. Czas reakcji na bodziec dźwiękowy

LP	Badany 1 (1 ‰)				Badany 2 (0,5 ‰)				Badany 3 (1 ‰)			
	Wizualna		Dźwiękowa		Wizualna		Dźwiękowa		Wizualna		Dźwiękowa	
	Przed	Po	Przed	Po	Przed	Po	Przed	Po	Przed	Po	Przed	Po
1	0,38	0,56	0,23	0,25	0,41	0,38	0,21	0,22	0,43	0,47	0,29	0,28
2	0,29	0,39	0,24	0,27	0,30	0,30	0,20	0,23	0,35	0,45	0,25	0,38
3	0,31	0,66	0,20	0,34	0,27	0,27	0,26	0,20	0,38	0,36	0,33	0,35
4	0,41	0,29	0,17	0,30	0,29	0,31	0,18	0,20	0,31	0,45	0,32	0,32
5	0,37	0,45	0,20	0,27	0,26	0,33	0,20	0,24	0,35	0,48	0,24	0,30
6	0,24	0,40	0,22	0,29	0,31	0,38	0,20	0,20	0,40	0,39	0,29	0,32
7	0,27	0,60	0,18	0,29	0,26	0,31	0,19	0,19	0,37	0,60	0,28	0,34
8	0,29	1,02	0,21	0,25	0,26	0,28	0,18	0,19	0,30	0,38	0,29	0,38
9	0,37	0,85	0,27	0,36	0,24	0,31	0,29	0,26	0,36	0,37	0,25	0,36
10	0,52	0,60	0,21	0,32	0,25	0,32	0,20	0,22	0,36	0,46	0,29	0,24
średnia	0,35	0,58	0,21	0,29	0,29	0,32	0,21	0,22	0,36	0,44	0,28	0,33

6. Podsumowanie

Zbudowane stanowisko MCR działa oraz za pomocą niego można przeprowadzić test czasu reakcji kierowcy. Jeśli chodzi o test wizualny, to pogarsza się on bardziej niż dźwiękowy. Podczas odpalania testu dźwiękowego trzeba odczekać kilka sekund, ponieważ przycisk nie reaguje. Może to być spowodowane złą konstrukcją napisanego kodu w aplikacji IDE. Tak samo w przypadku testu dźwiękowego nie ma etapu losowości. Badany wie, że nastąpi sygnał dźwiękowy i musi na niego zareagować. Nie ma żadnych różnorodnych sygnałów i jeden wybrany, na który uczestnik musi zareagować. Stanowisko można rozbudować o kolejne komponenty np. dodając moduł do zapisywania wyników na komputerze.

Literatura

1. Figarski M., *Zdaj testy i egzamin praktyczny na prawo jazdy*, Zdajtesty.pl, 2019.
2. *Colour blindness in everyday life and car driving*, Acta Ophthalmologica Scandinavica Nr 82(4)/2004, s. 436–442.

3. *Interaktywna Metoda wykrywania zaburzeń widzenia barw*, Prace Instytutu Elektrotechniki Nr 249/2011, s. 129–142.
4. Sung-Hua Y., *The impact of simulated astigmatism on functional measures of visual performance*, Queensland University of Technology, Thesis, 2015.
5. Esenwah E. Ch., Azuamah Y.C, Okorie M.E, Ikoro N.C., *The Aging Eye and Vision: A Review*, International Journal of Health Sciences Nr 4(7)/2014, s. 218–226.
6. Hookzema M., Leonard R. Price A., Bates J., <https://bfff.co.uk/wp-content/uploads/2020/12/Driving-in-adverse-weather-full-guidance.pdf>, dostęp 11.01.2022.
7. Nelson J. H., Waldram J. M., *Road Illumination – The Problem Of Dazzle*, Proceedings of the Institution of Automobile Engineers Nr 39(4)/1945, s. 385–403.
8. Howarth A., Shone G. R., *Ageing and the auditory system*, Postgraduate Medical Journal Nr 82(965)/2006, s. 166–171.
9. *Podręcznik bezpieczeństwa ruchu drogowego*, http://dag.un.org/bitstream/handle/11176/400554/2016.07_Road%20Safety%20Manual_Oct16.pdf?sequence=4&isAllowed=y, dostęp 25.01.2022.
10. *Wyjaśnienie funkcji dla platformy Arduino*, <https://www.arduino.cc/reference/en/>, dostęp 24.01.2022.

SYSTEM MONITOROWANIA SYGNAŁÓW BIOLOGICZNYCH W DIAGNOSTYCE OBCIĄŻENIA W SESJACH TRENINGOWYCH SPORTOWCÓW

1. Wstęp

Wiek XXI to czas szybkiego rozwoju zaawansowanych technologii. Współczesny człowiek chętnie sięga po różnego rodzaju urządzenia mobilne, takie jak smartfony, opaski smart czy smartwatche, za pomocą których uzyskano możliwość poznania własnych ciał pod kątem wydolności organizmów. Za pomocą powyżej wymienionych urządzeń można uzyskać informacje na temat tętna, intensywności treningowej, spalonych kalorii, EKG, natlenienia krwi, liczby zrobionych kroków, analizę snu i wiele podobnych informacji.

Dla osób zawodowo uprawiających sport takie urządzenia są wciąż niewystarczające, aby skutecznie pracować nad poprawieniem formy oraz ogólnej wydolności organizmu. W związku z tym zapotrzebowaniem zrodził się pomysł na stworzenie urządzenia, które połączyłoby popularne rozwiązania, a także odpowiadałoby potrzebom profesjonalistów, zbierając dane przy wykorzystaniu nieinwazyjnych metod, takich jak badanie sztywności mięśni, EMG, impedancji skóry czy fotopletyzmografii. Urządzenie pozwoli na zebranie dużo większej ilości danych, które mogą wpłynąć na poszerzenie wiedzy oraz lepsze zrozumienie organizmu człowieka podczas wysiłku fizycznego. Takie przedsięwzięcie wymaga pracy informatyków, elektroników opracowujących sprzęt zbierający dane (akwizytor) i ekspertów z dziedziny fizjoterapii oraz medycyny, wiedzących, jakie informacje należy pozyskać z ludzkiego ciała, w celu poprawnego opisanie zmian zachodzących w nim w trakcie sesji treningowej i stanów bezpośredniego zagrożenia kontuzją wynikających ze specyfiki danego obciążania organizmu.

System opisywany w niniejszym artykule jest częścią prowadzonego w ramach grantu z NCBiR POIR.01.01.01-00-1059/20. Jego celem jest wytworzenie systemu pomiarowo-diagnostycznego dla sportowców we współpracy specjalistów z powyżej wymienionych dziedzin.

2. Projekt – cel i założenia

Celem omawianego projektu jest utworzenie urządzenia, za pomocą którego możliwe będzie dokonanie akwizycji następujących sygnałów:

- EMG,
- bioimpedancji,
- sztywności mięśni,
- przepływu krwi,
- tętna.

Kolejnym celem projektu jest opracowanie algorytmu klasyfikacji służącego do analizy powyżej wymienionych danych.

System ma posiadać następujące cechy i funkcjonalności:

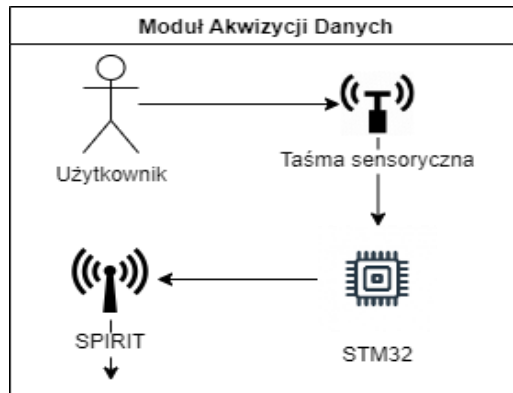
- analiza powyżej wymienionych sygnałów,
- wizualizacja danych,
- stabilność połączenia,
- intuicyjność i wygoda użytkownika,
- możliwość zarządzania całym systemem z poziomu komputera diagnosty,
- zgodności ze standardem HL7,
- możliwość importu i eksportu danych użytkownika.

3. System pomiarowy

Urządzenie składa się z trzech głównych elementów:

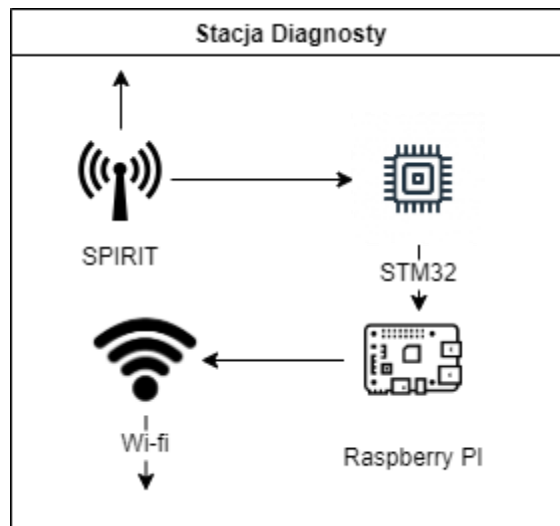
- moduł akwizycji danych (MAD),
- stacja diagnostyczna (SD),
- komputer diagnosty (KD).

MAD – moduł akwizycji danych, jest to system, na który składa się taśma sensoryczna odpowiedzialna za próbkowanie powyżej wymienionych sygnałów, przetwarzanych przez STM32. Następnie są przesłane drogą radiową poprzez wykorzystanie modułu Spirit, który komunikuje się za pomocą sygnału radiowego o paśmie poniżej 1 GHz. Moduł ten jest zdolny do nadawania, a także odbierania sygnału.



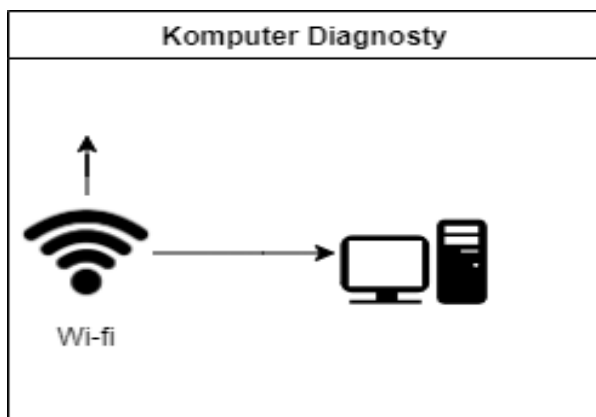
Rys. 1. Schemat systemu pomiarowego – moduł akwizycji danych MAD

Stacja diagnostyczna (SD), jest to urządzenie pośredniczące, którego zadaniem jest odbieranie pakietów danych za pomocą modułu Spirit z MAD. Następnie dokonuje przepakowania odebranych sygnałów. Potem przesyła je do KD za pomocą protokołu gRPC. Wykorzystanie stacji pośredniczącej pomiędzy MAD a KD pozwala na użycie dużo większej ilości taśm i urządzeń pomiarowych pracujących jednocześnie.



Rys. 2. Schemat systemu pomiarowego – stacja diagnostyczna (SD)

Komputer diagnosty (KD) jest to aplikacja, której zadaniem jest zarządzanie całym systemem pomiarowym i odbieranie pakietów danych z SD za pomocą gRPC. Oprogramowanie KD skupia się na analizie zebranych informacji oraz zapisie do bazy danych, a także na ich wizualizacji w czasie rzeczywistym.



Rys. 3. Schemat systemu pomiarowego – komputer diagnosty (KD)

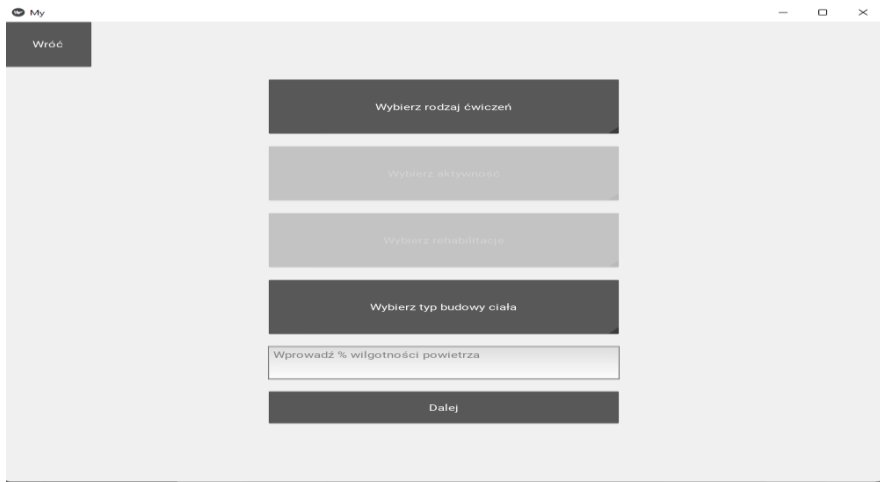
3.1. Stos technologiczny projektu

Komputer Diagnosty:

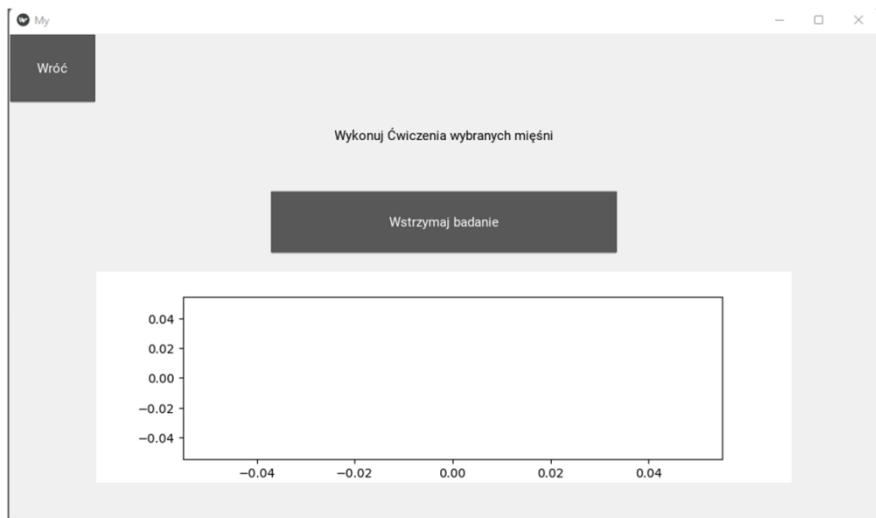
- Python 3.9 – język programowania, który został wykorzystany do wytworzenia aplikacji dla komputera diagnosty w wersji 3.9, ponieważ jest to ostatnia wersja kompatybilna z frameworkiem Kivy. Język ten charakteryzuje się czytelną dokumentacją i dużym zasobem bibliotek, które znacznie ułatwiają proces produkcji oprogramowania.
- Kivy 2.0.0 – framework wykorzystywany do tworzenia GUI dla języka Python. Znajduje swoje zastosowanie zarówno dla aplikacji mobilnych, jak i desktopowych. Charakteryzuje się wygodą implementacji widoku, gdzie każdy został opisany w oddzielnym pliku z rozszerzeniem '.kv'. Kivy wyróżniają się własnym językiem, a także wysoką wydajnością ich użytkowania [1].
- matplotlib – biblioteka Pythona, wykorzystywana do wizualizacji danych w postaci 2D i 3D. Ten framework został wykorzystany do dynamicznego prezentowania zebranych informacji, z odpowiednio dobraną przez programistę częstotliwością aktualizacji wykresu. Dodatkowo, narzędzie to posiada czytelną dokumentację, duże wsparcie społeczności, a także bogaty zasób funkcjonalności, które znacznie ułatwiają implementację wizualizacji danych [2], [3].
- gRPC 1.44.0 – biblioteka wykorzystywana do komunikacji pomiędzy SD a KD. Wykorzystuje protokół HTTP z formatem JSON. Charakteryzuje się wysoką prędkością przepustowości danych, zapewnia stabilność łącza, a także można wykorzystywać go na obrębie całej sieci LAN [4].
- Protobuf – biblioteka Google pozwalająca na tworzenie wspólnego dla języków oprogramowania sposobu serializacji danych strukturalnych. Za

jego pomocą tworzy się interfejsy opisujące struktury zbieranych danych. Używanie tej biblioteki pomaga na skonkretyzowaniu formy informacji na całym urządzeniu pomiarowym. Framework ten posiada duże wsparcie społeczności i czytelną dokumentację [5].

- SQLite – narzędzie umożliwiające wykorzystanie wieloformatowe, które zapewnia proste i wygodne tworzenie struktury bazodanowej. Framework ten charakteryzuje się wysoką niezawodnością, szybkością oraz funkcjonalnością pasującą do tworzonego systemu [6, 7].



Rys. 4. Wygląd aplikacji – wybór rodzaju aktywności, a także typu wykonywanych ćwiczeń



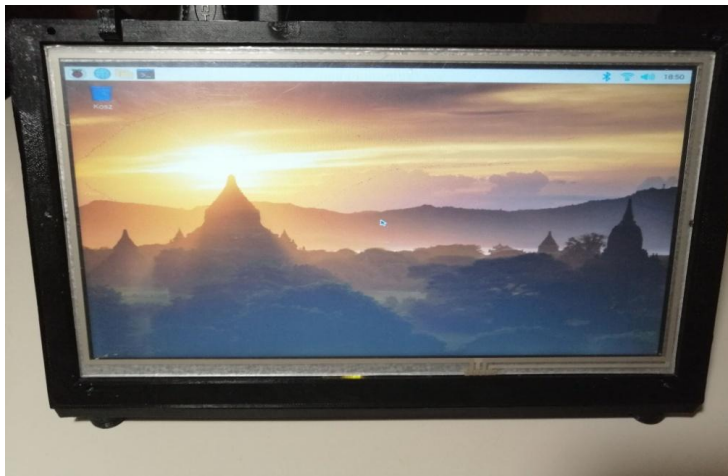
Rys. 5. Wygląd aplikacji – wykres do wizualizacji danych pozyskiwanych podczas badania

Stacja Diagnostyki:

- Python 3.9 ,
- gRPC 1.44.0 – framework wykorzystywany jako serwer w odróżnieniu od KD, gdzie występuje w roli klienta,
- Protobuf,
- Spirit – moduł z firmy STMicroelectronics, wykorzystywany do komunikacji bezprzewodowej między urządzeniami,
- STM32 – mikrokontrolery 32-bitowe oparte na procesorach Arm[®] Cortex[®]. Poprawne wykorzystanie kontrolera umożliwia efektywne zbieranie i wysyłanie danych, co w znaczny sposób spełnia się w powierzonych roli przekaźnika danych.



Rys. 6. Zdjęcie przedstawiające stację diagnostyczną – tył

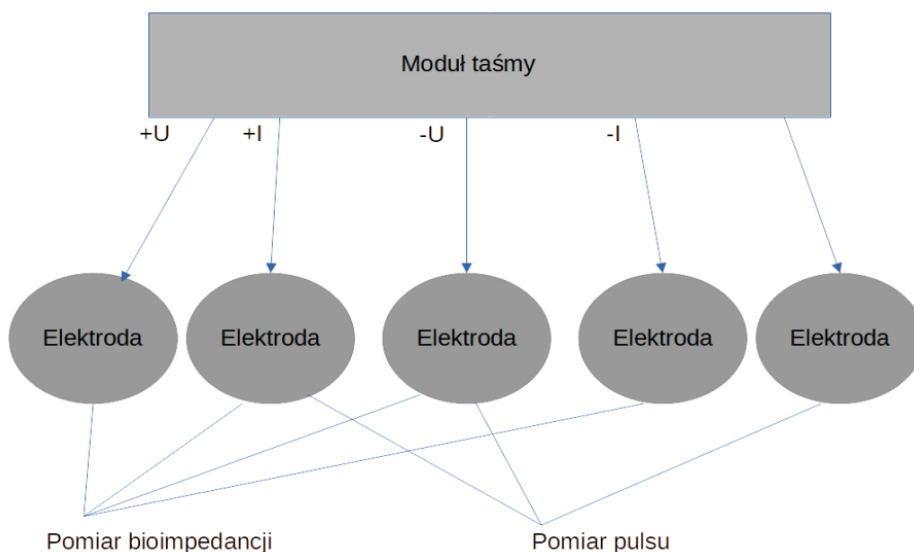


Rys. 7. Zdjęcie przedstawiające stację diagnostyczną – przód

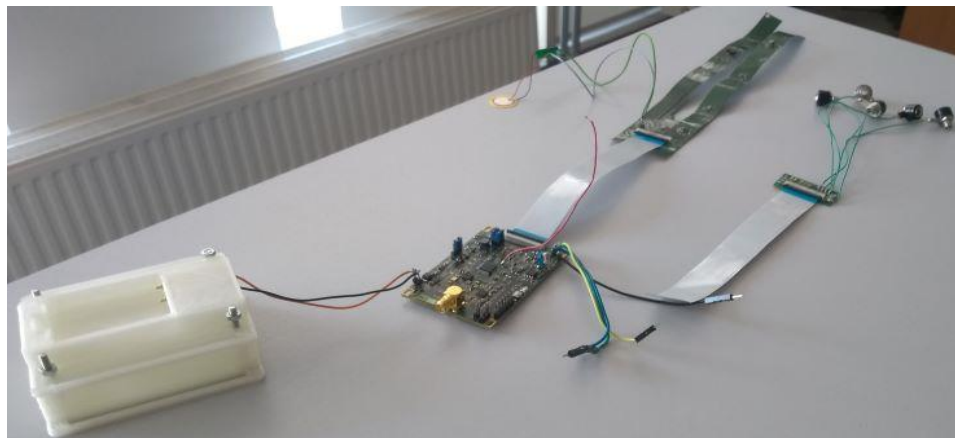
Moduł Akwizycji Danych:

- C – język programowania który, został wykorzystany do implementacji modułu, jakim jest STM32; odpowiadający za odbieranie rozkazów z KD, próbkowanie sygnałów z sensorów, a następnie przesłanie ich do SD za pomocą modułu Spirit,
- Spirit,
- STM32,
- MAX30301 – zintegrowany moduł przeznaczony do monitorowania pulsoksymetrii i tętna. Komunikacja urządzenia odbywa się za pomocą I2C.

Moduł posiada niskoszumową elektronikę, która ma bardzo mały wpływ na zakłócenia pozyskiwanych sygnałów. Na wyposażeniu jest także fotodetektory i elementy optyczne [8].



Rys. 8. Schemat taśmy pomiarowej – MAX30101a



Rys. 9. Moduł Akwizycji Danych z taśmą pomiarową

4. Klasyfikacja

Algorytm klasyfikacji pozyskiwanych sygnałów przez MAD podczas sesji treningowej w głównej mierze opierać się będzie na szczegółowej analizie charakterystyk poniższych sygnałów:

- EMG – jest to badanie mierzące odpowiedź mięśni lub elektrycznej aktywności w reakcji na stymulację nerwów mięśnia. Test wykorzystywany jest w diagnostyce zaburzeń nero-mięśniowych. Badanie przebiega z wykorzystaniem elektrod przyklejonych do skóry [9].
- Impedancja skóry – badanie opierające się na pomiarze oporności elektrycznej tkanek człowieka, zależącej między innymi od ilości wody i tłuszczu, przez które przepływa prąd o niskim natężeniu. Badanie to pozwala na oszacowanie zawartości wody w organizmie, a także szczegółowe określenie poszczególnych składowych masy ciała [10].
- Sztywność mięśni – badanie określane jako EMG, którego celem jest ocena funkcji układu mięśniowego, a także obwodowego układu nerwowego. Pozwala ustalić zmiany patologiczne w mięśniach, ich rozmiar, charakter oraz dynamikę procesu chorobowego [11].
- Przepływ krwi – badanie wykorzystujące fotopletyzmoğraf, za pomocą którego jest możliwe oszacowanie przepływu krwi w badanej części ciała; pozwala potwierdzić diagnozy dysfunkcji pracy układu krwionośnego [12].
- Tętno – badanie wykorzystujące fotopletyzmoğraf, które odpowiedzialne jest za pomiar ilości uderzeń serca w określonej jednostce czasu (liczba uderzeń na minutę). Za pomocą tej informacji możliwe jest określenie intensywności wysiłku fizycznego dla wykorzystywanej jednostki [13].

4.1. Przebieg badania

Badanie, które zostanie przeprowadzone na potrzeby niniejszego projektu, ma na celu zebranie powyżej opisanych sygnałów. Plan przebiegu eksperymentu:

1. Zebranie 20 osób w przedziale wiekowym 19–25 lat, z różnym zaawansowaniem sprawnościowym.
2. Przyłączenie czujników do dolnej partii pleców każdej z osób.
3. Przeprowadzenie pierwszej próby wysiłkowej: chód.
4. Odczekanie około 30 min. na odpoczynek.
5. Przeprowadzenie drugiej próby wysiłkowej: trucht.
6. Odczekanie około 30 min. na odpoczynek.
7. Przeprowadzonej ostatniej próby wysiłkowej: intensywny bieg.
8. Zebranie wszystkich danych uzyskanych podczas eksperymentu w postaci tabeli danych.

Cały przebieg, a także część diagnostyczna otrzymanych danych z badania, przeprowadzany jest pod nadzorem osób odpowiednio wykwalifikowanych z zakresu wiedzy o organizmie człowieka, a także jego wydolności. Za ich pomocą zostaną wytoczone wartości progowe świadczące o zaburzeniach pracy badanych elementów ciała człowieka.



Rys. 10. Elektrody umieszczone na taśmie pomiarowej

4.2. Progowanie danych

Dla każdej osoby biorącej udział w eksperymencie zostaną wyznaczone wskaźniki odnoszące się do wyżej opisywanych parametrów. Proces opracowywania markerów nastąpi w konsultacji z ekspertem z dziedziny fizjoterapii. Dane z próby chodu zostaną wykorzystane jako referencje, natomiast z truchtu i intensywnego biegu, pozwolą na znalezienie ekstremów w zakresie wydolności. Uwzględnione zostaną parametry biologiczne, jak i poziom zaawansowania aktywności fizycznej uczestników eksperymentu.

Następnym krokiem będzie powtórzenie badań z użyciem opracowanych wskaźników i weryfikacja ich trafności. W razie znaczących odchyień bądź w przypadku znaczącej poprawy wydolności danego ochotnika zostaną one na nowo wyznaczone.

Jednym z najtrudniejszych do osiągnięcia kamieni milowych jest opracowanie wspólnych charakterystyk mierzonych sygnałów z jednoczesnym

wykorzystaniem. Ustalenie wspólnego mianownika wszystkich sygnałów przyczyni się do poprawy skuteczności tego algorytmu. Ten system klasyfikacji sygnałów w dużej mierze opierać się będzie na pomiarze referencyjnym oraz uprzednio wyznaczonym wskaźnikiem wydolnościowym, opierającym się na wcześniejszych sesjach treningowych danej osoby. Ostrzeżenia przedurazowe w trakcie wykonywanego badania będą polegać na wielowarunkowej analizie wykrywania krytycznych wartości z odebranego sygnału. Kluczową kwestią opracowywania algorytmu klasyfikacji jest zwrócenie uwagi na powstawanie błędów z poprawnym nadaniem i odebraniem wartości, która może mieć negatywny wpływ na interpretację pozyskanych sygnałów.

5. Podsumowanie

Projekt systemu pomiarowego sygnałów biologicznych w diagnostyce obciążenia w sesjach treningowych sportowców został zrealizowany w następującym stopniu:

- oprogramowanie toru pomiarowego do badania EMG,
- przygotowanie toru pomiarowego do pomiaru impedancji skóry,
- badanie przepływu krwi i tętna w momencie opracowywania artykułu nie zostało zaimplementowane.

Udało się spełnić następujące założenia:

- wizualizacja danych,
- stabilność połączenia,
- możliwość zarządzania całym systemem z poziomu komputera diagnosty.

Następnym planowanym krokiem jest przeprowadzenie eksperymentu badawczego w celu opracowania charakterystyk sygnałów, które bezpośrednio będą elementem wzorcowym podczas tworzenia algorytmu klasyfikacji. Po opracowaniu zestawu klasyfikatorów nastąpią ich testy oraz ewentualne korekty, w celu udoskonalenia opracowanego rozwiązania.

Literatura

1. *Dokumentacja do wykorzystywanego narzędzia Kivy*, <https://kivy.org/doc/stable/>
2. *Matplotlib*, <https://matplotlib.org/stable/index.html>, dostęp 27.02.2022.
3. Barrett P., Hunter J., Miller J. T., Hsu J. C., Greenfield P., *matplotlib – A Portable Python Plotting Package*, ASP Conference Series Nr 347/2005, s. 91–95.
4. *gRPC*, <https://grpc.io/docs/>, dostęp 27.02.2022.
5. *ProtoBuf*, <https://developers.google.com/protocol-buffers/docs/overview>, dostęp 27.02.2022.

6. Md. Hossain I., Mahmud S., Santa T. D., *Oracle, MySQL, PostgreSQL, SQLite, SQL Server: Performance based competitive analysis*, Daffodil International University Dhaka, Bangladesh, April 2019.
7. *SQLite*, <https://www.sqlite.org/docs.html>, dostęp 27.02.2022.
8. *MAX30101 High-Sensitivity Pulse Oximeter and Heart-Rate Sensor for Wearable Health datasheets*, <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX30101.pdf>, dostęp 27.02.2022.
9. Johns Hopkins Medicine, *Electromyography (EMG)*, <https://www.hopkinsmedicine.org/health/treatment-tests-and-therapies/electromyography-emg>, dostęp 27.02.2022.
10. Serafin A., *Na czym polega badanie metodą impedancji bioelektrycznej?*, <https://www.mp.pl/pacjent/dieta/sport/126901,na-czym-polega-badanie-metoda-impedancji-bioelektrycznej>, dostęp 27.02.2022.
11. Poradnik zdrowie, *Elektromiografia (EMG) – badanie rozpoznające choroby mięśni. Na czym polega EMG?*, <https://www.poradnikzdrowie.pl/zdrowie/badania/elektromiografia-emg-badanie-rozpoznajace-choroby-miesni-na-czym-polega-aa-jwrc-czb5-Qjmt.html>, dostęp 27.02.2022.
12. Neubauer-Geryk J., Bieniaszewski L., *Metody oceny funkcji naczyń — pletyzmografia*, *Choroby Serca i Naczyń* Nr 4(6)/2009, s. 184–187.
13. UCSFHealth, *Medical Tests Pulse*, <https://www.ucsfhealth.org/medical-tests/pulse>, dostęp 27.02.2022.

Monika STYŁA

Uniwersytet Medyczny w Lublinie, Wydział Lekarski, Katedra i Zakład Biofizyki

WYBRANE ZAGADNIENIA DOTYCZĄCE SYMULACJI NUMERYCZNYCH NA PRZYKŁADZIE ANTENY DIPOLOWEJ W BLISKIM POLU Z UŻYCIEM PLATFORMY SIM4LIFE

1. Wstęp

Modelowanie numeryczne przy użyciu specjalistycznego oprogramowania coraz bardziej zyskuje na popularności nie tylko wśród naukowców, ale także przedstawiciele przemysłu. Główną zaletą wykonywania tego typu obliczeń jest oszczędność czasu i pieniędzy potrzebnych do tworzenia fizycznych modeli prototypów. Symulacje numeryczne stanowią bazę współczesnych badań naukowych niemal każdej dziedziny, jednak w pracy przedstawiony zostanie przykład wykorzystania modelowania numerycznego w analizie obecności anteny dipolowej w pobliżu fantomu płaskiego.

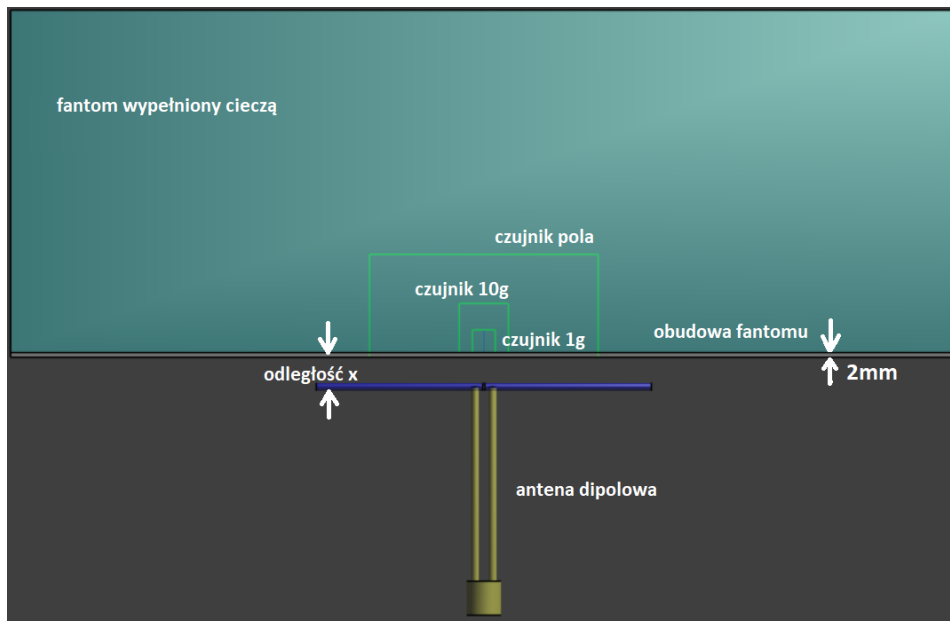
Tworzenie modeli geometrycznych, implementacja właściwości materiałów określająca warunki symulacji oraz analiza numeryczna zostały wykonane przy użyciu platformy Sim4Life (Zurich Med Tech) [19], w oparciu o algorytm FDTD. Jest to oprogramowanie szczególnie przydatne w branży biomedycznej z uwagi na rozbudowane moduły umożliwiające symulacje zjawisk mechanizmów biologicznych. Niniejsza praca zawiera opis wybranych zagadnień dotyczących sposobu modelowania stanowiska, składającego się z płaskiego fantomu wypełnionego płynem symulującym tkankę ludzką oraz symetrycznej anteny dipolowej umieszczonej w bliskim polu, przy częstotliwości 900 MHz. Omówiono także warunki symulacji oraz przedstawiono wyniki analizy numerycznej.

2. Budowa modelu geometrycznego

Opracowane stanowisko składa się z symetrycznej anteny dipolowej (pasma częstotliwości 900 MHz) oraz płaskiego fantomu wypełnionego cieczą o właściwościach takich, jak tkanka ludzka. Dla uproszczenia, fantom zaprojektowano jako prostopadłościan, w środku którego umieszczono trzy mniejsze – czujnik 1 g, 10 g oraz czujnik pola (rys. 1).

Powłoka fantomu ma grubość 2 mm, a odległość x fantomu od anteny wynosi 30 mm i 15 mm. Antena dipolowa składa się z dwóch przewodników (dipoli)

o tej samej długości, pomiędzy którymi znajduje linia – źródło wzbudzające antenę.



Rys. 1. Elementy stanowiska

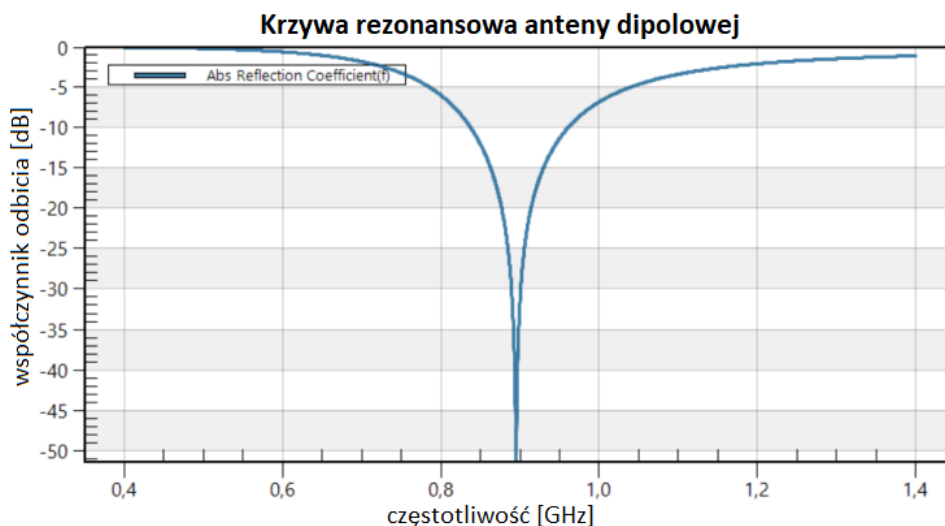
3. Symulacje – ustalanie odpowiednich warunków

Po zbudowaniu modeli geometrycznych należy wybrać rodzaj symulacji, a następnie określić (dobrać) właściwości materiałów. W przypadku zagadnienia analizowanego w niniejszej pracy, zalecany jest wybór metody różnic skończonych w dziedzinie czasu (ang. *Finite-Difference Time-Domain Method*, FDTD). Metoda ta wykorzystuje równania różniczkowe Maxwella do wyznaczenia dystrybucji pola elektromagnetycznego, którego rozkład jest niezbędny w zrozumieniu wyników symulacji i procesów zachodzących w układzie antena-fantom [15, 16]. Ponadto, warto zaznaczyć, że do określania współczynnika absorpcji swoistej (ang. *Specific Absorption Rate*, SAR) w organizmie człowieka norma IEEE/IEC62704-1 definiuje zastosowanie metody FDTD [7].

Wszystkim częściom anteny przypisano materiał PEC. Powłoka fantomu ma z kolei właściwości dielektryczne (przenikalność względna $\epsilon_r = 3,1$, gęstość: 1000 kg/m^3). Tę samą gęstość przypisano do płynu symulującego tkankę ludzką wypełniającego fantom. Do pozostałych właściwości płynu należą: przewodność elektryczna $\sigma = 0,97 \text{ S/m}$, przenikalność względna $\epsilon_r = 41,5$.

Kolejnym krokiem przygotowywania warunków symulacji było określenie warunków brzegowych. Do wzbudzenia źródła wybrano sygnał gaussowski. Zaś pozostałe warunki brzegowe ustalono na: częstotliwość 0,9 GHz, amplituda 1 V i rezystancja 50Ω . W pierwszej symulacji zastosowano grubą siatkę, która utworzyła w modelu blisko milion komórek. W celu poprawy jakości wyników symulacji, zdecydowano się w kolejnej symulacji nałożyć na model bardziej precyzyjną siatkę, z ponad 15 milionami komórek. Obarczyło to program dłuższym czasem obliczeń (jednak nie na tyle długim, by w tej opcji nie skorzystać).

Współczynnik odbicia jest wielkością złożoną, której wartość bezwzględna jest wskaźnikiem odbicia sygnału. Zapis $|S_{11}| = 0$ oznacza, że obwód jest idealnie dopasowany i żadna z padającej fali nie jest odbijana [10]. Wielkość wartości S11 jest określona przez wartość rezystancji (50Ω) anteny. Współczynnik odbicia mniejszy niż -10 dB oznacza stan, w którym 90% sygnałów jest pomyślnie przesyłanych, podczas gdy tylko 10% jest odbijane z powrotem. Na rysunku 2 przedstawiono krzywą rezonansową anteny dipolowej o wartości wynoszącej -50 dB dla częstotliwości 0,9 GHz.



Rys. 2. Krzywa rezonansowa anteny dipolowej

We wszystkich analizach, w których pojawia się pole elektromagnetyczne, warto zacząć od symulacji dystrybucji pola elektrycznego i magnetycznego. Jest to ważny krok w zrozumieniu istoty zagadnienia poddanego analizie. W niniejszej pracy wykonane zostały analizy rozkładu tych pól w układzie antena-fantom, których wyniki przedstawiono na poniższych rysunkach.

Najistotniejszą z punktu widzenia tematyki poruszonej w pracy jest analiza rozkładu współczynnika absorpcji swoistej SAR wewnątrz fantomu. Można go wyliczyć z ogólnego wzoru:

$$SAR = \frac{\sigma}{2\rho} E^2, \quad (1)$$

gdzie σ to przewodność elektryczna [S/m], ρ to gęstość [kg/m³], a E to wartość natężenia pola elektrycznego [V/m].

SAR jest współczynnikiem stanowiącym jednostkę miary energii promieniowania radiowego, jaką pochłania ciało znajdujące się w pobliżu źródła tego promieniowania (np. w trakcie rozmowy przez telefon komórkowy, w czasie pracy w pobliżu telekomunikacyjnych anten nadawczych lub badań wykorzystujących zjawisko magnetycznego rezonansu jądrowego) [21].

SAR można wyznaczyć dla całego badanego obiektu (np. całego ciała człowieka) bądź jego części (np. głowy lub kończyny), zazwyczaj 1 g lub 10 g. Norma IEEE/IEC62704-1 określa, że miejscowa bezpieczna wartość SAR dla głowy i tułowia człowieka wynosi 2 W/kg, przy czym średnia wartość graniczna wynosi 3,2 W/kg.

4. Wyniki symulacji

Ogólnie rzecz biorąc, przebywanie w bliskiej odległości od źródeł pola elektromagnetycznego powoduje bardzo nierównomierne osadzanie się i rozkład energii w ciele, co należy ocenić za pomocą pomiaru i obliczeń dozymetrycznych. W związku z tym zdecydowano się zacząć od symulacji rozkładu pól elektrycznego i magnetycznego.

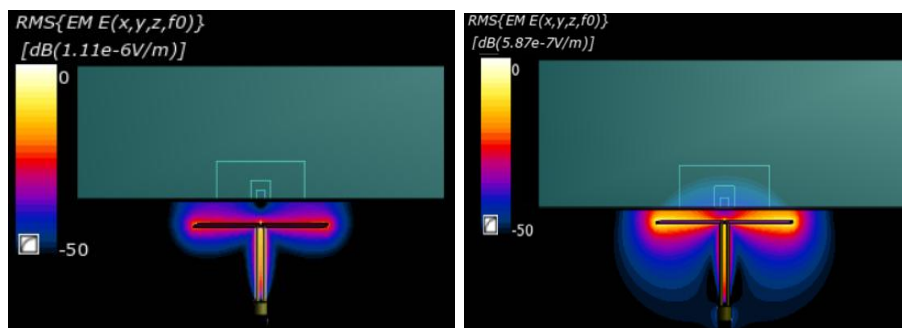
4.1. Symulacje pola elektrycznego i magnetycznego

Zgodnie z zasadą wzajemnego oddziaływania pól elektromagnetycznych, źródła umieszczone wewnątrz obiektu wytwarzają całkowite pole elektromagnetyczne symulujące pole wzbudzone na zewnątrz obiektu, natomiast źródła umieszczone na zewnątrz obiektu wytwarzają całkowite pole elektromagnetyczne symulujące pole wzbudzone wewnątrz obiektu [11].

Na rysunku 3 zilustrowano całkowity rozkład pola elektrycznego wokół anteny dipolowej. Maksymalne natężenie pola elektrycznego obejmuje skrajne części dipoli i jego wartość wynosi $1,11 \cdot 10^{-6}$ V/m, gdy antena znajduje się w odległości 30 mm od fantomu (rys. 3a). Niższa maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego występuje w przypadku (rys. 3b) mniejszej odległości anteny od fantomu ($5,87 \cdot 10^{-7}$ V/m), jednak widoczne jest tutaj spektrum pola elektrycznego również w fantomie, obejmujące także w całości czujniki 1 g oraz

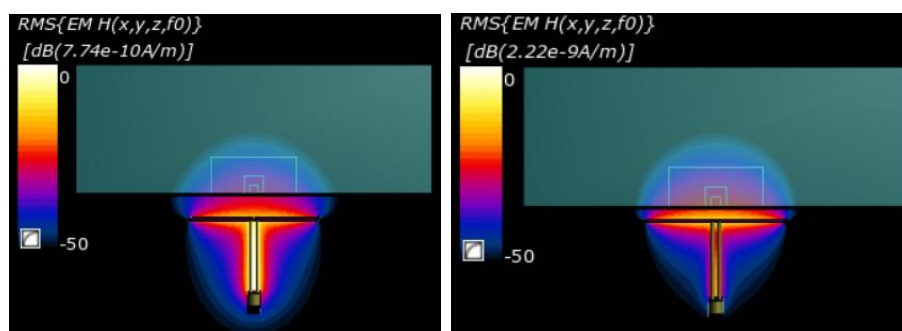
10 g. Równie duża wartość natężenia zawarta jest pomiędzy dwoma odgałęzieniami anteny.

Jak widać na rysunku 3a, siła pola elektromagnetycznego maleje wraz z odległością od anteny i praktycznie nie obejmuje fantomu. Zwiększenie odległości między fantomem a anteną powoduje, że natężenie pola elektrycznego wewnątrz fantomu będzie znikome.



Rys. 3. Całkowity rozkład natężenia pola elektrycznego wokół anteny dipolowej w odległości:
a) 30 mm od fantomu, b) 15 mm od fantomu

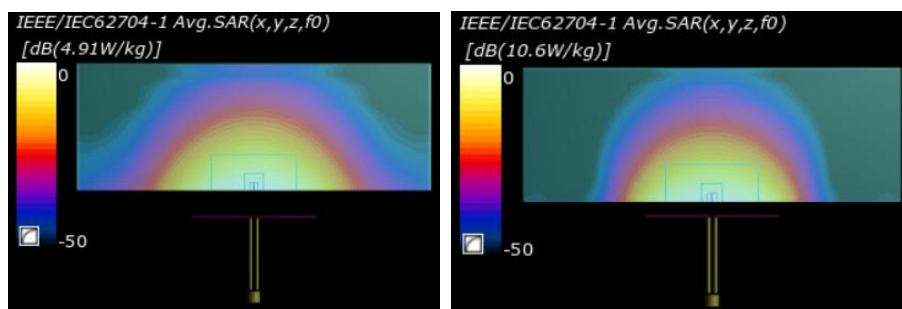
W polu bliskim dobrze widoczne są zarówno struktury pola elektrycznego (rys. 3), jak i magnetycznego (rys. 4). Maksymalne natężenie pola magnetycznego występuje, gdy antena znajduje się w odległości 15 mm od fantomu (rys. 4b) i jego wartość wynosi $7,74 \cdot 10^{10}$ A/m. Wraz z oddalaniem się anteny od fantomu natężenie pola magnetycznego spada (maksymalna wartość wynosi $2,22 \cdot 10^9$ A/m). Maksymalne natężenie pola magnetycznego występuje wokół całej anteny, a spektrum obejmuje także część fantomu z czujnikami i jest niemalże identyczne w obu przypadkach. Dodatkowo, widmo pola magnetycznego zawiera fantomy identycznie dla obu częstotliwości.



Rys. 4. Całkowity rozkład natężenia pola magnetycznego wokół anteny dipolowej w odległości:
a) 30 mm od fantomu, b) 15 mm od fantomu

4.2. Symulacje współczynnika absorpcji liniowej

Podczas szacowania SAR, antena dipolowa umieszczona była na tle płaskiego fantomu. Wyniki symulacji przedstawione są na rysunku 5. Szczytową średnią wartość SAR obliczono w miejscu o największym współczynniku absorpcji w całym fantomie, który zwykle znajduje się najbliżej źródła, anteny dipolowej. Jest to miejsce, w którym celowo zaprojektowano czujniki 1 g i 10 g. Wykonano symulacje rozkładu SAR wewnątrz całego fantomu w dwóch różnych odległościach między anteną a fantomem (30 mm oraz 15 mm). W przypadku rozkładu natężenia pola magnetycznego, maksymalna wartość SAR w fantomie występuje w pobliżu anteny (rys. 5b) i wynosi 10,6 W/kg, gdy antena znajduje się blisko fantomu. Nieco niższa wartość (4,91 W/kg) to maksimum SAR dla odległości 30 mm od fantomu od anteny (rys. 5a).



Rys. 5. Rozkład SAR wokół anteny dipolowej w odległości: a) 30 mm od fantomu, b) 15 mm od fantomu

Zgodnie z normą IEEE/IEC62704-1 [7] bezpieczny limit SAR wynosi 2 W/kg uśrednione na 10 g tkanki pochłaniającej. W przypadku analizowanym w niniejszym artykule bezpieczna dla człowieka wartość jest znacznie przekroczona. Zwiększenie odległości między fantomem i anteną może zmniejszyć wartość SAR.

5. Podsumowanie

Projekt anteny dipolowej i fantomu płaskiego przedstawiony w niniejszym artykule został wykonany z użyciem platformy Sim4Life. Symulacje elektromagnetyczne i analizy, w tym symulacja rozkładu współczynnika absorpcji właściwej, przeprowadzono dla częstotliwości pracy anteny 0,9 GHz, w dwóch odległościach pomiędzy anteną a fantomem. Całkowity rozkład pola elektromagnetycznego wokół anteny i wewnątrz fantomu wskazuje, że pole elektryczne koncentruje się głównie wokół dipoli i końcówek anteny, podczas gdy pole magnetyczne koncentruje się wzdłuż całej anteny. Dystrybucja SAR wewnątrz

całego fantomu została opracowana w oparciu o zalecenia zawarte w standardzie IEEE/IEC62704-1. Zgodnie z przedstawionymi wynikami i uwagami omówionymi powyżej można przyjąć, że lokalny i średni SAR indukowany pod wpływem promieniowania z anteny dipolowej wewnątrz fantomu płaskiego zależy od częstotliwości rezonansowej anteny oraz odległości anteny od fantomu. Z analizowanych w pracy przykładów wynika, że umieszczenie anteny zbyt blisko fantomu powoduje bardzo wysoką wartość SAR, znacznie przekraczającą dopuszczalne limity.

Literatura

1. Alekseev S.I., Radzievsky A.A., Szabo I., Ziskin M.C., *Local heating of human skin by millimeter waves: Effect of blood flow*, Bioelectromagnetics Nr 26(6)/2005, s. 489–501.
2. Andrenko A., Shimizu Y., Wake K., *SAR Measurements of UHF RFID Reader Antenna Operating in Close Proximity to a Flat Phantom*, IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA), Włochy 2019.
3. Balzano Q., Garay O., Jr T.J., *Electromagnetic Energy Exposure of the Users of Portable Cellular Telephones. Vehicular Technology*, IEEE Transactions on Vehicular Technology Nr 44(3)/1995, s. 390–403.
4. Bonato M., Dossi L., Gallucci S., Benini M., Tognola G., Parazzini M., *Assessment of Human Exposure Levels Due to Mobile Phone Antennas in 5G Networks*. International Journal of Environmental Research and Public Health Nr 19(3)/2022, s. 1546.
5. Colombi D., Thors B., Törnnevik C., Balzano Q., *RF Energy Absorption by Biological Tissues in Close Proximity to Millimeter-Wave 5G Wireless Equipment*. IEEE Access Nr 6/2018, s. 4974–4981.
6. Hirata A., *Human exposure to radiofrequency energy above 6 GHz: review of computational dosimetry studies*, Physics in Medicine and Biology Nr 66(8)/2021, s. 08TR01.
7. *ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*, Health Physics Nr 74(4)/1998, s. 494–522.
8. Kuster N., Balzano Q., *Energy absorption mechanism by biological bodies in the near field of dipole antennas above 300 MHz*, IEEE Transactions on Vehicular Technology Nr 41(1)/1992, s.17–23.
9. Kuster N., Kastle R., Schmid T., *Dosimetric Evaluation of Handheld Mobile Communications Equipment with Known Precision*, EICE Transactions on Communications Nr E80-B(5)/1997, s. 645–652.
10. Papakanellos P.J., Nanou E.D., Sakka N.I., Tsiafakis V.S.G., *Near field interaction between a brain tissue equivalent phantom and a dipole antenna*, 2nd International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields, 2001.
11. Riu P.J., Foster K., *Heating of tissue by near-field exposure to a dipole: A model analysis*, IEEE transactions on biomedical engineering Nr 46(8)/1999, s. 911–917.

12. Schmid T., Egger O., Kuster N., *Automated E-field scanning system for dosimetric assessments*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques Nr 44(1)/1996, s. 105–113.
13. Stutzmann W.L., Thiele G.A., *Antenna Theory and Design*, John Wiley & Sons, Hoboken 2012.
14. Thors B., Colombi D., Ying Z., Bolin T., Törnevik C., *Exposure to RF EMF From Array Antennas in 5G Mobile Communication Equipment*, IEEE Access Nr 4/2016, s. 7469–7478.
15. Umashankar K., Taflove A., *A Novel Method to Analyze Electromagnetic Scattering of Complex Objects*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility Nr EMC-24(4)/1982, s. 397–405.
16. Yee K., *Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation Nr 14(3)/1966, s. 302–307.
17. Yu Q., Gandhi O.P., Aronsson M., Wu D., *An automated SAR measurement system for compliance testing of personal wireless devices*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility Nr 41(3)/1999, s. 234–245.
18. Ziskin M., Alekseev S., Foster K., Balzano Q., *Tissue models for RF exposure evaluation at frequencies above 6 GHz*, Bioelectromagnetics Nr 39(3)/2018, s. 173–189.
19. *SIM4LIFE zurich med tech*, <https://zmt.swiss/sim4life/>, dostęp 20.05.2022.
20. *Specific Absorption Rate (SAR) For Cell Phones: What It Means For You*, <https://www.fcc.gov/consumers/guides/specific-absorption-rate-sar-cell-phones-what-it-means-you>, dostęp 20.05.2022.
21. *EMF – zrozumieć współczynnik SAR – L2*, <http://www.emfexplained.info/>, dostęp 20.05.2022.

ARCHITEKTURA APLIKACJI STERUJĄCEJ PLATFORMĄ ROBOTYCZNĄ

1. Wstęp

Utworzenie działającego robota jest procesem wieloetapowym. Wiele robotów sterowanych jest autonomicznie lub częściowo autonomicznie, co oznacza, że maszyna albo wykonuje zadania w pełni samodzielnie, albo częściowo samodzielnie pod okiem człowieka. W wypadku robotów niesamodzielnych, jednym z kluczowych elementów platformy robotycznej jest aplikacja sterująca, której utworzenie wymaga ścisłej integracji z samą platformą. To z kolei wymaga podjęcia odpowiednich decyzji we wczesnych stadiach projektowania całokształtu robota. Docelowo, aplikacja sterująca w odczuciu użytkownika końcowego ma być naturalną oraz spójną częścią platformy robotycznej.

Możliwe jest utworzenie oprogramowania platformy, jak również aplikacji sterującej własnoręcznie, ale jest to dość długi i żmudny proces. W takim wypadku konieczne jest jednocześnie oprogramowanie całości robota, jak również kanału komunikacji, sposobu kontroli, przesyłu i serializacji danych oraz interfejsu aplikacji sterującej. Dodatkowo, opracowanie oprogramowania jednoosobowo wiąże się z dodatkowymi utrudnieniami, takimi jak konieczność tworzenia własnych narzędzi do rozwiązywania problemów.

Rozwiązaniem tego zagadnienia jest utworzenie zarówno aplikacji sterującej, jak i reszty platformy używając, wybranego istniejącego frameworka jako podstawy, w celu uniknięcia konieczności projektowania całości. Podejście to umożliwia wykorzystanie efektu lat doświadczenia, testowania i ekspertyzy autorów wspomnianego modelu, unikając jednocześnie częstych pomyłek popełnianych przez nawet doświadczonych programistów oprogramowania sterującego, co pozwala na szybsze osiągnięcie celów projektowych.

W niniejszym artykule opisany zostanie system ROS jako przykład specyfikacji architekturowej dla platform robotycznych, proces wytwarzania aplikacji sterującej robotem, powiązanych z tym decyzji dotyczących zarówno aplikacji jak i robota oraz często spotykane problemy decyzyjne i projektowe.

2. Wprowadzenie do ROS

ROS jest zestawem bibliotek, algorytmów, sterowników oraz specyfikacji wspomagających wytwarzanie oprogramowania kontrolującego robota o otwartej architekturze. W tym rozdziale omówiony zostanie sposób działania ROS oraz elementarne koncepty dotyczące komunikacji i współpracy modułów robota z aplikacją sterującą oraz innymi modułami.

2.1. Architektura ROS

ROS ma architekturę rozproszoną. Wszystkie części funkcjonalne robota, takie jak algorytmy rozpoznające otoczenie, sensory, silniki, są zamiennymi komponentami tej infrastruktury, nazywane w specyfikacji „węzłami”, co narzuca projektowanie robota jako jednostki modularnej.

Projektowanie platformy robotycznej w sposób modułarny ma wiele korzyści. Jedną z nich jest możliwość zmiany sprzętu bez konieczności wprowadzania szeroko zakrojonych zmian w oprogramowaniu sterującym. Dzięki temu, że każdy moduł jest oddzielny, autor zmuszony jest uogólnić interfejs dostępowy danego modułu tak, aby nie upubliczniać parametrów zależnych od konkretnego modelu sprzętu, na przykład silnika.

Sam ROS jest zestawem bibliotek zarówno niskopoziomowych dla samego robota oraz wysokopoziomowych dla komputera sterującego, co umożliwia jego wykorzystanie w wielu językach programowania, zależnie od wyboru użytkownika. Jedną z charakteryzujących go cech jest prosty system definiowania typów, czyli wiadomości wymienianych przez moduły platformy. Wiadomości są definiowane jako proste listy pól w pliku tekstowym, co umożliwia ich późniejsze przekształcenie w struktury natywne dla konkretnego języka i łatwą serializację. Oznacza to, że moduły napisane w różnych językach są kompatybilne.

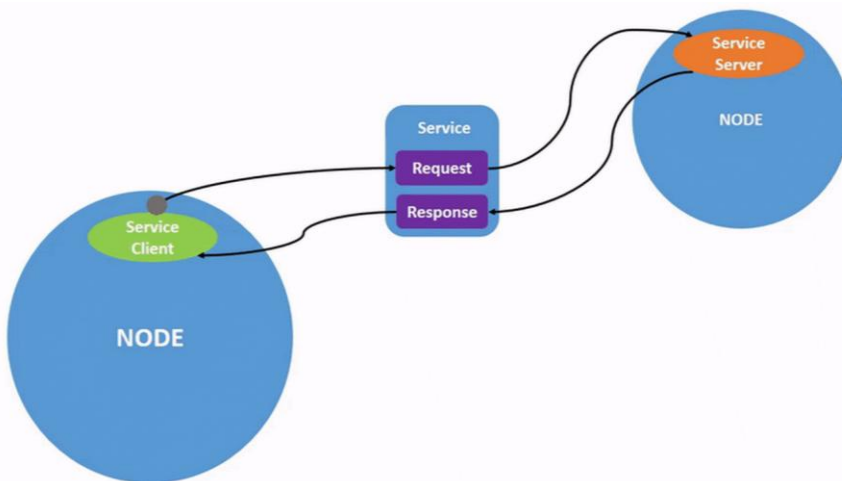
Jednocześnie, warto zauważyć, że ROS1 oraz jego biblioteki nie wspierały trybu pracy w twardym czasie rzeczywistym [7] (ang. *hard real-time*). To oznacza, że nie był znany maksymalny czas odpowiedzi na dane żądanie, co uniemożliwiało wykorzystanie ROS w systemie operacyjnym czasu rzeczywistego. Ten problem został zaadresowany w specyfikacji ROS2 [8–10], gdzie system może zostać przystosowany do pracy w czasie rzeczywistym z użyciem dodatkowych opcji konfiguracyjnych.

2.2. Komunikacja w ROS

ROS znacznie upraszcza tworzenie architektury komunikacyjnej dla robotów poprzez definiowanie typów wymiany wiadomości oraz pełną obsługę odkrycia, serializacji oraz transportu wiadomości. To oznacza, że programista robota nie

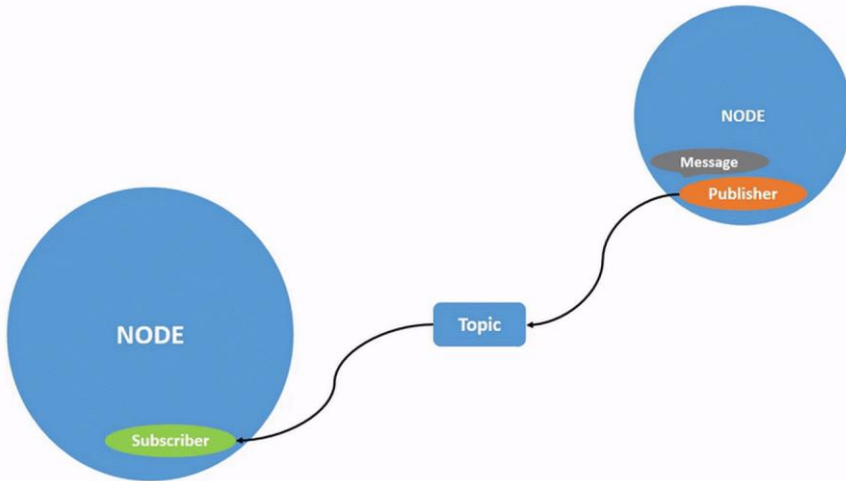
musi trudzić się zapewnieniem niezawodnych kanałów komunikacji ani mechanizmu prototypowania wiadomości, ponieważ całością tego procesu zajmuje się framework ROS. To z kolei daje pewność, że proces ten został dogłębnie przetestowany przez istniejących użytkowników frameworku, zmniejszając w ten sposób ryzyko wprowadzenia trudnych do zdiagnozowania błędów.

Usługi ROS są najprostszą metodą wymiany informacji, ponieważ zachowują się one jak wszystkie inne serwery usług w ekosystemie IT. Wywołanie danego zachowania w usłudze odbywa się poprzez wysłanie do niego zapytania, w odpowiedzi na które otrzymuje się informację zwrotną z żądanymi danymi. W przypadku ROSa, usługi są wykorzystywane do krótkotrwałych lub natychmiastowych czynności, takich jak wysunięcie wysięgnika z ramieniem, włączenie lub wyłączenie lamp, pobranie ostatniego zdjęcia z kamery pokładowej lub ustawienie maksymalnej prędkości silnika.



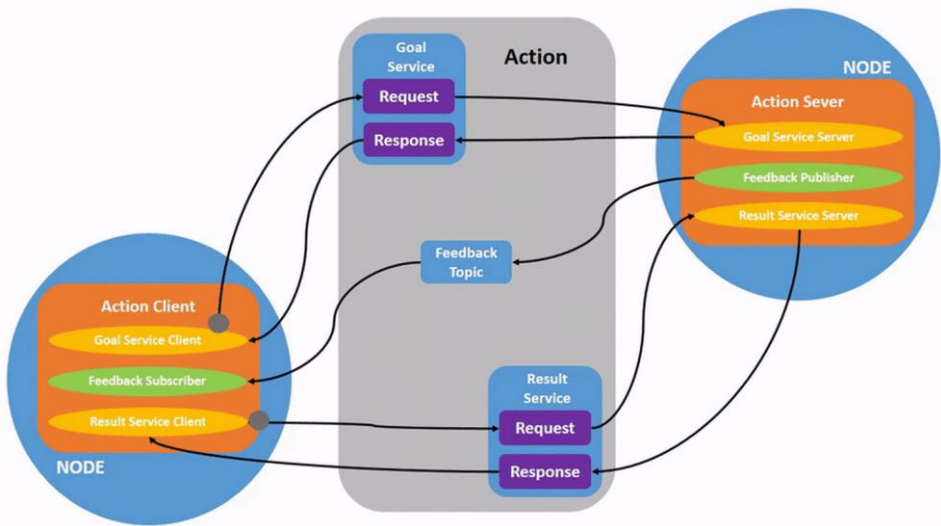
Rys. 1. Przykładowy graf ROS ilustrujący działanie usług w ekosystemie ROS [1]

Tematy ROS są jednostronną formą wymiany informacji. Każdy temat w systemie ROS posiada dwie strony – jednego producenta oraz dowolną liczbę konsumentów. Producent publikuje wiadomości do tematu, a konsumenci je otrzymują i przetwarzają wedle własnych potrzeb. Takie zachowanie ma także inne popularne miano. Jest to kolejka wiadomości, czyli model *pub-sub*. Tematy w ROSie są wykorzystywane do ciągłego udostępniania danych z danego modułu, na przykład strumienia wideo z kamery pokładowej, okresowych odczytów z modułu badawczego lub lokalizacji GPS.



Rys. 2. Przykładowy graf ROS ilustrujący działanie tematów w ekosystemie ROS [1]

Akcje w ROS są dalekim kuzynem usług. Akcje wykonywane są na żądanie, tak jak w przypadku usług oraz zwracają informację zwrotną. Dzieje się to jednak w formie „obietnicy”, którą w każdej chwili można anulować. Przykładem jest żądanie przemieszczenia się robota do konkretnej lokalizacji GPS. Takie zadanie może potrwać bardzo długo, w związku z czym, nawigacja może zostać anulowana zarówno przez jednostkę wydającą rozkaz, jak i jednostkę przyjmującą.



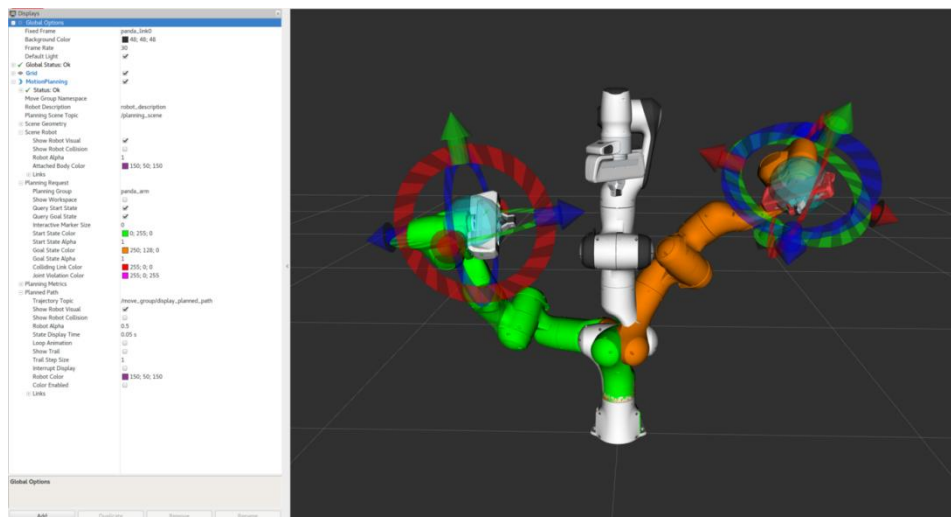
Rys. 3. Przykładowy graf ROS ilustrujący działanie akcji w ekosystemie ROS [1]

Wiadomości w ekosystemie ROS są definiowane jako małe pliki tekstowe zawierające listę pól zawartych w danej wiadomości wraz z typem danych. Typy te są później wczytywane, a następnie struktury natywne dla języka używanego przez programistę są generowane przez generatory kodu zawarte w bibliotece klienckiej ROS. Pozwala to na tworzenie wiadomości raz dla wszystkich języków i platform powiązanych z danym projektem, bez konieczności ręcznej implementacji typów danych dla każdego języka oddzielnie. Ułatwia to interoperacyjność między kodem tworzonym przez twórcę robota a kodem modułów dostarczonych przez osoby trzecie lub innych członków zespołu. Pozwala to, na przykład, na wykorzystanie języka Python w komputerze pokładowym oraz C/C++ w mikrokontrolerze sterującym silnikiem, i używanie tych samych definicji wiadomości w celu wymiany danych między silnikiem a komputerem pokładowym.

2.3. Narzędzia ROS

ROS jako zestaw bibliotek oferuje również narzędzia do symulacji, testowania i rozwiązywania problemów z tworzonym przez nas robotem, co znacznie upraszcza proces wdrażania nowych funkcji. Jednym z takich narzędzi jest rviz – wizualizator 3d pozwalający na odwzorowanie na ekranie obecnej pozycji robota oraz danych z sensorów i informacji o wewnętrznym stanie oprogramowania. Używając rviz-a można „zobaczyć świat oczami robota” i dogłębnie przyjrzeć się jego zachowaniu w danej sytuacji.

Bez wykorzystania gotowej platformy wyposażonej w narzędzia diagnostyczne, utworzenie takiego narzędzia byłoby zadaniem dla twórców robota wymagałoby dodatkowego wkładu pracy oraz podjęcia ryzyka wprowadzenia błędów w narzędziu diagnostycznym, co uniemożliwiłoby diagnostykę robota.



Rys. 4. Podgląd przykładowego okna programu rviz [6]

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe okno programu rviz. Należy zauważyć model 3d robota w jego obecnym symulowanym stanie (po prawej) oraz okno opcji (po lewej) pozwalające na włączenie, wyłączenie oraz skonfigurowanie wizualizowanych warstw danych.

Innym narzędziem pozwalającym na diagnozowanie problemów z robotem jest ros2doctor. Pozwala ono przeprowadzić pełną diagnostykę łączności platformy, wersji, aktywnych modułów i informuje o wszystkich wykrytych nieprawidłowościach. Raport z narzędzia może zawierać ostrzeżenia. Oznaczają one, że ros2 informuje o niepoprawnym skonfigurowaniu. Nie jest to błąd uniemożliwiający użycie robota. Przeprowadzanie takiej diagnostyki ręcznie, w szczególności w projekcie z dużą ilością modułów, byłoby zadaniem żmudnym i czasochłonnym, ponieważ wymagałoby testowania łączności między każdym modułem osobno, ręcznego sprawdzenia wartości konfiguracji czy zgodności wersji oprogramowania każdego modułu z każdym innym.

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy wynik uruchomienia narzędzia ros2doctor. Należy zauważyć, że pomimo szeregu ostrzeżeń, program na koniec informuje użytkownika, że wszystkie testy zostały ukończone sukcesem. Jest to celowe, ponieważ to użytkownik musi zdecydować, czy dane ostrzeżenie świadczy o niepożądanym zachowaniu. Jest tak, ponieważ istnieje wiele ostrzeżeń „kontrolnych”, na przykład informacji o tym, że używamy wersji ROSa, która nie posiada obecnie wsparcia technicznego. Nie są to krytyczne problemy uniemożliwiającymi korzystanie z platformy, ale są to informacje, które warto mieć na uwadze.

```
stanoj@stanoj-Allinore-Area-516:~/ros2_dev_ws$ ros2 doctor
/opt/ros/foxy/lib/python3.8/site-packages/ros2doctor/api/package.py: 112: UserWarning: turtlebot3 has been updated to a new version. local: 2.1.0 < required: 2.1.1
/opt/ros/foxy/lib/python3.8/site-packages/ros2doctor/api/package.py: 112: UserWarning: turtlebot3_teleop has been updated to a new version. local: 2.1.0 < required: 2.1.1
/opt/ros/foxy/lib/python3.8/site-packages/ros2doctor/api/package.py: 112: UserWarning: turtlebot3_bringup has been updated to a new version. local: 2.1.0 < required: 2.1.1
/opt/ros/foxy/lib/python3.8/site-packages/ros2doctor/api/package.py: 112: UserWarning: turtlebot3_node has been updated to a new version. local: 2.1.0 < required: 2.1.1
/opt/ros/foxy/lib/python3.8/site-packages/ros2doctor/api/package.py: 112: UserWarning: turtlebot3_navigation2 has been updated to a new version. local: 2.1.0 < required: 2.1.1
/opt/ros/foxy/lib/python3.8/site-packages/ros2doctor/api/package.py: 112: UserWarning: turtlebot3_example has been updated to a new version. local: 2.1.0 < required: 2.1.1
/opt/ros/foxy/lib/python3.8/site-packages/ros2doctor/api/package.py: 112: UserWarning: turtlebot3_description has been updated to a new version. local: 2.1.0 < required: 2.1.1
/opt/ros/foxy/lib/python3.8/site-packages/ros2doctor/api/package.py: 112: UserWarning: turtlebot3_cartographer has been updated to a new version. local: 2.1.0 < required: 2.1.1
/opt/ros/foxy/lib/python3.8/site-packages/ros2doctor/api/package.py: 124: UserWarning: Cannot find required versions of packages: tutorial_interfaces my_package2 my_package_cpp
brvc11 cpp_pubsub cpp_parameters karto_sdk

All 4 checks passed
```

Rys. 5. Przykładowy wynik uruchomienia narzędzia ros2doctor [5]

3. Architektura aplikacji

Aby móc rozmawiać o architekturze aplikacji, należało najpierw omówić architekturę robota, z którym ta aplikacja będzie współpracować. Mając już części składowe platformy za sobą, można przyjrzeć się samej aplikacji sterującej. Aplikacja sterująca jest programem odbierającym dane informacyjne z robota oraz wysyłającym odpowiednie komendy do robota. W związku z tym, aplikacja sterująca powinna zawierać bibliotekę wspierającą ROS do integracji z istniejącym robotem oraz framework interfejsu użytkownika np. Qt [4], w celu wyświetlania otrzymanych danych z robota oraz przyjmowaniu komend od operatora.

Kontroler robota powinien również posiadać wsparcie dla typów wejścia adekwatnych do typów ruchów, jakie można wykonywać. Przykładowo, możliwość ruszenia ramieniem robota koniecznie musi wspierać wykorzystanie joysticka lub innego wejścia analogowego, aby ruszyć ramię wolniej lub szybciej, w zależności od tego, jak mocno przechylimy joystick. Dla użytku amatorskiego może to być kontroler od konsoli do gier, natomiast w przypadku robotów przemysłowych z reguły będzie to dedykowany pilot. W obydwu przypadkach, aplikacja sterująca musi ten kontroler rozpoznać oraz umieć przyjąć od niego wejście.

Aplikacja sterująca może przyjąć też formę aplikacji webowej, to znaczy, strony w przeglądarce wymieniającej na żywo dane z serwerem na stacji bazowej, który z kolei kontroluje robota. Warto wtedy jednak zaznaczyć, że takie rozwiązanie wiąże się z dodatkowym opóźnieniem oraz większym nakładem pracy w jej utworzeniu. Zyskuje się wtedy dostęp do tej aplikacji z dowolnej platformy wspierającej przeglądarki internetowej, czyli również urządzeń mobilnych.

4. Podsumowanie

Tworzenie robotów oraz oprogramowania do nich nie jest łatwym zadaniem. W celu ułatwienia pracy programistom robotów, wprowadzono wiele gotowych rozwiązań pozwalających pomijać rozwiązywanie zagadnień projektowania platformy robotycznej, które zazwyczaj są najbardziej skomplikowanymi i czasochłonnymi, gotowymi rozwiązaniami przetestowanymi w praktyce przez tysiące innych użytkowników. Omówienie architektury aplikacji sterującej wymagało wpieryw dogłębnego omówienia struktury robota, z którym ta aplikacja ma współpracować. Zakładając, że używany jest w tym celu ROS, utworzenie aplikacji sterującej staje się znacznie łatwiejsze, ponieważ może ona wykorzystać sprawdzone i niezawodne formy komunikacji z robotem.

Literatura

1. *Dokumentacja ROS*, <https://docs.ros.org/en/galactic/index.html>, dostęp 13.01.2021.
2. *Dokumentacja Rviz*, <http://wiki.ros.org/rviz>, dostęp 13.01.2021.
3. *Dokumentacja ros2doctor*, <https://docs.ros.org/en/galactic/Tutorials/Getting-Started-With-Ros2doctor.html>, dostęp 13.01.2021.
4. *Framework Qt*, <https://www.qt.io/>, dostęp 13.01.2021.
5. *ROS2 ros2doctor*, <https://hybridego.net/entry/ROS2-ros2doctor?category=922045?category=922045>, dostęp 13.01.2021.
6. *Rviz on docker*, <https://medium.com/intro-to-artificial-intelligence/rviz-on-docker-bd4d0fca5b>, dostęp 29.08.2020.

Aleksander CHUDY

Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Elektrotechniki i Elektrotechnologii

MASZYNY ELEKTRYCZNE STOSOWANE W SAMOCHODACH ELEKTRYCZNYCH I HYBRYDOWYCH

1. Wstęp

W ostatnim czasie pojazdy elektryczne stają się coraz bardziej popularnym środkiem transportu. Zależność od ropy naftowej, jako źródła energii dla samochodów osobowych, ma konsekwencje gospodarcze i polityczne. Ponieważ obawy dotyczące wyczerpywania się i bezpieczeństwa dostaw ropy naftowej pozostają tak samo poważne jak zawsze, i w obliczu konsekwencji zmiany klimatu spowodowanej emisją gazów cieplarnianych z rur wydechowych pojazdów z silnikami spalinowymi, świat coraz częściej poszukuje alternatyw dla tradycyjnych technologii transportu drogowego.

Pojazdy w pełni elektryczne mają nieporównywalną przewagę nad konwencjonalnymi pojazdami z silnikami spalinowymi pod względem oszczędności energii, niższych emisji hałasu oraz zerowej emisyjności gazów cieplarnianych, co prowadzi do zainteresowania szerokiego grona producentów samochodów i rządów. Obecnie dostępne są oferty samochodów elektrycznych od prawie wszystkich głównych producentów samochodów, w tym Forda, Nissana, Hondy, BMW, Renault, Volkswagena i innych.

Silniki elektryczne są istotnymi elementami układów napędowych samochodów elektrycznych i hybrydowych. W ciągu ostatnich kilku lat w większości napędów trakcyjnych wykorzystywane są pewne formy maszyn z magnesami trwałymi. Istnieje coraz większa tendencja do poprawy gęstości mocy i sprawności maszyn trakcyjnych, co prowadzi do innowacyjnych projektów i ulepszeń podstawowych topologii oraz do pojawienia się nowych klas maszyn. Tylko kilku producentów pojazdów elektrycznych opublikowało literaturę techniczną na temat konstrukcji maszyn stosowanych w ich produktach. Nawet jeśli publikuje się artykuły techniczne na ten temat, szczegóły projektu nie są w pełni ujawniane. Większość tego, co wiadomo o maszynach elektrycznych w pojazdach elektrycznych, pochodzi od badaczy w tej dziedzinie i ze źródeł zewnętrznych zajmujących się inżynierią wsteczną. Kilka firm zaangażowało się w demontaż pojazdów elektrycznych, aby dowiedzieć się więcej o projektach i konfiguracjach systemu. Na czele tej

działalności znajduje się Oak Ridge National Laboratory (ORNL), które przeprowadziło szeroko zakrojone badania w tej dziedzinie, a ich odkrycia są łatwo dostępne na zasadach *open source* [1–4]. Na przestrzeni lat ORNL przeprowadził demontaże kilku pojazdów, w tym Toyoty Prius z 2004, 2010 i 2017, Toyoty Camry z 2007 i 2013, Lexusa z 2008, Hyundai Sonaty z 2011, Nissana Leaf z 2012, Hondy Accord z 2014 i BMW i3 z 2016. Istnieją również podmioty komercyjne, takie jak A2Mac1, które zajmują się demontażem na podstawie umów z zainteresowanymi organizacjami. Innym źródłem informacji o maszynach trakcyjnych są blogerzy i indywidualni entuzjaści motoryzacji, którzy przeprowadzają badania, aby zapewnić wgląd w konstrukcję nowoczesnych pojazdów elektrycznych. To dobra wiadomość dla naukowców, chcących uzyskać podstawowe dane projektowe, ponieważ większość producentów nie udostępnia takich danych. Badania producentów silników trakcyjnych do pojazdów elektrycznych są przedmiotem wielu publikacji [5, 6].

Maszyny elektryczne i napędy były przez lata przedmiotem ogromnych innowacji, wraz z rosnącymi trendami w kierunku rozwoju maszyn o dużej mocy właściwej. W miarę kontynuowania badań w tej dziedzinie ważne jest, aby podkreślić osiągnięte ulepszenia podjęte dla tych układów napędowych [5].

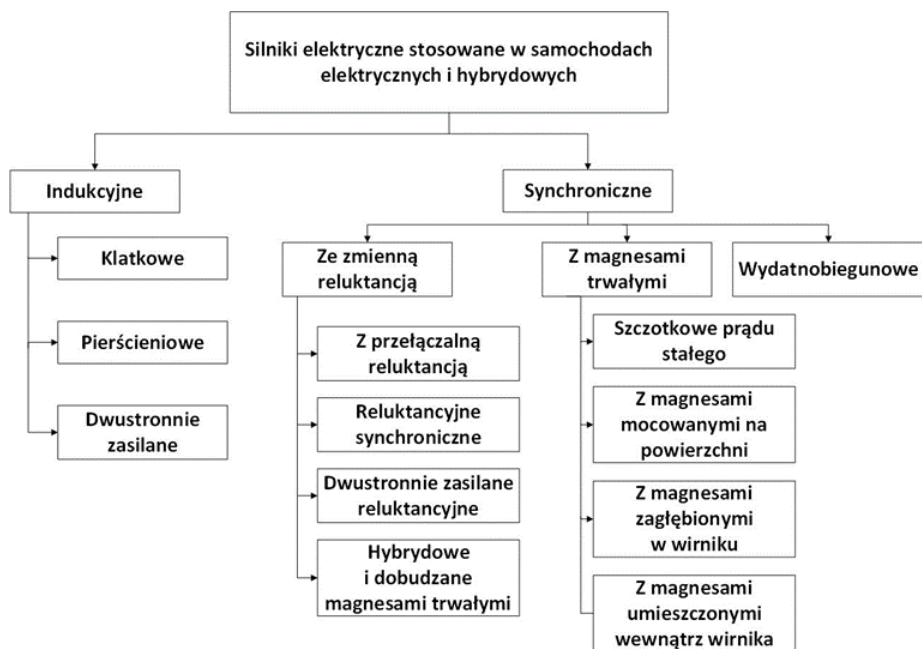
2. Podstawowe rodzaje maszyn elektrycznych

Maszyny elektryczne służą do zamiany energii elektrycznej na energię mechaniczną i odwrotnie. Sprawność konwersji energii przez maszynę elektryczną jest wyższa w porównaniu z silnikiem spalinowym i mieści się w przedziale 80–95%. Samochody elektryczne i hybrydowe wyposażone są w inne maszyny elektryczne i napędy w porównaniu z maszynami elektrycznymi i napędami opracowanymi do zastosowań przemysłowych. Można stwierdzić, że układ napędowy jest sercem samochodu elektrycznego, a silnik elektryczny znajduje się bezpośrednio w rdzeniu tego układu. Silnik przekształca energię elektryczną pobieraną z akumulatora w energię mechaniczną, która umożliwia poruszanie się pojazdu. Takie elementy silników elektrycznych, jak stojan oraz wirnik, odgrywają ważną rolę w ogólnej sprawności silnika. Silniki elektryczne charakteryzują się wysokim momentem obrotowym i dużą gęstością mocy przy lepszej charakterystyce momentu obrotowego i niższych prędkościach obrotowych w porównaniu do silników spalinowych. Maszyny elektryczne mogą być wykorzystywane także jako prądnice, które pozwalają na odzyskanie traconej energii kinetycznej z hamowania i zamianę jej w energię elektryczną. Takie hamowanie nosi nazwę hamowania rekuperacyjnego [7–9].

Wybór silnika elektrycznego zależy od warunków określonych przez trzy zmienne: wymagania pojazdu, ograniczenia pojazdu i źródło zasilania. Te ostatnie obejmują typ pojazdu, jego wagę, wagę akumulatora i ładowność. Biorąc pod uwagę powyższe zmienne wybierany jest silnik, który spełnia wymagania eksploatacyjne pojazdu. W zależności od wymagań pojazdy elektryczne mogą mieć różną liczbę silników, na przykład, Toyota Prius ma jeden, a Acura NSX ma trzy [9].

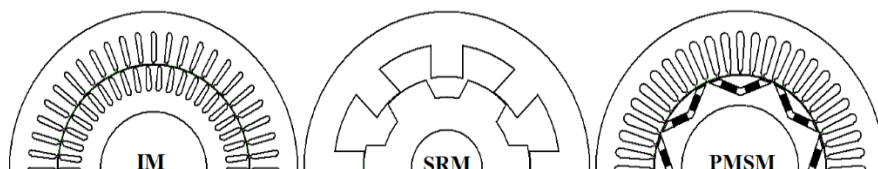
Maszyny elektryczne w samochodach elektrycznych muszą charakteryzować się wysoką sprawnością, dużym znamionowym momentem obrotowym, dużym momentem rozruchowym, szerokim zakresem prędkości, dużą odpornością na przeciążenia, dużą mocą właściwą i gęstością mocy, wysoką niezawodnością i odpornością na uszkodzenia. Te ważne wymagania są istotne niezależnie od typu maszyny. Maszyna spełniająca wszystkie te wymagania musi mieć akceptowalny koszt [10].

Rysunek 1. przedstawia potencjalne typy silników, które mogą być stosowane w samochodach elektrycznych i hybrydowych. Podstawowe typy silników stosowanych w pojazdach elektrycznych to silniki prądu stałego, silniki indukcyjne, silniki synchroniczne z magnesami trwałymi, silniki z przełączalną reluktancją i silniki synchroniczne reluktancyjne.



Rys. 1. Silniki elektryczne możliwe do zastosowania w samochodach elektrycznych i hybrydowych (źródło: opracowanie własne na podstawie [5])

Silniki prądu stałego były w przeszłości wybierane najczęściej, ale nieporęczna konstrukcja, brak niezawodności z powodu obecnego w nich komutatora lub szczotek i związane z tym wymagania konserwacyjne sprawiły, że stały się one mniej atrakcyjne. Wraz z rozwojem energoelektroniki i systemów sterowania pojawiły się różne typy maszyn, przy czym najbardziej preferowane stały się maszyny indukcyjne, z magnesami trwałymi oraz z przełączalną reluktancją. Rysunek 2. przedstawia struktury trzech popularnych maszyn stosowanych w samochodach elektrycznych.



Rys. 2. Struktury trzech popularnych maszyn stosowanych w samochodach elektrycznych: maszyna indukcyjna (ang. *induction machine, IM*), maszyna z przełączalną reluktancją (*switched reluctance machine, SRM*) i maszyna synchroniczna z magnesami trwałymi (*permanent magnet synchronous machine, PMSM*) [7]

Maszyny indukcyjne dwustronnie zasilane oraz pierścieniowe nie są obecnie stosowane w pojazdach elektrycznych. Chociaż te pierwsze były standardowymi maszynami stosowanymi w elektrowniach wiatowych, prawdopodobnie nie spełniają one wymagań dotyczących gęstości mocy i sprawności dla bieżących potrzeb zastosowań w pojazdach. Maszyny wydattobiegunowe są zwykle używane do wytwarzania energii i obecnie również nie są stosowane w komercyjnych pojazdach elektrycznych, chociaż w przeszłości badano je pod kątem zastosowania w motoryzacji [11, 12]. Mimo że na rysunku 1. przedstawiono wiele typów maszyn prawdopodobnie jest, że w laboratoriach badane są kolejne nowe, innowacyjne projekty i konfiguracje.

2.1. Maszyny indukcyjne

Maszyny indukcyjne są proste w budowie, niezawodne i posiadają niskie koszty eksploatacyjne. Silniki pierścieniowe są mniej atrakcyjne w porównaniu do silników klatkowych, zwłaszcza w przypadku napędu elektrycznego w pojazdach elektrycznych (EV), z powodu wysokich kosztów, konieczności konserwacji i mniejszej wytrzymałości. Dlatego też indukcyjny silnik klatkowy można nazwać silnikiem indukcyjnym służącym do napędzania samochodu elektrycznego [13].

Klatkowe silniki indukcyjne były w przeszłości używane w kilku typach pojazdów elektrycznych w tym w General Motors EV1. Obecnie używane są

w takich samochodach elektrycznych jak, na przykład, Tesla Roadster, Model S, Toyota RAV4, Mercedes-Benz B-Class Electric Drive, Tazzari Zero, Mahindra e2o. Zostały także wdrożone komercyjnie w niektórych autobusach i lekkich ciężarówkach, czego przykładem mogą być lekka elektryczna ciężarówka Newton firmy Smith Electric Vehicles lub akumulatorowy autobus elektryczny Optare Solo EV. Klatkowe silniki indukcyjne są częściej stosowane w pojazdach całkowicie elektrycznych niż w pojazdach hybrydowych ze względu na ograniczenia przestrzenne. Maksymalna prędkość jest zwykle ograniczona do 10000 obr/min [14].

Dalsze prace badawczo-rozwojowe, zwiększenie napięcia roboczego, zastosowanie silnika indukcyjnego z miedzianą odlewana klatką wirnika i dostosowanie projektu silnika do danego zastosowania mogą wpłynąć na lepszą sprawność tego typu silników. Do wad klatkowych silników indukcyjnych można zaliczyć trudną kontrolę przy pracy z małą prędkością, niski współczynnik mocy w warunkach niewielkiego obciążenia i duże prądy rozruchowe. Prąd magnesowania, który jest pochłaniany nawet w stanie bez obciążenia zwiększa straty miedzi [14].

Ciągłe wysiłki pozwoliły osiągnąć znaczną poprawę sprawności maszyn indukcyjnych dzięki odpowiedniej geometrii oraz odpowiednim materiałom i technikom konstrukcyjnym w połączeniu z odpowiednią kontrolą poślizgu.

2.2. Maszyny synchroniczne z magnesami trwałymi

Są to jedne z najbardziej zaawansowanych maszyn, które mogą pracować z różnymi prędkościami bez konieczności stosowania jakichkolwiek przekładni. Ta cecha sprawia, że silniki te mają wysoką sprawność i są kompaktowe. Ta konfiguracja jest również bardzo odpowiednia do zastosowań w motoryzacji, ponieważ jest w stanie zapewnić wysoki moment obrotowy, nawet przy bardzo niskich prędkościach [9].

PMSM charakteryzują się sinusoidalnymi przebiegami siły magnetomotorycznej, napięcia i prądu. Magnesy ziem rzadkich wykorzystywane w układach napędowych pomagają zwiększyć gęstość strumienia magnetycznego w szczelinie powietrznej oraz gęstość mocy silnika. W większości zastosowań PMSM stosuje się metale ziem rzadkich ze względu na ich doskonałe właściwości magnetyczne. Zapewniają atrakcyjne cechy, takie jak duża moc i gęstość momentu obrotowego, wysoka sprawność, precyzyjna kontrola momentu obrotowego oraz bezobsługowa praca. PMSM z magnesami umieszczonymi wewnątrz wirnika są lepiej chronione, zarówno mechanicznie, jak i magnetycznie w porównaniu z PMSM z magnesami mocowanymi na powierzchni. Z tego powodu są one również bardziej niezawodne. Jednak rozwiązanie to wiąże się z wyższymi kosztami ze względu na trudności produkcyjne i może zmniejszyć maksymalną dopuszczalną prędkość.

Najpopularniejszymi rodzajami materiałów magnetycznych stosowanych w maszynach z magnesami trwałymi są ferryty, samar-kobalt (SmCo) i neodym-żelazo-bor (NdFeB) [7, 8, 14].

Główne zalety PMSM to:

- wyższa sprawność w porównaniu do bezszczotkowych silników prądu stałego,
- brak komutacyjnych tętnień momentu elektromagnetycznego,
- niezawodność i stosunkowo cicha praca,
- łatwy w sterowaniu dzięki mniejszej bezwładności wirnika,
- wydajne odprowadzanie ciepła.

PMSM są obecnie najczęściej używanymi silnikami w samochodach całkowicie elektrycznych. Co najmniej 26 modeli pojazdów wykorzystuje tę technologię silnika, na przykład, BMW i3, Nissan Leaf, Volkswagen e-Golf, Mitsubishi i-MiEV, Volkswagen e-UP, Citroën C-Zero, Peugeot iOn, Citroën Berlingo Electric, Ford Focus Electric, Fiat 500e, Bolloré Bluecar, Chevrolet Spark EV, Kia Soul EV, Mercedes-Benz Vito E-Cell czy Smart Fortwo Electric Drive. Chociaż większość z nich bazuje na silnikach z metalami ziem rzadkich, istnieje tendencja do minimalizowania zawartości magnesów trwałych [8, 14].

2.3. Maszyny z przelączalną reluktancją

Aby chronić środowisko, istnieje zapotrzebowanie na rozwój maszyn elektrycznych o dużej gęstości mocy, wysokiej sprawności i niskich kosztach dla hybrydowych pojazdów elektrycznych. W pojazdach hybrydowych najpopularniej stosowane są maszyny synchroniczne z magnesami trwałymi. Zawierają jednak magnesy trwałe z metalami ziem rzadkich, takimi jak neodym i dysproz. Cena i podaż metali ziem rzadkich zostały uznane za jeden z głównych problemów w masowej produkcji pojazdów hybrydowych [15].

Dlatego też istnieją wysokie wymagania co do maszyn bez metali ziem rzadkich lub maszyn z mniejszą ilością metali ziem rzadkich dla pojazdów hybrydowych nowej generacji. Jednym z możliwych rozwiązań jest maszyna z przelączalną reluktancją. Zyskują one coraz większe zainteresowanie zarówno przemysłu, jak i społeczności naukowej, ze względu na nieobecność w nich metali ziem rzadkich i ich doskonałą sprawność. SRM są obecnie także coraz częściej rozważane w zastosowaniach motoryzacyjnych. W większości przypadków SRM ma uzwojenia na stojanie, ale nie ma magnesu stałego lub uzwojeń na wirniku, co pozwala pracować jej w wyższych temperaturach. Ta właściwość prowadzi również do niższych kosztów produkcji oraz prostej i wytrzymałej konstrukcji. Jednakże, jeśli jakkolwiek usterka wystąpi w jednej fazie lub uzwojeniu, maszyna może kontynuować swoją pracę przy zmniejszonym obciążeniu. Jest to zasadnicza zaleta, która może być przydatna w przypadku pomp i wentylatorów, a także może zostać wykorzystana w branży

elektromobilności. Są one również odporne na awarie, dzięki czemu nadają się do zastosowań wymagających dużych prędkości [8].

Chociaż posiadają wiele zalet w porównaniu z tradycyjnymi maszynami prądu przemiennego, hałas wynikający z drgań promieniowych i tętnień momentu obrotowego jest nieodłączną wadą SRM. Powszechnie wiadomo, że większość hałasu generowanego przez SRM pochodzi z drgań konstrukcyjnych spowodowanych siłami elektromagnetycznymi szczeliny powietrznej działającymi na stojan. Aby SRM był używany w pojazdach elektrycznych hałas musi być zniwelowany. W przypadku wykorzystywania tego typu silników w elektromobilności ważne są także małe tętnienia momentu obrotowego, szczególnie w samochodach całkowicie elektrycznych. Dlatego ważna i pilna jest optymalizacja SRM w celu rozwiązania problemów z drganiami i tętnieniem momentu obrotowego. W [16] przedstawiono informacje i rozwiązania dotyczące hałasu generowanego przez SRM.

3. Podsumowanie

W artykule przedstawiono przegląd maszyn elektrycznych stosowanych w samochodach elektrycznych i hybrydowych. W pojazdach elektrycznych i hybrydowych stosowane są maszyny elektryczne o różnych konstrukcjach i konfiguracjach. Maszyny indukcyjne, synchroniczne z magnesami trwałymi i synchroniczne maszyny reluktancyjne to najbardziej popularne maszyny napędzające pojazdy elektryczne. W ciągu najbliższych kilku lat można spodziewać się coraz większej rywalizacji między maszynami indukcyjnymi oraz PMSM. Ogólny trend w topologii maszyn elektrycznych zmierza w kierunku przyjęcia maszyn synchronicznych z magnesami trwałymi o zmniejszonej zawartości metali ziem rzadkich. Poszukiwanie alternatywnych maszyn trakcyjnych bez metali ziem rzadkich cieszy się dużym zainteresowaniem i prawdopodobnie będzie kontynuowane w przyszłości.

Literatura

1. Oak Ridge National Laboratory, <https://www.ornl.gov/>, dostęp: 20.03.2022.
2. Burress T. A., Campbell S. L., Coomer C., Ayers C. W., Wereszczak A. A., Cunningham J.P. i in., *Evaluation of the 2010 Toyota Prius Hybrid Synergy Drive System*, USA 2011.
3. Miller J. M., *Oak Ridge National Laboratory annual progress report for the power electronics and electric motors program*, UT-BATTELLE, LLC, Tennessee 2013
4. Ozpineci B., *Oak Ridge National Laboratory Annual Progress Report for the Power Electronics and Electric Motors Program*, Oak Ridge 2014.

5. Agamloh E., Jouanne A. von, Yokochi A., *An Overview of Electric Machine Trends in Modern Electric Vehicles*, Machines, 2020.
6. Bakker S., *Tesla Model 3 Powertrain Fun. From Carburetors To Carborundum. You've Come A Long Way, Baby!*, <https://cleantechnica.com/2018/05/28/more-tesla-model-3-powertrain-fun-from-carburetors-to-carborundum-youve-come-a-long-way-baby/>, dostęp: 20.03.2022.
7. Cheng M., Le Sun, Buja G., Song L., *Advanced Electrical Machines and Machine-Based Systems for Electric and Hybrid Vehicles*, Energies Nr 8, 2015, s. 9541-9564.
8. Un-Noor F., Padmanaban S., Mihet-Popa L., Mollah M., Hossain E., *A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development*, Energies Nr 10, 2017, s. 1217.
9. Karki A., Phuyal S., Tuladhar D., Basnet S., Shrestha B. P., *Status of Pure Electric Vehicle Power Train Technology and Future Prospects*, ASI Nr 3, 2020.
10. Rajashekara K., *Present Status and Future Trends in Electric Vehicle Propulsion Technologies*, IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron., 2013.
11. Parag Jose C., Meikandasivam S., *A Review on the Trends and Developments in Hybrid Electric Vehicles*, [w:] *Innovative Design and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering*, Singapore 2017.
12. Boldea I., Tutelea L. N., Parsa L., Dorrell D., *Automotive Electric Propulsion Systems With Reduced or No Permanent Magnets: An Overview*, IEEE Transactions on Industrial Electronics Nr 61, 2014, s. 5696–5711.
13. Zarma T. A., Galadima A. A., Aminu M. A., *Review of Motors for Electrical Vehicles*, Journal of Scientific Research and Reports Nr 24, 2019, s. 1–6.
14. Riba J.-R., López-Torres C., Romeral L., Garcia A., *Rare-earth-free propulsion motors for electric vehicles: A technology review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews Nr 57, 2016, s. 367–379.
15. Kiyota K., Chiba A., *Design of Switched Reluctance Motor Competitive to 60-kW IPMSM in Third-Generation Hybrid Electric Vehicle*, IEEE Transactions on Industry Applications Nr 48, 2012, s.2303–2309.
16. Gan C., Wu J., Sun Q., Kong W., Li H., Hu Y., *A Review on Machine Topologies and Control Techniques for Low-Noise Switched Reluctance Motors in Electric Vehicle Applications*, IEEE Access Nr 6, 2018, s. 31430–31443.

INFORMACJE O XII SYMPOZJUM NAUKOWYM ELEKTRYKÓW I INFORMATYKÓW

ORGANIZATORZY SYMPOZJUM

Koło Naukowe Elektroników „MICROCHIP”

Koło Naukowe Elektryków „NAPĘD i AUTOMATYKA”

K.N. Elektroekologów „ELMECOL”

K.N. Materialoznawstwa Elektrycznego i Techniki Wysokich Napięć „MELJON”

K.N. Informatyki „PENTAGON”

K.N. Elektroników i Mechatroników „SEMICON”

K.N. SEP przy Politechnice Lubelskiej

Koło Zakładowe SEP przy Politechnice Lubelskiej

Samorząd Studencki Politechniki Lubelskiej

KOMITET NAUKOWY SYMPOZJUM

prof. dr hab. inż. Henryka Stryczewska – przewodnicząca

prof. dr hab. inż. Piotr Kacejko,

dr hab. inż. Dariusz Czerwiński, prof. uczelni

dr hab. inż. Ryszard Goleman, prof. uczelni

prof. dr hab. inż. Wojciech Jarzyna

prof. dr hab. inż. Piotr Kisala

dr hab. inż. Grzegorz Komarzyniec, prof. uczelni

dr hab. inż. Andrzej Kotyra, prof. uczelni

dr hab. inż. Michał Majka, prof. uczelni

dr hab. inż. Jerzy Montusiewicz, prof. uczelni

dr hab. inż. Joanna Pawlat, prof. uczelni

dr hab. inż. Jarosław Sikora, prof. uczelni

dr hab. inż. Andrzej Smolarz, prof. uczelni

dr hab. inż. Paweł Surdacki, prof. uczelni

prof. dr hab. inż. Andrzej Wac-Włodarczyk

prof. dr hab. inż. Waldemar Wójcik

dr hab. Tomasz Zientarski, prof. uczelni

dr hab. inż. Paweł Żukowski, prof. uczelni

prof. inż. Volodymyr Drevetskiy, Rivne, Ukraine

dr inż. Oleksandr Naumchuk, Rivne, Ukraine

dr inż. Bogdan Sydorчук, Rivne, Ukraine

KOMITET ORGANIZACYJNY SYMPOZJUM

dr inż. Marcin Maciejewski – m.maciejewski@pollub.pl – przewodniczący

dr inż. Paweł Mazurek, prof. uczelni – p.mazurek@pollub.pl

dr inż. Andrzej Kociubiński – a.kociubinski@pollub.pl

dr inż. Piotr Filipek – piotr.filipek@pollub.pl

dr hab. inż. Tomasz Koltunowicz, prof. uczelni – t.koltunowicz@pollub.pl

dr inż. Sebastian Styła – s.styla@pollub.pl

dr inż. Jacek Majcher – j.majcher@pollub.pl

dr inż. Mariusz Duk – m.duk@pollub.pl

SPONSORZY I INSTYTUCJE WSPIERAJĄCE
XII SYMPOZJUM NAUKOWE
ELEKTRYKÓW I INFORMATYKÓW



Dziękujemy

PATRONI XII SYMPOZJUM NAUKOWEGO ELEKTRYKÓW I INFORMATYKÓW

Patronat Lubelskiego Oddziału Stowarzyszenia Elektryków Polskich



Patronat Jego Magnificencji Rektora Politechniki Lubelskiej



Patronat Dziekana Wydziału Elektrotechniki i Informatyki





Koło Zakładowe Stowarzyszenia Elektryków Polskich
przy Politechnice Lubelskiej – współorganizator
XI Sympozjum Naukowego Elektryków i Informatyków
SNEiI 2022

ISBN : 978-83-7947-558-2



9 788379 475582