

Autoreferat

1. Imię i nazwisko: **Zbigniew Marszałek**
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.
 - Doktor nauk technicznych w dyscyplinie Elektrotechnika – luty 2014.
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Elektroniki i Inżynierii Biomedycznej
Tytuł rozprawy: *Analiza właściwości metrologicznych układów do detekcji osi pojazdów z wykorzystaniem czujników indukcyjnych pętlowych.*
Promotor doktoratu: dr hab. inż. Ryszard Sroka
Recenzenci w przewodzie doktorskim:
prof. dr hab. inż. Janusz Gajda
prof. dr hab. inż. Remigiusz Rak
 - Magister inżynier, kierunek Elektrotechnika, 2008.
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki
Tytuł pracy: *Interfejs graficzny systemu pomiaru parametrów ruchu drogowego.*
Promotor pracy dyplomowej: dr inż. Marek Stencel
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.
 - Adiunkt: Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Elektroniki i Inżynierii Biomedycznej,
Katedra Metrologii i Elektroniki, od listopada 2014 do chwili obecnej.
 - Asystent: Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki,
Katedra Metrologii, od marca 2010 do października 2014.
 - Doktorant: Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki,
Katedra Metrologii, od września 2009 do lutego 2010.

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.

Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych lub w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowych zatytułowany: **„Rozwój metod impedancyjnego, wieloczęstotliwościowego pomiaru profili magnetycznych pojazdów w ruchu drogowym z wykorzystaniem technologii czujników indukcyjnych pętlowych do zastosowania w inteligentnych systemach transportowych i Generalnym Pomiarze Ruchu”**.

Dotychczasowy dorobek autora w tematyce związanej z wnioskiem habilitacyjnym obejmuje osiem publikacji dotyczących prac realizowanych po uzyskaniu stopnia doktora, z których sześć to artykuły z listy JCR, a dwie to publikacje związane z wystąpieniami na międzynarodowych konferencjach indeksowanych w bazie WoS i ujętych w załączniku do Komunikatu Ministra Nauki z 5.01.2024 r. We wszystkich publikacjach wnioskodawca jest pierwszym autorem, jeden artykuł naukowy jest pracą samodzielną. W sześciu publikacjach wnioskodawca wykazał swój wkład w zakresie 70-100 %, zaś w dwóch publikacjach udział habilitanta to odpowiednio 50 i 60 %. Oświadczenia współautorów o procentowym i merytorycznym indywidualnym wkładzie znajdują się w odrębnym załączniku nr 5.

Publikacje z listy JCR

l.p.	Autorzy, tytuł publikacji, rok wydania, nazwa czasopisma, indywidualny wkład wnioskodawcy, wskaźniki bibliometryczne, udział procentowy
[H1]	Z. Marszałek, T. Żegleń, R. Sroka, J. Gajda: „Inductive loop axle detector based on resistance and reactance vehicle magnetic profiles”, <i>Sensors</i>, ISSN 1424-8220, vol. 18, is. 7, s. 1–14, 2018. <u>Indywidualny wkład wnioskodawcy:</u> Opracowanie koncepcji algorytmu detektora osi wykorzystującego dwie składowe impedancji, opracowanie i uruchomienie

	oprogramowania rejestrującego i oprogramowania detektora osi, opracowanie metodologii i przeprowadzenie badań na stanowisku drogowym, opracowanie rysunków 5d, 6, 7, 8. Opracowanie szkicu manuskryptu, redakcja manuskryptu, nanoszenie poprawek, przedłożenie pracy, kontakt z redakcją oraz realizacja wszystkich obowiązków pierwszego autora i autora korespondencyjnego. Udział: 60 %. Impact Factor: 3.031. Punktacja (lista A czasopism MNiSW, 2017): 30 pkt.
[H2]	Z. Marszałek: „Maxwell-Wien bridge with vector voltmeter system for measurement small and rapid changes in inductive-loop sensor impedance components”, <i>Measurement</i>, ISSN 0263-2241, vol. 121, s. 57–61, 2018. <u>Indywidualny wkład wnioskodawcy:</u> Opracowanie i realizacja metody pomiarowej wykorzystującej woltomierz wektorowy w układzie mostka Maxwella-Wiena do pomiaru małych i szybkich zmian parametrów impedancji czujnika indukcyjnego pętlowego. Integracja i testy systemu pomiarowego, implementacja algorytmów i weryfikacja metody w warunkach rzeczywistego ruchu drogowego. Artykuł samodzielny. Udział: 100 %. Impact Factor: 2.791. Punktacja (lista A czasopism MNiSW, 2017): 30 pkt.
[H3]	Z. Marszałek, K. Duda: „Multifrequency vector measurement system for reliable vehicle magnetic profile assessment”, <i>Sensors</i>, ISSN 1424-8220, vol. 20, is. 17, art. no. 4933, s. 1–15, 2020. <u>Indywidualny wkład wnioskodawcy:</u> Koncepcja układu czterech czujników indukcyjnych pętlowych, badania symulacyjne rozkładów pola magnetycznego czujników, realizacja i sprawdzenie czterokanałowego wieloczęstotliwościowego systemu pomiaru impedancji opartego na FPGA, dobór parametrów, integracja systemu i oprogramowania. Pozyskanie wymaganych zgód administracji i nadzór budowy pomiarowego stanowiska drogowego, wdrożenie systemu do pracy ciągłej i jego nadzór. Redakcja manuskryptu, opracowanie rysunków 1-4 i 6-9, przedłożenie manuskryptu, opracowanie odpowiedzi dla recenzentów, pełnienie obowiązków pierwszego autora i autora korespondencyjnego. Udział: 90 %. Impact Factor: 3.576. Punktacja MNiSW: 100 pkt.
[H4]	Z. Marszałek, W. Gawędzki, K. Duda: “A reliable moving vehicle axle-to-axle distance measurement system based on multi-frequency impedance measurement of a slim inductive-loop sensor”, <i>Measurement</i>, ISSN 0263-2241, vol. 169 art. no. 108525, s. 1–9. 2021. <u>Indywidualny wkład wnioskodawcy:</u> Sformułowanie problemu badawczego, koncepcja i realizacja wieloczęstotliwościowego systemu pomiaru impedancji działającego w obecności zakłóceń (EMI), zebranie i opracowanie danych

	pomiarowych, analizy teoretyczne, uzyskanie finansowania na wykonanie stanowiska na drodze, opracowanie rysunków 1-3, 5, 6, pełnienie obowiązków pierwszego autora i autora korespondencyjnego, redakcja manuskryptu. Udział: 70 % Impact Factor: 5.131. Punktacja MNiSW: 200 pkt.
[H5]	Z. Marszałek, K. Duda, P. Piwowar, M. Stencel, T. Żegleń, J. Izydorczyk: „Load estimation of moving passenger cars using inductive-loop technology”, <i>Sensors</i>, ISSN 1424-8220, vol. 23, is. 4, art. no. 2063, s. 1–19, 2023. <u>Indywidualny wkład wnioskodawcy:</u> Koncepcja szacowania ładunku samochodu osobowego w ruchu z wykorzystaniem technologii wąskich czujników indukcyjnych pętlowych i wieloczęstotliwościowego systemu pomiaru impedancji, metodologia badań, zebranie i opracowanie danych pomiarowych dla przejazdów testowych, opracowanie formuł i oprogramowania, analizy, uzyskanie finansowania i zgody na wykonanie stanowiska pomiarowego na drodze wewnętrznej, redakcja manuskryptu i odpowiedzi dla recenzentów, opracowanie rysunków, pełnienie obowiązków pierwszego autora i autora korespondencyjnego. Udział: 50 %. Impact Factor: 3.576. Punktacja MNiSW: 100 pkt.
[H6]	Z. Marszałek, K. Duda: „Validation of Multi-Frequency Inductive-Loop Measurement System for Parameters of Moving Vehicle Based on Laboratory Model”, <i>Sensors</i>, ISSN 1424-8220, vol. 24, is. 22, art. No. 7244, 2024, https://doi.org/10.3390/s24227244. <u>Indywidualny wkład wnioskodawcy:</u> Koncepcja i opracowanie laboratoryjnego stanowiska badawczego, przygotowanie oprogramowania do realizacji badań, przeprowadzenie analizy błędów zadajnika prędkości. Przeprowadzenie badań symulacyjnych metodą elementów skończonych w środowisku ANSYS Maxwell oraz sformułowanie wniosków związanych z modelem laboratoryjnym pojazdu i stanowiskiem. Przygotowanie i przeprowadzenie eksperymentów laboratoryjnych, gromadzenie danych, wykonanie analizy wyników, opracowanie wykresów i rysunków, przygotowanie manuskryptu do publikacji, pełnienie obowiązków pierwszego autora i autora korespondencyjnego. Udział: 80 %. Impact Factor: 3.4. Punktacja MNiSW: 100 pkt.

Publikacje opublikowane w recenzowanych materiałach międzynarodowej konferencji indeksowanej w bazie Web of Science znajdującej się na wykazie z 5.01.2024:

l.p.	Autorzy, tytuł publikacji, rok wydania, nazwa konferencji, indywidualny wkład wnioskodawcy, wskaźniki bibliometryczne, udział procentowy
[C1]	Z. Marszałek, R. Sroka: „Signal fusion of changes in the inductive loop impedance components for vehicle axle detection”, <i>21th international conference on Methods and Models in Automation and Robotics</i>, IEEE, 2016. <u>Indywidualny wkład wnioskodawcy:</u> Opracowanie algorytmu detektora osi wykorzystującego dwie składowe impedancji, opracowanie i uruchomienie oprogramowania rejestrującego sygnały w ruchu drogowym i oprogramowania detektora osi, opracowanie metodologii i przeprowadzenie badań na stanowisku drogowym, opracowanie wszystkich rysunków. Opracowanie manuskryptu, edycja, przedłożenie pracy, kontakt z organizatorami konferencji, wygłoszenie referatu oraz realizacja wszystkich obowiązków pierwszego autora i autora korespondencyjnego. Udział: 90 %. Punktacja MNiSW (2016): 15 pkt.
[C2]	Z. Marszałek, R. Sroka, T. Żegleń: „Multi-frequency conditioning system of the inductive loop sensor - simulation investigations”, <i>22nd international conference on Methods and Models in Automation and Robotics</i>, IEEE, 2017. <u>Indywidualny wkład wnioskodawcy:</u> Koncepcja wieloczęstotliwościowego układu kondycjonowania sygnału czujnika indukcyjnego pętlowego, koncepcja i plan badań symulacyjnych w obecności zakłóceń, opracowanie rysunków i schematów, redakcja manuskryptu, wygłoszenie referatu na konferencji. Pełnienie obowiązków pierwszego autora i autora korespondencyjnego. Udział: 80 %. Punktacja MNiSW (2016): 15 pkt.

Wstęp i zdefiniowanie celu naukowego

Cykl publikacji koncentruje się na propozycji nowelizacji układów kondycjonowania sygnału czujnika indukcyjnego pętlowego w celu poprawy jakości klasyfikacji pojazdów w ruchu drogowym, poprawy detekcji i lokalizacji osi uniesionej, oraz zwiększenia odporności na zakłócenia elektromagnetyczne. Propozycja dotyczy modyfikacji układu elektronicznego, który jest bezpośrednio związany z czujnikiem indukcyjnym pętlowym i umożliwia zachowanie większej zgodności uzyskiwanych sygnałów na gruncie elektrotechniki.

Nowelizacja ma na celu poprawienie precyzji uzyskiwanych wyników, w tym umożliwienie dokładniejszego pomiaru: prędkości pojazdów, odległości między osiami jak również osi uniesionej, zwisów i długości pojazdu. Zmiana dotyczy przetwarzania sygnału czujnika indukcyjnego pętlowego, które opiera się na pomiarze impedancji tego czujnika. Zamiast dotychczasowych układów, które dostarczały tylko jedną składową impedancji (związaną z reaktancją, np. układy generatorowe czy mostkowe), proponowana metoda stosuje dedykowane rozwiązania zdolne do pomiaru obu parametrów impedancji, jak również działa na kilku częstotliwościach prądu pomiarowego jednocześnie. Tego rodzaju innowacja prowadzić do znaczącej poprawy dokładności wspomnianych pomiarów parametrów pojazdu i klasyfikacji pojazdów [31], co z kolei wpłynie na efektywność systemów monitorujących ruch drogowy, szczególnie w kontekście analizy charakterystyki przejeżdżających pojazdów.

Wytyczne **Ministerstwa Infrastruktury**, dotyczące wykonywania pomiarów ruchu drogowego (**WR-D-12¹**), obowiązujące od 02.12.2022, przyjmują za kluczowe dla analizy, zarządzania i planowania infrastruktury drogowej, następujące **parametry ruchu drogowego**:

1. **Natężenie ruchu** - liczba pojazdów przejeżdżających przez określony punkt drogi w jednostce czasu (najczęściej wyrażane w pojazdach na godzinę - poj/h). Pomaga w ocenie obciążenia drogi oraz planowaniu rozbudowy infrastruktury.
2. **Strukturę ruchu** - podział natężenia ruchu na różne typy pojazdów, np. samochody osobowe, ciężarowe, autobusy, motocykle. **Wymaga kategoryzacji pojazdów.** Informacje te są istotne dla planowania infrastruktury, np. wydzielania pasów dla różnych typów pojazdów.
3. **Prędkość ruchu** - średnia prędkość, z jaką poruszają się pojazdy na danym odcinku drogi, mierzona zazwyczaj w kilometrach na godzinę (km/h). Wskazuje na płynność

¹ WR-D-12 Wytyczne wykonywania pomiarów ruchu drogowego, <https://www.gov.pl/web/infrastruktura/wr-d>, wersja 01, 2022.12.02.

ruchu i potencjalne problemy z zatorami. Prędkość wpływa również na bezpieczeństwo drogowe.

4. **Gęstość ruchu** - liczba pojazdów znajdujących się na jednostce długości drogi w danym momencie, najczęściej wyrażana w pojazdach na kilometr (poj/km). Jest ważna dla oceny warunków jazdy i ryzyka korków.
5. **Przepustowość** - maksymalna liczba pojazdów, która może przejechać przez określony odcinek drogi w jednostce czasu przy utrzymaniu akceptowalnego poziomu jakości ruchu, mierzona w pojazdach na godzinę (poj/h). Jest kluczowa dla planowania rozbudowy dróg i zarządzania ruchem w godzinach szczytu.
6. **Czas podróży** - całkowity czas potrzebny na przebycie określonego odcinka drogi, uwzględniający zarówno czas jazdy, jak i ewentualne postoje. Pomaga ocenić efektywność tras i planować zmiany w organizacji ruchu.
7. **Intensywność i czas trwania szczytów ruchu**. Pomiar liczby pojazdów i długości okresów, w których natężenie ruchu jest najwyższe (godziny szczytu).
8. **Stopień nasycenia** - stosunek rzeczywistego natężenia ruchu do przepustowości drogi. Wskazuje, jak blisko droga jest do osiągnięcia swojej pełnej przepustowości. Wartości bliskie 1 wskazują na potrzebę interwencji.
9. **Kolejki pojazdów** - liczba pojazdów oczekujących na przejazd przez dany punkt, na przykład na skrzyżowaniu lub w miejscu robót drogowych. Wskazuje na problemy z przepustowością i może sugerować potrzebę poprawy sygnalizacji świetlnej lub zmiany organizacji ruchu.

Do realizacji pomiarów **zaleca się automatyczne systemy** i używanie urządzeń takich jak **czujniki indukcyjne pętlowe**, stacje WIM (*Weight-in-motion*), kamery oraz radarowe detektory ruchu, które automatycznie rejestrują parametry ruchu drogowego. Rozwój systemów pomiaru ruchu drogowego obejmuje różne obszary. Dotyczy on zarówno badań nowych typów sensorów, jak i udoskonalania istniejących czujników oraz metod pozyskiwania danych z tych urządzeń. Na całym świecie odbiorcami efektów wspomnianego rozwoju są producenci inteligentnych systemów transportowych ITS (*Intelligent Transportation Systems*), którzy wdrażają je dla zaspakajania potrzeb społeczności oczekującej efektywnego i wygodnego transportu.

W Polsce co 5 lat realizowany jest Generalny Pomiar Ruchu (GPR) przeprowadzany przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA). Nałożony przez zarządców dróg obowiązek przeprowadzenia okresowych pomiarów ruchu wynika z ustawy o drogach publicznych². Wyniki GPR stanowią podstawowe źródło informacji o ruchu na sieci drogowej i pozwalają na określenie najważniejszych parametrów ruchu drogowego dla każdego odcinka sieci dróg krajowych, takich jak Średni Dobowy Ruch Roczny (SDRR), struktura rodzajowa ruchu czy natężenie ruchu w poszczególnych

² Ustawa z dnia 21 marca 1985 r. o drogach publicznych (Dz.U. 1985 nr 14 poz. 60).

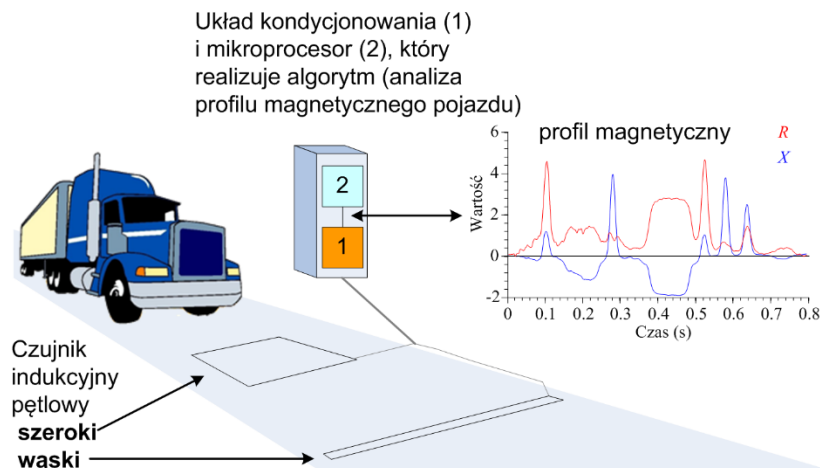
okresach doby. Wyniki GPR są wykorzystywane m.in. do: celów planistyczno-projektowych dotyczących sieci transportowej kraju, analiz bezpieczeństwa ruchu drogowego, zarządzania ruchem, analiz ekonomicznych oraz związanych z ochroną środowiska. GPR w Polsce realizuje się już od 1965 roku, a ich wyniki są zgodne z wymaganiami Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ). Od 2000 roku pomiary przeprowadza się równolegle na drogach krajowych i wojewódzkich, zgodnie z metodologią³ określaną przez GDDKiA. Wyniki pomiarów zebranych podczas GPR są podstawowymi wskaźnikami używanymi przez inżynierów ruchu i planistów do oceny i poprawy systemów transportowych, zarządzania ruchem oraz planowania rozbudowy infrastruktury drogowej.

Biorąc pod uwagę istniejące uwarunkowania prawne i administracyjne oraz spodziewany dalszy rozwój ruchu drogowego, podjętą tematykę badawczą należy uznać za aktualną oraz przydatną w praktycznych zastosowaniach do rozwoju zrównoważonego ruchu drogowego.

Przechodząc do kwestii realizacji pomiarów, zaleca się stosowanie systemów automatycznych i co istotne na pierwszym miejscu wymienia się **czujniki indukcyjne pętlowe**. W obszarze nauki wciąż aktualnym i rozwijanym kierunkiem jest szersze i efektywniejsze wykorzystanie technologii czujników indukcyjnych pętlowych, np. do detekcji osi pojazdów w tym osi uniesionej. W systemach preselekcyjnego ważenia pojazdów w ruchu WIM, aby prawidłowo sygnalizować przekroczenia dopuszczalnego nacisku osi lub masy całkowitej pojazdu, system WIM musi być wyposażony w wiarygodną metodę klasyfikacji pojazdów. W przypadku samochodu jadącego z osią uniesioną, ze względu na brak wywieranego nacisku, detekcja osi tej osi nie jest możliwa czujnikami nacisku. System WIM mierzy wówczas odległość osi, które wywierają nacisk, toteż w przypadku zastosowania schematu klasyfikacji wg COST323⁴, system może błędnie sklasyfikować pojazd kategorii 5 jadący z osią podniesioną i przypisać temu pojazdowi kategorię 4. W rozwiązaniu tego problemu pomocny jest czujnik indukcyjny pętlowy w wersji wąskiej, który wykazuje zdolność do detekcji osi uniesionej. Na rys. 1 przedstawiono schemat blokowy typowego stanowiska pomiarowego z czujnikami indukcyjnymi pętlowymi.

³ Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Założenia i metodologia GPR 2025: <https://www.gov.pl/web/gddkia/pracujemy-nad-zalozeniami-i-metodologia-gpr-2025>

⁴ COST 323. Weigh-in-Motion of Road Vehicles: Final Report of the COST 323, B. Jacob, E.J. O'Brien, S. Jehaes, eds., LCPC: Paris, France, (2002) Volume 1, s. 51.

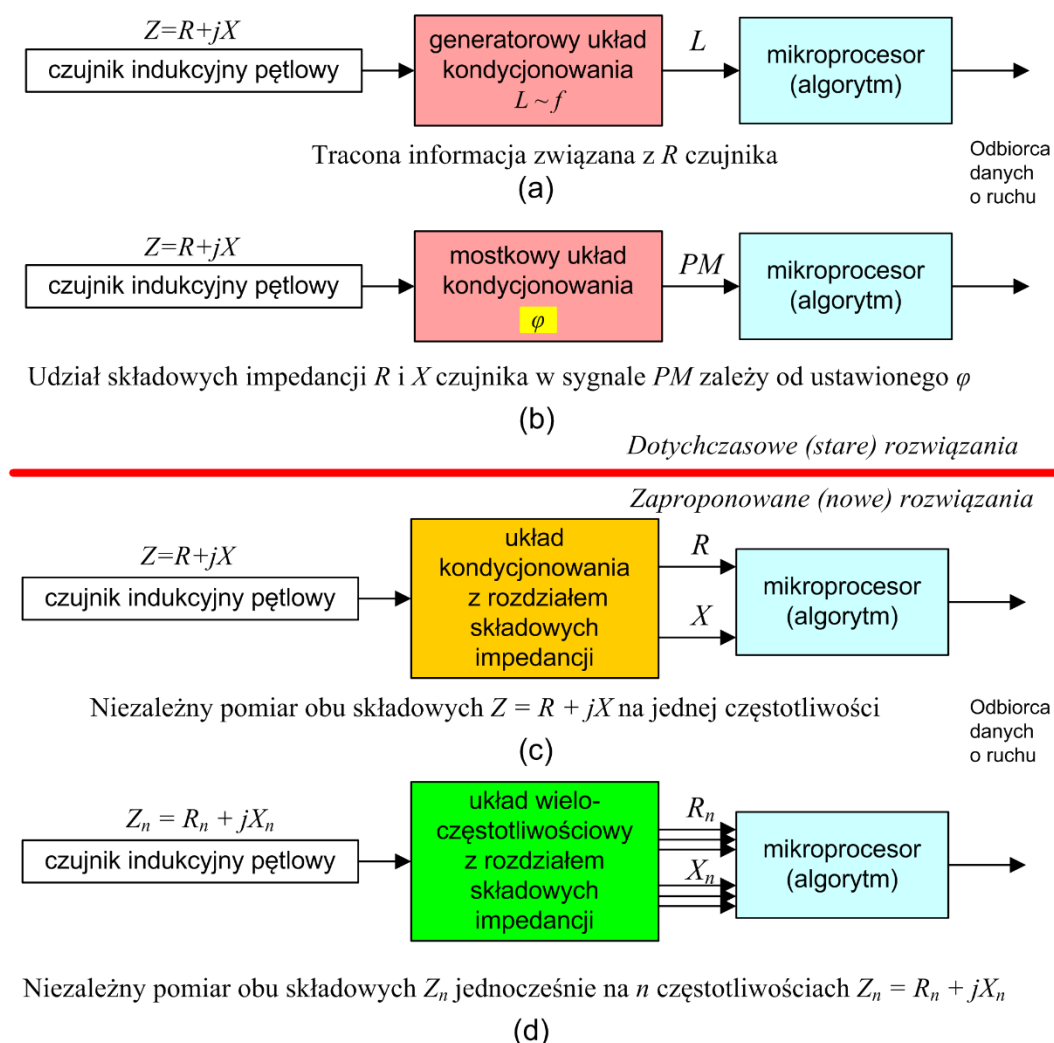


Rys. 1. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego z czujnikami indukcyjnymi pętlowymi (czujnik **szeroki** o wymiarach 1 m na 2 m, **wąski** o wymiarach 0,1 m x 3,2 m).

Do wejścia **układu kondycjonowania** (1) dołączany jest **czujnik indukcyjny pętlowy**, a sygnał wyjściowy, dotyczący wykrytego pojazdu, nazywany jest **profilem magnetycznym** i doprowadzony jest do wejścia **układu mikroprocesorowego** (2), który realizuje na jego podstawie określone **algorytmy** pomiaru takich parametrów pojedynczego pojazdu jak jego prędkość, długość (magnetyczna), czy klasa (kategoria) pojazdu. Wyniki te są agregowane w pamięci mikroprocesora i na dalszym etapie, po ich pobraniu realizuje się obliczenia **parametrów ruchu drogowego** w lokalizacji danego stanowiska.

Różni producenci stosują generalnie dwie powszechnie znane koncepcje układów elektronicznych, tj. układ generatora samowzbudnego LC oraz układ mostka prądu przemiennego. Na wyjściu układów kondycjonowania dostępny jest jeden sygnał – profil magnetyczny związany z pojazdem, wypadkową zmianą impedancji i z układem kondycjonującym, który go wypracowuje. W przypadku układów generatorowych profil magnetyczny związany jest z jedną składową impedancji czujnika, reaktancją indukcyjną proporcjonalną do indukcyjności L (rys. 2a), mierzoną pośrednio poprzez pomiar częstotliwości generatora LC. Informacja o składowej rzeczywistej impedancji czujnika jest tracona i nieobecna w sygnale wyjściowym. **Składowa R ma inny kształt przebiegu niż składowa X .**

W przypadku układów mostkowych (rys. 2b) ustawiony kąt fazowy demodulacji synchronicznej (φ) decyduje o stopniu miksowania części rzeczywistej i urojonej impedancji czujnika w sygnale wyjściowym tj. w profilu magnetycznym PM .



Rys. 2. Schematy blokowe układów kondycjonowania sygnału czujnika indukcyjnego pętlowego zaprezentowane we współpracy z mikroprocesorem: (a) układ generatorowy; (b) układ mostkowy; (c) układ z rozdziałem składowych impedancji – dwa wyjścia sygnałowe; (d) układ impedancyjnego, wieloczęstotliwościowego pomiaru profili magnetycznych pojazdów – wiele wyjść sygnałowych, np. 6 dla 3 częstotliwości i dla jednego czujnika.

Wnioskodawca prowadził m.in. wstępne badania porównawcze układów: generatorowego, mostkowego i zaproponowanego układu pomiaru składowych impedancji. Uzyskane wyniki związane ściśle z porównaniem tych technologii zaprezentował na forum międzynarodowej konferencji *International Conference on Signals and Electronic Systems* (ICSSES 2018) [1]. W praktyce powszechnie stosowane są układy bazujące na generatorze LC oraz na układzie mostka prądu przemiennego. Natomiast w tym kontekście nowością są układy mierzące w sposób ciągły parametry impedancji czujnika indukcyjnego pętlowego mające zastosowanie do detekcji osi pojazdów. Habilitant przeprowadził szczegółowe laboratoryjne badania porównawcze mające na celu sprawdzenie kompatybilności uzyskiwanych sygnałów wyjściowych z układów: 1) opartego na generatorze LC, 2)

opartego na mostku prądu przemiennego, 3) opartego na pomiarze impedancji. Habilitant zbudował układy laboratoryjne i ich modele matematyczne oraz przeprowadził badania w warunkach laboratoryjnych na opracowanym do tego celu dedykowanym stanowisku (rys. 5 w [1]). Stosowanie układu pomiaru impedancji czujnika indukcyjnego pętlowego umożliwia kompatybilność wstecz z układami mostkowymi lub generatorowymi o znanym modelu matematycznym. Ponadto układy generatorowe i mostkowe, jako stratne w sensie informacji zawartej w profilu magnetycznym, nie są kompatybilne z układami pomiaru impedancji. Układy mostkowe z jednym wyjściem łączą nieodwracalnie (miksują) składowe impedancji.

W wyniku porównania różnych koncepcji układów habilitant określił ograniczenia i wady układów generatorowych i mostkowych tj. powszechnie stosowanych, które zostały zestawione w **tab. 1**.

Automatyczna klasyfikacja pojazdów na podstawie magnetycznych sygnatur stanowi dynamicznie rozwijającą się dziedzinę badań, której celem jest doskonalenie metod detekcji i identyfikacji pojazdów przy użyciu czujników indukcyjnych pętlowych. Liczne prace badawcze opisują różne podejścia do klasyfikacji, wykorzystując różnorodne techniki przetwarzania sygnału oraz algorytmy uczenia maszynowego w celu zwiększenia dokładności rozpoznawania kategorii pojazdów. W artykule [2] autorzy zaproponowali wykorzystanie pojedynczego czujnika indukcyjnego pętlowego i generatorowy układ kondycjonowania w połączeniu z siecią neuronową do klasyfikacji pojazdów. Przeprowadzone testy obejmowały pięć kategorii: samochody osobowe, dostawcze, autobusy, ciężarówki i motocykle, a osiągnięta dokładność rozpoznawania wyniosła 91,5 %. Wyniki te były wyraźnie lepsze od wcześniejszych badań, takich jak [3] i [4], gdzie uzyskano dokładność na poziomie 80%, oraz [5], w którym dokładność wynosiła 83%. W innym badaniu [6] zastosowano probabilistyczną sieć neuronową opartą na cechach uzyskanych z czujnika „Blade”, co pozwoliło na osiągnięcie dokładności 70,8 %. W literaturze odnotowano także podejścia wykorzystujące różne techniki klasyfikacji w czasie rzeczywistym. Przykładem może być praca [7], gdzie autorzy opracowali klasyfikator działający w czasie rzeczywistym z użyciem profili magnetycznych z czujnika o wymiarach $1,8\text{ m} \times 1,8\text{ m}$.

Tab. 1. Ograniczenia i wady stosowanych układów kondycjonowania

Mostkowy układ kondycjonowania	Generatorowy układ kondycjonowania
Konsekwencje przyjętej struktury układu kondycjonowania	
Udział składowych impedancji ($Z=R+jX$) czujnika indukcyjnego pętlowego w sygnale profilu magnetycznego zależy od ustawionego kąta fazowego sygnału synchronizującego demodulator fazoczuły.	Tracona jest informacja o części rzeczywistej (R) impedancji czujnika indukcyjnego pętlowego, czyli sygnał wyjściowy niesie informację związaną tylko z częścią urojoną impedancji sensora.
Ograniczenia w zastosowaniu profilu magnetycznego do klasyfikacji pojazdów	
Uzyskiwany przebieg profilu zależy od kąta fazowego – po zmianie kąta profil zmienia kształt. To oznacza ograniczenia w przenośności modeli głębokiego uczenia do klasyfikacji pojazdów działających na bazie parametrów profilu. Przenośność modeli między instalacjami jest więc ograniczona.	Magnetyczne profile pojazdów (związane tylko z indukcyjnością) dla różnych pojazdów mogą być do siebie zbliżone kształtem dlatego obserwuje się ograniczenia i problemy w skuteczności klasyfikacji bazującej na profilu w przypadku takich schematów klasyfikacji jak np. FHWA ⁵ .
Ograniczenia we współpracy z mniej czułym wąskim czujnikiem indukcyjnym pętlowym zdolnym do detekcji osi pojazdów w tym osi uniesionej	
Skuteczność detekcji osi zależy od ustawionego kąta fazowego i jest różna dla pojazdów: osobowych z felgami aluminiowymi/stalowymi, z zawieszeniem niskim/wysokim.	Mała czułość układu i bardzo niska skuteczność detekcja osi pojazdów – z tego powodu generatorowy układ w praktyce nie jest stosowany ze względu na brak wystarczającej czułości do detekcji osi uniesionej.
Niska odporność na zakłócenia elektromagnetyczne	
Indukowane w pętli indukcyjnej napięcie od zmiennych pól elektromagnetycznych ma wpływ na sygnał wyjściowy, jeśli ich częstotliwość różnicowa obejmuje pasmo przenoszenia filtrów dolnoprzepustowych.	Bardzo silne zakłócenia elektromagnetyczne mogą mieć wpływ na wynik pomiaru częstotliwości, a tym samym na kształt sygnału wyjściowego – profilu.
Inne problemy praktyczne	
Mostek wymaga równoważenia i z tego powodu stosuje się podsystemy automatycznego równoważenia, które jednak mogą uruchamiać się podczas obecności pojazdu w polu czujnika co może powodować gubienie pojedynczych pojazdów lub błędy w wynikach.	Przy konieczności stosowania długich przewodów doprowadzających od czujnika do szafy teletechnicznej raportowane są problemy ze wzbudzeniem generatora LC ze względu na znaczną rezystancję doprowadzeń i niską dobroć obwodu LC.

⁵ Chen-Fu Liao, Refining Inductive Loop Signature Technology for Statewide Vehicle Classification Counts, Final Report, Minnesota Department of Transportation, 2021, <https://www.mndot.gov/research/reports/2021/202127.pdf>

Wykorzystując schemat klasyfikacji FHWA (Federal Highway Administration), uzyskano dokładność na poziomie 90,4%. Natomiast w badaniu [8], zastosowanie wielowarstwowej sieci neuronowej (MLP) pozwoliło na osiągnięcie dokładności klasyfikacji wynoszącej 92,4% dla grup obejmujących motocykle, małe, średnie i duże pojazdy. Inne podejścia skupiały się na przetwarzaniu sygnałów, takich jak analiza DFT (dyskretna transformacja Fouriera) w pracy [9], gdzie cechy obliczano na podstawie lokalnych ekstremów sygnału, a do klasyfikacji zastosowano trójwarstwową sieć neuronową, uzyskując ogólną dokładność klasyfikacji na poziomie 94,21%. Wykorzystanie algorytmu losowego lasu (RF) w systemie wieloczułnikowym do klasyfikacji pojazdów pozwoliło osiągnąć całkowitą dokładność wynoszącą $88\pm 4\%$ w zależności od klasy pojazdu [10]. Nowoczesne techniki obejmują również opracowanie cech niezależnych od prędkości pojazdu, jak przedstawiono w [11], gdzie zastosowanie cechy opartej na DFT umożliwiło rozpoznawanie samochodów osobowych, dostawczych i ciężarówek z dokładnością 96 %. W pracy [12] porównano pięć różnych algorytmów klasyfikacji pojazdów, opartych na cechach wyodrębnionych z pojedynczego profilu magnetycznego, w tym k-NN (k-najbliższych sąsiadów), SVC (klasyfikator SVM), drzewa decyzyjne (DT), RF oraz klasyfikator głosujący, z których ostatni osiągnął dokładność 94 % dla pięciu kategorii pojazdów. W raporcie z 2021 r. [13], koncentrującym się na ulepszaniu technologii sygnatury magnetycznej do klasyfikacji pojazdów przy użyciu czujników indukcyjnych pętlowych, uzyskano ogólną dokładność 93,6 % dla schematu klasyfikacji FHWA, natomiast 96,1 % przy użyciu schematu HPMS (Highway Performance Monitoring System). Osiągnięcie tych wyników podkreśla potencjał rozwoju technologii klasyfikacji pojazdów poprzez optymalizację przetwarzania sygnałów i zastosowanie zaawansowanych algorytmów uczenia maszynowego.

Wszystkie omawiane badania opierają się na wspólnym podejściu, które wykorzystuje czujnik indukcyjny pętlowy w połączeniu z generatorowym lub mostkowym układem kondycjonującym sygnał. Taki układ umożliwia uzyskanie sygnatury magnetycznej pojazdu, która jest ściśle związana ze zmianami indukcyjności czujnika wywołanymi przez przejazd pojazdu. W efekcie, dla każdego pojazdu rejestrowany jest pojedynczy sygnał, opisujący jedną wielkość elektryczną charakterystyczną dla czujnika – indukcyjność. W standardowym podejściu nie uzyskuje się jednak informacji o rezystancji, która stanowi rzeczywistą część impedancji czujnika, co ogranicza ilość dostępnych danych do analizy. Profile magnetyczne pojazdów, generowane na podstawie zmian indukcyjności przy użyciu standardowych szerokich czujników pętlowych, mają specyficzny kształt, co umożliwia

rozróżnianie kategorii pojazdów z dokładnością sięgającą 96,1% [14]. Mimo to, w badaniach wskazuje się na trudności w klasyfikacji wynikające z podobieństwa profili indukcyjnych pojazdów różnych klas. To podobieństwo stanowi istotne źródło błędów klasyfikatora, ograniczając jego skuteczność. Nowatorskim podejściem jest zastosowanie układu kondycjonującego sygnał, który umożliwia jednoczesną akwizycję obu wielkości elektrycznych – zarówno indukcyjności (lub reaktancji indukcyjnej), jak i rezystancji. Taka metoda znacząco rozszerza ilość dostępnych informacji, ponieważ uzyskiwane są dwa niezależne sygnały elektrycznie ortogonalne związane z właściwościami czujnika. Rezystancja, stanowiąca rzeczywistą część impedancji, może być przekształcona na sygnał w odpowiednio opracowanym systemie pomiarowym. Rozbudowa systemu o dodatkowe sygnały znacząco wzbogaca bazę informacji dostępnych dla klasyfikatora, co prowadzi do zwiększenia dokładności klasyfikacji pojazdów. Nowe podejście również minimalizuje błędy wynikające z podobieństwa indukcyjnych profili magnetycznych pojazdów, oferując lepsze rozróżnianie pojazdów należących do różnych klas. Dzięki temu możliwe jest pokonanie ograniczeń obecnych w dotychczasowych metodach, co stanowi istotny krok naprzód w doskonaleniu systemów pomiaru parametrów i klasyfikacji pojazdów [31].

Warto podkreślić, że metoda pomiaru składowych impedancji – obejmująca zarówno rezystancję, jak i reaktancję – stanowi kluczowe narzędzie w pomiarach parametrów czujników indukcyjnych. Technika ta, która może być również realizowana w sposób wieloczęstotliwościowy, znajduje szerokie zastosowanie w nowoczesnych detektorach metalu [14], bioinżynierii [15], spektroskopii impedancyjnej [16], badaniach nieniszczących metali [17] oraz wielu innych dziedzinach [18]. Obie wielkości, rezystancja i reaktancja, odgrywają fundamentalną rolę w elektrotechnice, pozwalając na pełną charakterystykę odpowiedzi czujnika indukcyjnego. Jednakże, w systemach dedykowanych do Inteligentnych Systemów Transportowych (ITS), metoda ta nie zyskała jeszcze szerokiego uznania ani powszechnego zastosowania. W dostępnej literaturze brakuje opracowań poświęconych wykorzystaniu układów umożliwiających precyzyjny pomiar wieloczęstotliwościowych profili magnetycznych pojazdów z pojedynczego czujnika oraz porównaniu ich zalet względem powszechnych rozwiązań opartych na generatorach LC czy mostkach. Prace zawarte w cyklu publikacji przedstawionych w ramach tego wniosku habilitacyjnego wypełniają tę lukę, oferując nowe podejście i proponując rozwiązania eliminujące wady konwencjonalnych systemów opisane w tab. 1. Nowatorskie metody przedstawione w tych badaniach przyczyniają się do poprawy jakości pomiarów i otwierają

nowe możliwości w rozwoju zaawansowanych systemów pomiarowych dla ITS, co może znacząco wpłynąć na dalszy rozwój technologii wykorzystywanych w tej dziedzinie.

Ponadto odpowiednio czuły układ z rozdziałem składowe impedancji współpracujący z czujnikiem indukcyjnym pętlowym wąskim staje się bardzo dobrym rozwiązaniem do detekcji osi w tym osi uniesionej. Skuteczność detekcji osi czujnika wąskiego, który współpracuje z układem z rozdziałem składowych impedancji jest wyższa [H1], niż w przypadku zastosowania mostkowego układu z jednym wyjściem [19].

W pracy [31] przedstawiono wyniki klasyfikacji pojazdów uzyskane po zastosowaniu wieloczęstotliwościowego systemu pomiaru impedancji dla czujnika szerokiego i wąskiego, a co istotne zaobserwowano znaczący (99,9 %) wzrost dokładności klasyfikacji.

W odniesieniu do zestawionych w **tab. 1** wad układów pokazanych na rys. 2a i rys. 2b habilitant zaproponował autorskie rozwiązania dotyczące układów kondycjonowania z rozdziałem składowych impedancji oraz układ wieloczęstotliwościowego pomiaru impedancji dla czujnika indukcyjnego pętlowego wąskiego oraz szerokiego. Schematy blokowe tych propozycji układowych przedstawiają odpowiednio rys. 2c i 2d.

Wiodącym celem naukowym jest poszukiwanie nowych układów kondycjonowania pozwalających na pokonanie określonych w **tab. 1** ograniczeń i wyeliminowanie wad. Ten cel został osiągnięty poprzez prace badawcze nad rozwojem układów elektronicznych współpracujących z czujnikami indukcyjnymi pętlowymi. Rozwiązania opisane w publikacjach składających się na cykl prac powiązanych tematycznie są dedykowane do zastosowań w rozwijających się polskich systemach ITS i w planowanym na rok 2025 GPR. Rozwiązania te zostały zawarte w przedłożonym do oceny cyklu publikacji i stanowią osiągnięcie naukowe habilitanta przedstawione ze szczególnym podziałem na trzy istotne obszary:

1. **Opracowanie i zbadanie układów kondycjonowania sygnału z rozdziałem składowych impedancji czujnika indukcyjnego pętlowego i algorytmu detekcji osi.**

Prace [H1], [H2], [C1].

2. **Opracowanie układów do pomiaru impedancji jednocześnie na wielu częstotliwościach dla celów kondycjonowania sygnału czujnika indukcyjnego pętlowego o odpowiednio wysokiej czułości dla czujników wąskich.**

Prace [H3], [C2].

3. Badania w obszarze zastosowań wieloczęstotliwościowych impedancyjnych profili pojazdów – pomiar odległości między osiami, długości pojazdu, zwisów i estymacja masy ładunku zidentyfikowanego samochodu.

Prace [H4], [H5], [H6].

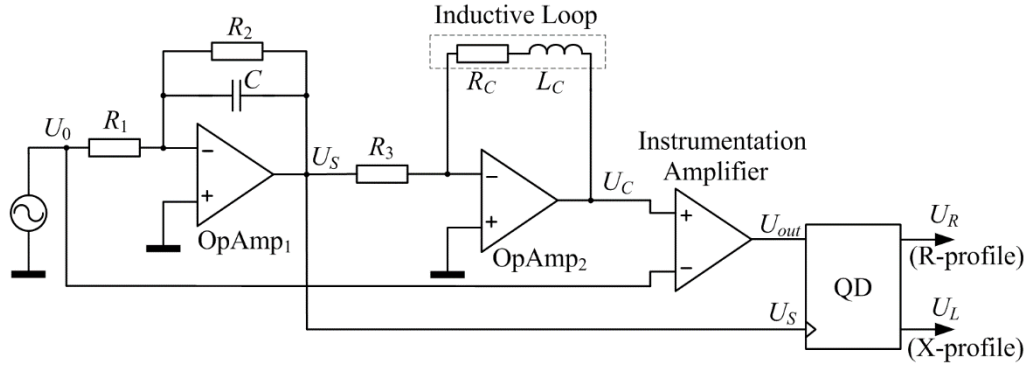
1. Opracowanie i zbadanie układów kondycjonowania sygnału z rozdziałem składowych impedancji czujnika indukcyjnego pętlowego i algorytmu detekcji osi

[H1] Z. Marszałek, T. Żegleń, R. Sroka, J. Gajda: „Inductive loop axle detector based on resistance and reactance vehicle magnetic profiles, Sensors, ISSN 1424-8220, vol. 18, is. 7, s. 1–14, 2018.

[H2] Z. Marszałek: „Maxwell-Wien bridge with vector voltmeter system for measurement small and rapid changes in inductive-loop sensor impedance components”, Measurement, ISSN 0263-2241, vol. 121, s. 57–61, 2018

[C1] Z. Marszałek, R. Sroka: „Signal fusion of changes in the inductive loop impedance components for vehicle axle detection”, 21th international conference on Methods and Models in Automation and Robotics, IEEE, 2016.

Wadą układów rezonansowych i mostkowych jest to, że napięcie wyjściowe układu jest nieliniową funkcją zmian składowych impedancji czujnika indukcyjnego pętlowego [22]. Natomiast wadą metody bazującej na oscylatorze LC jest uzyskiwanie sygnału proporcjonalnego jedynie do zmian indukcyjności, czyli tracony jest drugi sygnał, proporcjonalny do zmian części rzeczywistej impedancji czujnika. W układach mostkowych nieliniowość mostka wymusza pracę przy niewielkim rozrównoważeniu. Ogranicza to w istotny sposób czułość metody przy akceptowalnym błędzie liniowości. Proponowane w pracy **[H1]** rozwiązanie pozbawione jest powyższych wad. Zastosowany układ współpracujący z czujnikiem indukcyjnym pętlowym umożliwia liniowe przetwarzanie zmian składowych impedancji czujnika na sygnały napięciowe (profile magnetyczne R i X) oraz zapewnia uzyskanie wysokiej czułości. Schemat ideowy wzmacniacza czujnikowego analogowego układu kondycjonowania współpracującego z czujnikiem IL (Inductive Loop) przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Wzmacniacz czujnikowy, gdzie QD - Quadrature Demodulator (szczegółowo przedstawiony na rys. 4) [H1].

Sygnałem wejściowym U_0 układu jest sygnał sinusoidalny o stałej amplitudzie i częstotliwości. Napięcie U_S na wyjściu pierwszego stopnia może być opisane równaniem:

$$U_S = -U_0 \cdot \frac{R_2}{R_1(1 + j\omega R_2 C)} \quad (1)$$

Napięcie U_C na wyjściu drugiego stopnia jest równe:

$$U_C = -U_S \cdot \frac{R_C + j\omega L_C}{R_3} \quad (2)$$

zatem:

$$U_C = U_0 \cdot \frac{R_2(R_C + j\omega L_C)}{R_1 R_3(1 + j\omega R_2 C)} \quad (3)$$

Przy stałym wzmocnieniu wzmacniacza różnicowego równym K napięcie U_{out} na jego wyjściu jest równe:

$$U_{out} = K \cdot (U_C - U_0) = K \cdot \left(U_0 \cdot \frac{R_2(R_C + j\omega L_C)}{R_1 R_3(1 + j\omega R_2 C)} - U_0 \right) \quad (4)$$

zatem:

$$U_{out} = K \cdot U_0 \frac{(R_2 R_C - R_1 R_3) + j\omega(R_2 L_C - R_1 R_2 R_3 C)}{R_1 R_3(1 + j\omega R_2 C)} \quad (5)$$

Uwzględniając zależność (1) można równanie powyższe zapisać w postaci:

$$U_{out} = \frac{-K}{R_2 R_3} \cdot U_S [(R_2 R_C - R_1 R_3) + j\omega R_2 (L_C - R_1 R_3 C)] \quad (6)$$

Jeżeli spełnione będą zależności: $R_2 R_C - R_1 R_3 = 0$ oraz $L_C - R_1 R_3 C = 0$, to napięcie wyjściowe wzmacniacza $U_{out} = 0$, a zmiana tego napięcia odzwierciedlać będzie zmiany składowych impedancji czujnika IL wywołane obecnością pojazdu w obszarze działania czujnika pętlowego. Konieczne jest zatem wstępne równoważenie układu dla samego czujnika (brak obiektów metalowych w zasięgu jego działania) poprzez odpowiedni dobór wartości rezystancji oporników R_2 i R_3 , bądź R_2 i R_1 .

Zmiana składowych impedancji czujnika (części rzeczywistej i urojonej) spowodowana obecnością pojazdu powoduje wyprowadzenie układu ze stanu równowagi. Zmianę napięcia wyjściowego ΔU_{out} można opisać równaniem:

$$\Delta U_{out} = \frac{-K}{R_2 R_3} \cdot U_s [(R_2 (R_C \pm \Delta R_C) - R_1 R_3) + j\omega R_2 ((L_C \pm \Delta L_C) - R_1 R_3 C)] \quad (7)$$

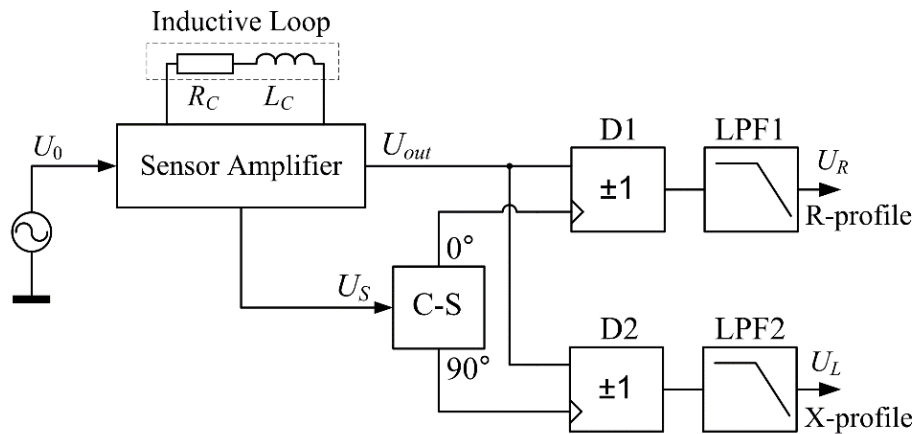
a zatem:

$$\Delta U_{out} = \frac{-K}{R_2 R_3} \cdot U_s (R_2 \cdot \Delta R_C + j\omega R_2 \cdot \Delta L_C) \quad (8)$$

oraz:

$$\Delta U_{out} = \frac{-K}{R_3} \cdot U_s (\Delta R_C + j\omega \cdot \Delta L_C) \quad (9)$$

Jeśli przyjąć, że U_s jest sygnałem odniesienia to zgodnie z równaniem (9) zmiany parametrów zastępczych czujnika indukcyjnego ΔR_C oraz ΔL_C wpływają niezależnie na zmiany części rzeczywistej i urojonej sygnału wyjściowego układu kondycjonowania. Możliwa jest zatem niezależna obserwacja zmian wartości tych parametrów pod warunkiem zastosowania dwóch torów demodulacji synchronicznej, sterowanych odpowiednio sygnałem U_s oraz sygnałem przesuniętym o 90° względem U_s . Schemat blokowy całego układu kondycjonowania współpracującego z czujnikiem indukcyjnym przedstawiono na rys. 4.

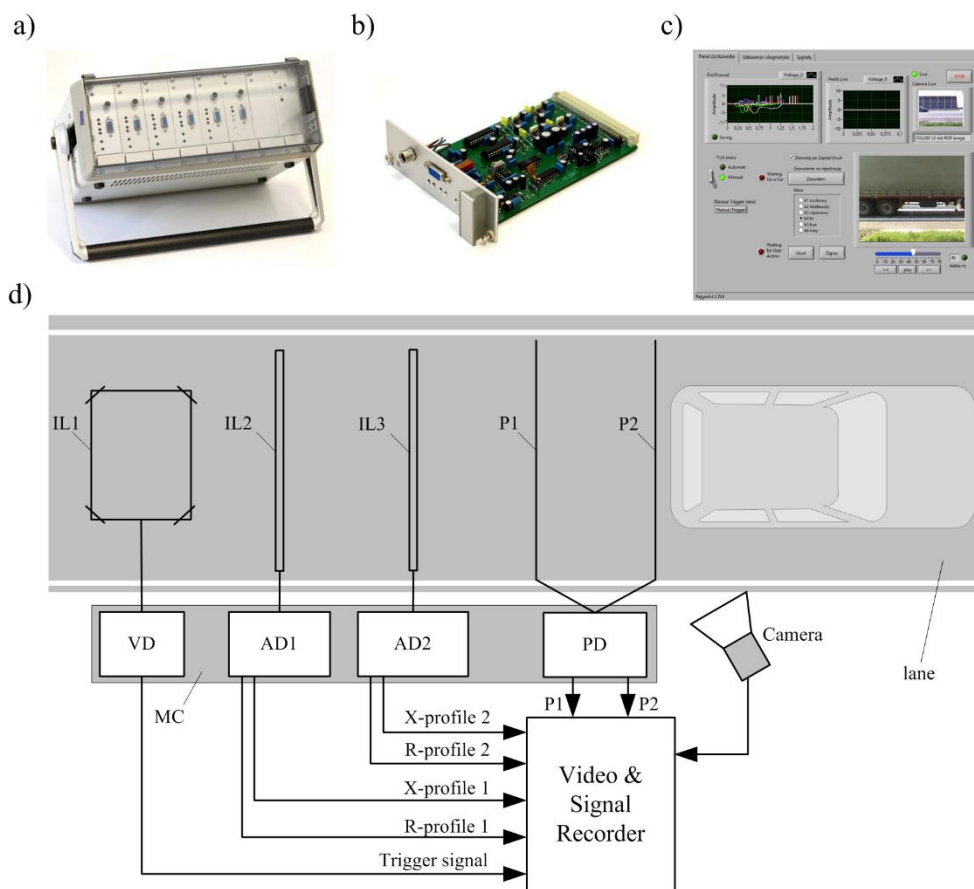


Rys. 4. Schemat blokowy układu kondycjonowania współpracujący z czujnikiem IL zawierający wzmacniacz czujnikowy (*Sensor Amplifier*) z rys. 4. C-S - układ generujący sygnały synchronizujące przesunięte względem siebie o 90 stopni; D1, D2 - demodulatory synchroniczne; LPF1, LPF2 - filtry dolnoprzepustowe [H1].

Sygnał wyjściowy wstępnie zrównoważonego wzmacniacza czujnikowego podawany jest na dwa tory demodulacji synchronicznej, przy czym sygnały sterujące demodulatorami D1 i D2 formowane są na podstawie napięcia U_S . Uzyskiwane są one w bloku C-S z wykorzystaniem układu pętli fazowej synchronizowanej sygnałem U_S . Układ pętli fazowej współpracuje z synchronicznym dzielnikiem częstotliwości złożonym z dwóch przerzutników JK. W stanie synchronizacji pętli na wyjściach przerzutników generowane są sygnały prostokątne o wypełnieniu połówkowym i częstotliwości równej częstotliwości sygnału U_S , przy czym pierwszy z nich (sin) jest zsynchronizowany z sygnałem U_S , natomiast drugi (cos) jest przesunięty o czas równy jednej czwartej okresu tego sygnału. Sygnały te sterują pracą demodulatorów synchronicznych D1 i D2 odpowiednio toru demodulacji części rzeczywistej i urojonej sygnału U_{out} . Napięcia wyjściowe demodulatorów, po dolnopasmowym odfiltrowaniu (filtry LPF1 i LPF2), są zatem proporcjonalne do zmian składowych impedancji czujnika IL.

Prototypowy układ pomiarowy poddano badaniom laboratoryjnym z zastosowaniem modelu czujnika indukcyjnego wykonanego w skali 1:50. Badania miały na celu wyznaczenie charakterystyk statycznych układu oraz błędów przetwarzania. W obszar działania czujnika wprowadzano obiekty metalowe o różnych właściwościach magnetycznych, każdorazowo mierząc napięcia wyjściowe układu. Dla każdego przypadku mierzono, przy pomocy Precision LCR Meter Agilent E4980A, parametry zastępcze czujnika. Uzyskane rezultaty przedstawiono na rysunkach 3 i 4 w [H1] w formie charakterystyk statycznych i ich błędów nieliniowości względem prostych regresji.

Na podstawie sformułowanych wniosków zbudowano system przedstawiony na rys. 5. Pojedynczą kartę systemu do pomiaru profilu R i profilu X przedstawia rys. 5b. Oprogramowanie systemu rejestratora (rys. 5c) wykonano w sposób umożliwiający jednoczesną rejestrację napięć wyjściowych z układów dostarczających profile magnetyczne, sygnałów z czujników piezoelektrycznych (częstotliwość próbkowania 10 kHz) i obrazu wideo (2 sekundy filmu w rozdzielczości 240x320, format AVI, 30 klatek/s). Zbudowany system pomiarowy używano na drogowym stanowisku (droga krajowa DK81 Mikołów-Żory), którego schemat przedstawia rys. 5d.



Rys. 5. Wielokanałowy system pomiarowy: a) wielokanałowy układ kondycjonowania; b) pojedyncza karta systemu; c) interfejs graficzny użytkownika systemu; d) schemat stanowiska badawczego, gdzie: IL1 - czujnik IL do detekcji pojazdu; IL2 i IL3 - wąskie czujniki IL do detekcji osi; P1 i P2 - piezoelektryczne czujniki nacisku do detekcji osi, MC - wielokanałowy system z rys. 5a) wyposażony w układy dedykowane dla poszczególnych czujników (VD - karta detektora pojazdu, AD1 i AD2 - karty detektora osi, PD - karta do czujników piezoelektrycznych) [H1].

Pierwszy indukcyjny czujnik IL1 służy do detekcji obecności pojazdu i wyzwalania procesu rejestracji sygnałów z kolejnych kart systemu (AD1, AD2, PD i kamery). Sygnały wyjściowe

z detektorów piezoelektrycznych osi (P1, P2) są źródłem danych referencyjnych potrzebnych do badania skuteczności układu pętlowej detekcji osi. Skuteczność tę zdefiniowano jako:

$$E_{\text{det}} = \frac{L_k}{N} \cdot 100\% \quad (10)$$

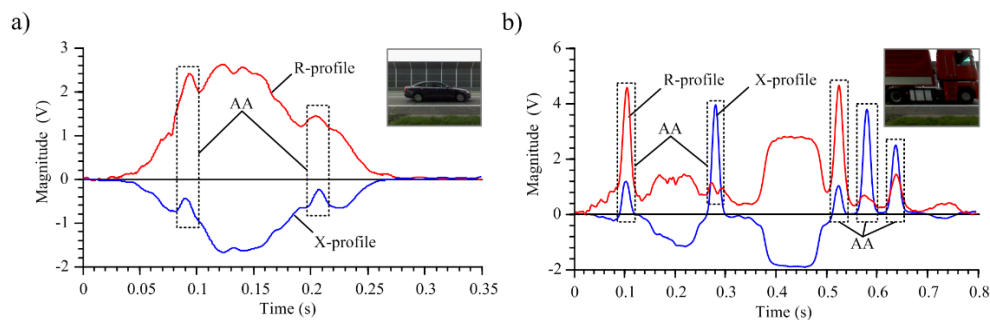
gdzie: L_k - określa liczbę pojazdów k -osiowych, w których prawidłowo, czyli zgodnie z danymi referencyjnymi, wykryto wszystkie osie, N - to liczba pojazdów w testowanej klasie.

Przez kilka tygodni pracy oprogramowanie prawidłowo zarejestrowało kilkadziesiąt tysięcy pojazdów, przy czym ograniczenie w rejestracji stanowiła pojemność zainstalowanego dysku komputera rejestrującego. Do badań dotyczących algorytmu detekcji osi wybrano 4000 tysięcy różnych pojazdów i podzielono na grupy wymienione w tab. 2. Podział na grupy przeprowadzono na podstawie obserwacji zarejestrowanych danych i obrazów video.

Tab. 2. Grupy pojazdów w bazie testowej, gdzie N – liczba pojazdów w grupie, źródło [H1].

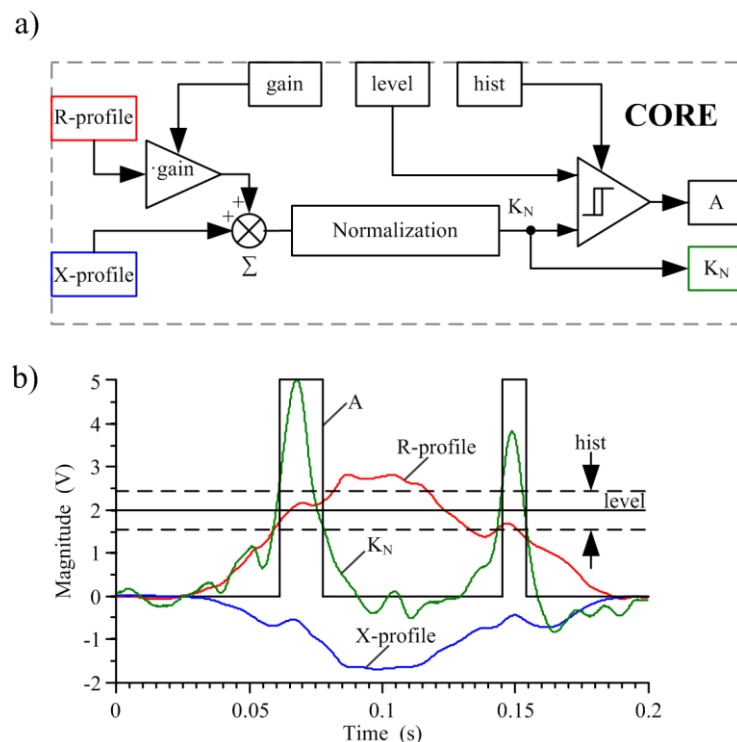
No.	Vehicle Description in Group	N
1	2-axle passenger vehicle with aluminum rims	1000
2	2-axle passenger vehicle with steel rims	1228
3	2-axle delivery van	630
4	2-axle truck and 2-axle bus	175
5	3-axle truck and 3-axle bus	316
6	5-axle truck with lifted axle (4 axles)	234
7	5-axle truck	406
8	4-axle truck	11

Badania habilitanta koncentrowały się na problemie detekcji osi pojazdów oraz osi uniesionych na podstawie profili rozdzielonych na składowe impedancji. Przykładowe typowe profile magnetyczne rezystancji i reaktancji (profil R i profil X) pochodzące z wąskiego czujnika IL dla pojazdu osobowego (samochód osobowy z felgami stalowymi: grupa nr 2 z tab. 2) przedstawiono na rys. 6a. Przykładowe profile dla pojazdu ciężarowego z charakterystyczną skrzynią umieszczoną pomiędzy osią 2 i 3 (grupa nr 7 z tab. 2) przedstawiono na rys. 6b.



Rys. 6. Przykładowe profile R i X z wąskiego czujnika IL: a) pojazdu osobowego; b) pojazdu ciężarowego; AA - oznacza obszary, w których występują artefakty pochodzące od osi pojazdu, [H1].

Schemat funkcjonalny zaproponowanego rdzenia algorytmu detekcji osi przedstawiono na rys. 7a. Uzyskany z układu kondycjonowania profil R jest wzmacniany a następnie sumowany z profilem X. Sygnał wynikowy jest normalizowany. Przyjęto normalizację do poziomu 5 V. Znormalizowany sygnał trafia na wejście programowalnego komparatora z histerezą, przy czym *level* określa poziom odniesienia komparatora, natomiast *hist* - szerokość pętli histerezy. Przykładowe wyniki działania rdzenia algorytmu detekcji osi, wraz z sygnałami wejściowymi i wyjściowymi A i K_N przedstawiono na rys. 7b.



Rys. 7. Rdzeń algorytmu detekcji osi pojazdów: a) schemat funkcjonalny; b) przykład ilustrujący zasadę działania i przetwarzania sygnałów, przy czym R i X-profile to sygnały wejściowe, *gain*, *level*, *hist* – ustawiane parametry pracy, A, K_N – sygnały wyjściowe [H1].

Parametrami układu, które mogą być przedmiotem doboru przez użytkownika są wzmacnienie *gain*, poziom komparacji *level* oraz szerokość histerezy komparatora *hist*. W celu określenia optymalnych wartości tych parametrów, dla poszczególnych klas pojazdów, wyznaczono charakterystyki przedstawiające zależność skuteczności (10) od wartości tych parametrów w określonych przedziałach ich zmienności. Kolejno dla otrzymanych charakterystyk odczytano wartości, dla których skuteczność (10) osiąga wartość maksymalną dla rozpatrywanych klas pojazdów. Optymalne parametry zestawiono w tab. 3.

Tab. 3. Optymalne wartości parametrów ustawień rdzenia algorytmu, wyznaczone dla maksymalnej skuteczności (10) wykrywania osi w rozpatrywanych grupach [H1].

No.	Vehicle Description in Group	Level	Hist	Gain	Suspension
1	2-axle passenger vehicle with aluminum rims	1.8	0.66	0.50	Low
2	2-axle passenger vehicle with steel rims	1.9	0.73	0.51	
3	2-axle delivery van	1.8	0.54	0.54	
4	2-axle truck and 2-axle bus	0.8	0.41	0.18	High
5	3-axle truck and 3-axle bus	0.8	0.23	0.24	
6	5-axle truck with lifted axle (4 axles)	0.4	0.02	0.68	
7	5-axle truck	0.8	0.34	0.27	

Zróznicowanie optymalnych wartości parametrów algorytmu detekcji osi dla poszczególnych klas pojazdów wskazuje na konieczność wstępnej klasyfikacji wszystkich pojazdów na pojazdy o niskim i wysokim zawieszeniu (tab. 3). W tym celu wykorzystano heurystyczny parametr

$$D = \frac{L_x}{L_m} \cdot 100\% \quad (11)$$

gdzie: L_m – liczba wszystkich próbek profilu X, L_x – liczba dodatnich próbek w profilu X.

Spełnienie warunku $D > 10\%$, pozwala stwierdzić, że pojazd ma wysokie zawieszenie. W przeciwnym przypadku przyjmowano, że badany pojazd ma niskie zawieszenie. W wyniku przeprowadzonych badań został przyjęty optymalny zestaw wartości parametrów dla rdzenia algorytmu (rys. 7a) dla pojazdów z wysokim zawieszeniem: $gain=0.21$, $level=0.8$, $hist=0.45$, a dla pojazdów z niskim zawieszeniem: $gain=0.5$, $level=1.8$, $hist=0.5$. Skuteczność detekcji osi przy zastosowaniu rdzenia badanego algorytmu (rys. 7a) przedstawia tab. 4.

Tab. 4. Skuteczność detekcji osi (10) badanego rdzenia algorytmu detekcji osi (rys. 7a), [H1].

No.	Vehicle Description in Group	Number of Axles Detected					
		1	2	3	4	5	
1	2-axle passenger vehicle with aluminum rims	3.8	87.0	7.0	1.9	0.3	Accuracy (10) in [%]
2	2-axle passenger vehicle with steel rims	2.9	89.3	6.3	1.1	0.0	
3	2-axle delivery van	0.8	97.3	1.7	0.2	0.0	
4	2-axle truck and 2-axle bus	3.4	95.4	0.6	0.6	0.0	
5	3-axle truck and 3-axle bus	0.0	0.3	99.1	0.6	0.0	
6	5-axle truck with lifted axle (4 axles)	0.0	0.0	0.4	97.4	2.2	
7	5-axle truck	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	
8	4-axle truck	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	

Analiza wyników zestawionych w tab. 4 wskazała na konieczność takiej modyfikacji i rozbudowy algorytmu detekcji osi, aby zmniejszyć skalę problemów dotyczących:

1) Błędne wykrywanie jednej osi w pojazdach dwuosiowych (tab. 4, kolumna 1). Problem ten nie występuje w przypadku pojazdów liczących więcej niż dwie osie.

2) Błędno wykrywania większej liczby osi niż dwie w pojazdach dwuosiowych (tab. 4, kolumny 3-5).

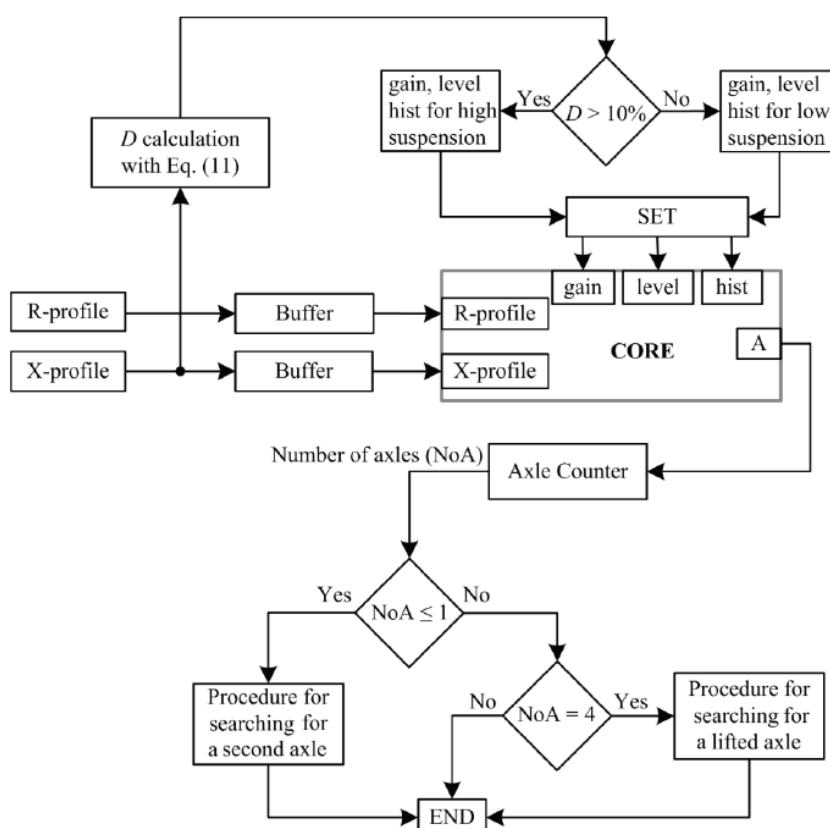
3) Niskiej skuteczności wykrywania osi podniesionej w pojazdach ciężarowych, wynoszącej tylko 2.2 %.

Ostatecznie habilitant zaproponował algorytm przedstawiony na rys. 8. Uzyskaną w wyniku badań skuteczność detekcji osi przedstawia tab. 5.

Tab. 5. Dokładność detekcji osi osiągnięta przez algorytm z rys. 8, źródło [H1].

No.	Vehicle Description in Group	Number of Axles Detected				
		1	2	3	4	5
1	2-axle passenger vehicle with aluminum rims	0.0	99.0	1.0	0.0	0.0
2	2-axle passenger vehicle with steel rims	0.0	99.3	0.7	0.0	0.0
3	2-axle delivery van	0.0	99.7	0.3	0.0	0.0
4	2-axle truck and 2-axle bus	0.0	98.8	0.6	0.6	0.0
5	3-axle truck and 3-axle bus	0.0	0.3	99.1	0.6	0.0
6	5-axle truck with lifted axle (4 axles)	0.0	0.0	0.4	27.8	71.8
7	5-axle truck	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
8	4-axle truck	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0

Accuracy (10) in [%]



Rys. 8. Algorytm detekcji osi pojazdów bazujący na profilach R i X, źródło [H1].

Dodatkowy algorytm wyszukiwania drugiej osi jest uruchamiany w przypadku wykrycia pojazdu jednoosiowego. Zastosowana procedura szukania drugiej osi polega na stopniowym obniżaniu poziomu odniesienia komparatora *level*, aż do wykrycia drugiej osi pojazdu lub osiągnięcia poziomu *level* ustalonego jako minimalny. Wykrywanie osi nadmiarowych w pojazdach dwuosiowych jest spowodowane nisko zawieszonymi elementami ferromagnetycznymi (zderzak, wahacze, rury, sprężyny, pręty, itp.). Powodują one powstawanie w sygnale K_N (rys. 7) impulsów o dużej amplitudzie, jednak na ogół niższej, niż impulsy od elementów kół pojazdu. Wprowadzona procedura szukania drugiej osi oraz wstępne określenie wysokości zawieszenia pojazdu, w przypadku pojazdów nisko zawieszonych, pozwala zwiększyć wcześniej wyznaczoną optymalną wartość parametru *level* z wartości początkowej *level*=1.8 do wartości znacznie wyższej *level*=4 na wczesnym etapie. Impulsy występujące w sygnale K_N od osi podniesionej, w porównaniu z impulsami od kół toczących się po nawierzchni drogi mają wielokrotnie niższą amplitudę. Z przeprowadzonych badań algorytmu wynika, że wysoką skuteczność detekcji osi podniesionych uzyskuje się dla nastaw: *level*=0.4, *hist*=0.02, *gain*=0.68 (tab. 3). Oznacza to, że w celu wykrycia osi podniesionej pojazdów ciężarowych algorytm powinien zostać uruchomiony z nowymi nastawami. Zasada działania algorytmu wykrywania osi podniesionej jest więc następująca. W przypadku wykrycia czterech osi wynik ten zostaje zapamiętany. Następnie zostaje ponownie uruchomiony algorytm z nastawami dostosowanymi do detekcji osi podniesionej. Jeśli one nie skutkują wykryciem osi podniesionej w pierwszym kroku, to zostaje dodatkowo uruchomiona procedura, która stopniowo obniża poziom odniesienia komparatora *level*, aż do wykrycia osi podniesionej lub do osiągnięcia wartości przyjętej za minimalną (*level*=0.1). W przypadku znalezienia osi następuje sprawdzenie, czy znajduje się ona pomiędzy osiami drugą a czwartą.

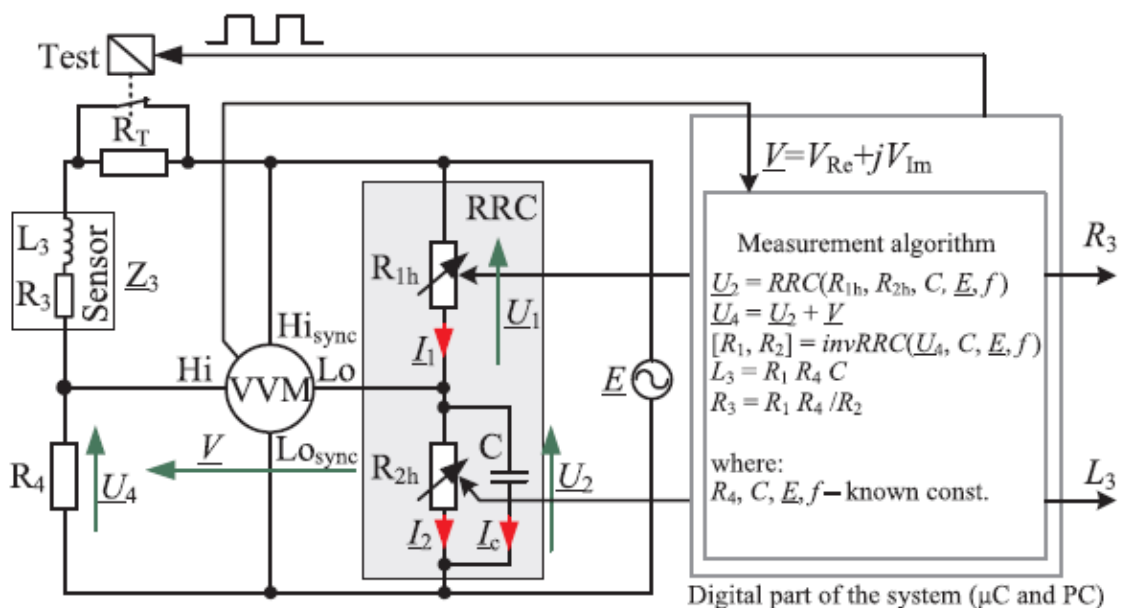
Zastosowany analogowy układ kondycjonowania poprawnie działał w warunkach rzeczywistego ruchu drogowego i umożliwił uzyskiwanie sygnałów zmian składowych impedancji wąskiego czujnika indukcyjnego pętlowego. Opracowane przez habilitanta oprogramowanie integrujące system pomiarowy umożliwiło zbudowanie referencyjnej bazy danych składającej się z sygnałów zmian składowych impedancji, sygnałów z czujników referencyjnych nacisku osi i obrazów video koniecznych do weryfikacji osi uniesionej.

W wyniku badań nad nowymi, w porównaniu z istniejącymi mostkowymi, czy opartymi o strukturę generatora LC, układami impedancyjnymi do kondycjonowania sygnału czujnika indukcyjnego pętlowego możliwe stało się opracowanie detektora osi pojazdów. Detektor

bazuje na profilach magnetycznych reprezentowanych jako dwa rozdzielane w układzie kondycjonowania sygnały tj. sygnał zmian rezystancji i sygnał zmian reaktancji, nazwane profilem rezystancyjnym i reaktancyjnym pojazdu. **Osiągnięcia przedstawione w pracach [H1] i [C1] pozwoliły na rozszerzenie definicji profilu magnetycznego pojazdu.**

Oryginalnym wkładem habilitanta w rozwój dyscypliny AEEiTK jest projekt i realizacja oprogramowania oraz integracja systemu pomiarowego oraz badania nad algorytmami do bezkontaktowej detekcji osi pojazdów uczestniczących w ruchu drogowym w tym pojazdów jadących z osią uniesioną z wysoką skutecznością detekcji (98,8 % i 71,8 %) tj. wyższą niż podczas stosowania układu z pojedynczym sygnałem wyjściowym [18].

Równolegle z wyżej opisanymi pracami habilitant opracował alternatywny system integrujący znany, bardzo czuły mostek Maxwella-Wiena i woltomierz wektorowy (rys. 9) do uzyskiwania profili R i X, które wymaga algorytm detekcji osi.



Rys. 9. Zaproponowana metoda pomiaru małych i szybkich zmian parametrów impedancji wąskiego czujnika indukcyjnego pętlowego na bazie mostka Maxwella-Wiena z woltomierzem wektorowym (VVM) [H2].

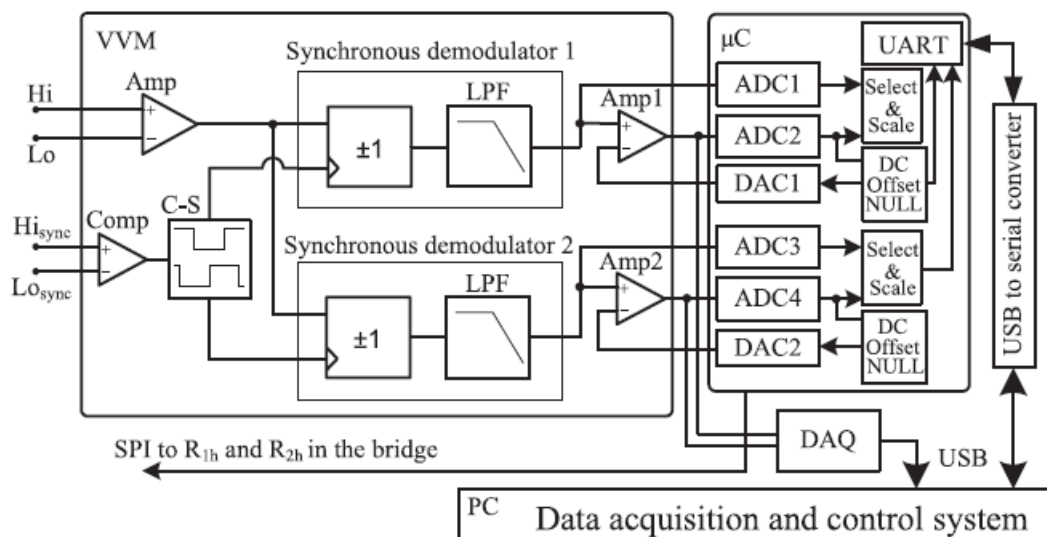
Habilitant wynalazł metodę pomiaru małych zmian impedancji w układzie ww. mostka, która działa na podstawie zespolonego napięcia nierównowagi i znanych parametrów elementów mostka ($R_4, E, R_{1h}, R_{2h}, C$) oraz wykorzystuje zaproponowane algorytmy 1, 2 i 3.

Algorytm 1. Funkcja <i>RRC</i> <pre> function $\underline{U}_2 = RRC(R_{1h}, R_{2h}, C, \underline{E}, f)$ $X_C = 1/(i \ 2\pi f \ C);$ $\underline{Z}_2 = (R_{2h} \ X_C)/(R_{2h} + X_C);$ $\underline{U}_2 = \underline{E} \ \underline{Z}_2/(R_{1h} + \underline{Z}_2);$ end </pre>	Algorytm 2. Funkcja <i>invRRC</i> (rys. 9) <pre> function $[R_1, R_2] = invRRC(\underline{U}_2, C, \underline{E}, f)$ $\underline{U}_1 = \underline{E} - \underline{U}_2;$ $\varphi_1 = \text{atan}(\text{imag}(\underline{U}_1)/\text{real}(\underline{U}_1));$ $\varphi_2 = \text{atan}(\text{imag}(\underline{U}_2)/\text{real}(\underline{U}_2));$ $U_{1m} = \text{abs}(\underline{U}_1);$ $U_{2m} = \text{abs}(\underline{U}_2);$ $X_{Cm} = 1/(2\pi f \ C);$ $R_1 = \sin(\varphi_1 + \text{abs}(\varphi_2)) \ X_{Cm} \ (U_{1m}/U_{2m});$ $R_2 = \tan(\varphi_1 + \text{abs}(\varphi_2)) \ X_{Cm};$ end </pre>
Algorytm 3. Funkcja do korekcji błędu fazowego woltomierza wektorowego <pre> function $[V_{Re_c}, V_{Im_c}] = correction(V_{Re}, V_{Im}, \varphi_c)$ $V_m = \sqrt{V_{Re}^2 + V_{Im}^2};$ $\varphi = \text{atan2}(V_{Im}, V_{Re});$ $V_{Re_c} = V_m \cos(\varphi + \varphi_c);$ $V_{Im_c} = V_m \sin(\varphi + \varphi_c);$ end </pre>	

System pozwala na ciągły pomiar parametrów impedancji, jest bardzo szybko równoważony, nawet w jednym kroku, może pracować w stanie niepełnej równowagi, zapewnia wysoką czułość, przez co nadaje się do współpracy z wąskim czujnikiem indukcyjnym pętlowym.

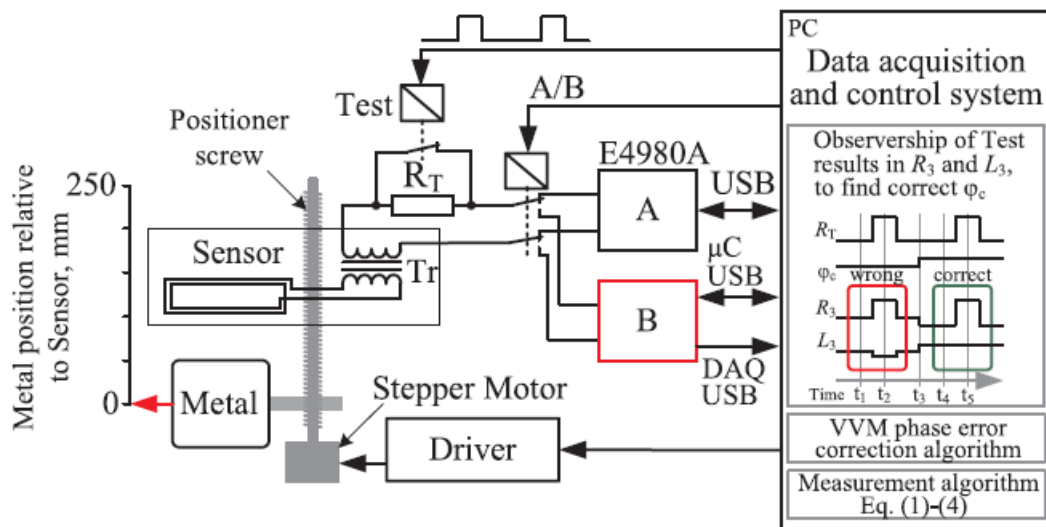
W mostku zastosowano 10-bitowe, sterowane cyfrowo (poprzez SPI) potencjometry (AD5293) o rezystancji znamionowej 20 kΩ i 100 kΩ, odpowiednio dla R_{1h} i R_{2h} . Dla dedykowanej częstotliwości roboczej ($f=10$ kHz) i nominalnych parametrów czujnika $Z_{3N}=(152,4 + j431,5)\Omega$ (czujnik IL widziany przez transformator) dobrano: $R_4=590\Omega$, $C=963\text{pF}$ (wstępnie zmierzone w 25°C, $C_N = 1 \text{ nF} \pm 5\%$). Woltomierz wektorowy (VVM), został zrealizowany za pomocą dwóch synchronicznych demodulatorów (AD698), a filtry dolnoprzepustowe zostały skonfigurowane na częstotliwość graniczną 100 Hz. Układ AD698 zawiera sinusoidalny generator napięcia, który został użyty do zasilenia mostka. Blok C-S w VVM (rys. 10), dostarcza dwa sygnały prostokątne precyzyjnie przesunięte o 90°. Zastosowano technikę generowania sygnału o częstotliwości 4-krotnie większej niż częstotliwość wejściowa z dwukrotnym podziałem przez dwa. Zastosowano pętle synchronizacji fazowej PLL (4046) i dwa przerzutniki JK-MS (4027) jako dzielniki

częstotliwości. Wzmocnienie wzmacniacza wejściowego (Amp) wynosi 2 V/V. Wzmocnienie w torze demodulatorów synchronicznych wynosi 5 V/V. Wzmocnienie Amp1 i Amp2 wynosi 100 V/V. Prototyp urządzenia wykorzystuje 12-bitowy przetwornik ADC. Przetworniki ADC1 i ADC3 o zakresach pomiarowych $\pm 10\text{V}$ i są stosowane w przypadku dużego rozróżnoważenia mostka, podczas gdy ADC2 i ADC4 umożliwiają pomiar w mniejszym zakresie $\pm 10\text{ mV}$. Ze względu na ograniczoną rozdzielczość R1h i R2h, synchroniczne demodulatory mają tendencję do generowania przesunięcia napięcia (nawet kilkadziesiąt mV) na swoich wyjściach. W związku z tym, aby uniknąć nasycenia Amp1 i Amp2 zrealizowano odejmowanie tego offsetu przy użyciu 12-bitowych DAC1 i DAC2, dostępnych w μC (Silabs C8051F410). Mikrokontroler został zaprogramowany w języku C z wykorzystaniem środowiska Silicon Labs.



Rys. 10. Woltomierz wektorowy (VVM) z interfejsami do komputera, gdzie C-S – blok dostarczający dwa sygnały precyzyjnie przesunięte o 90° , LPF – filtr dolnoprzepustowy, DAQ – karta akwizycji danych [H2].

Autor zaproponował sposób na weryfikację błędu pomiaru kąta fazowego i funkcję korekcji błędu fazowego, która została wbudowana w system. Do określenia błędu fazowego na podstawie wyników pomiaru parametrów impedancji czujnika służy rezystor $R_T = 0,5\ \Omega$, który jest nieindukcyjny i może być zwierany przez normalnie zamknięty przekaźnik Test (rys. 9). Procedura zakłada obserwację wyjść (R_3 , L_3) podczas kluczowania przekaźnika Test. Zmiana samej rezystancji w obwodzie czujnika powinna skutkować zmianą jedynie w składowej rzeczywistej impedancji. Jeśli tak nie jest, określany jest błąd fazowy φ_C i stosuje się algorytm 3 do korekcji, aż rezultat testu będzie prawidłowy. Korekcję błędu fazowego oraz stanowisko do badań metody przedstawia rys. 11.

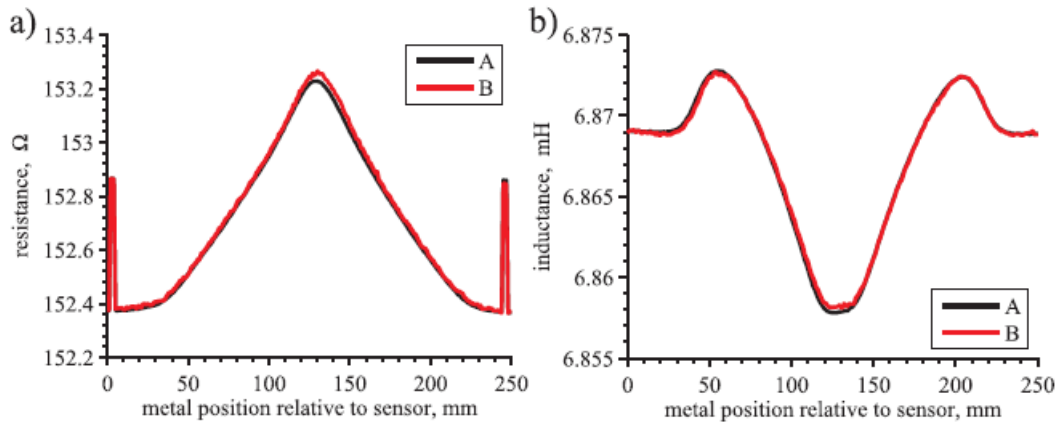


Rys. 11. Stanowisko laboratoryjne do testowania układu pomiaru impedancji, gdzie A jest instrumentem referencyjnym, B jest testowanym systemem, którego algorytmy działają również na komputerze PC [H2].

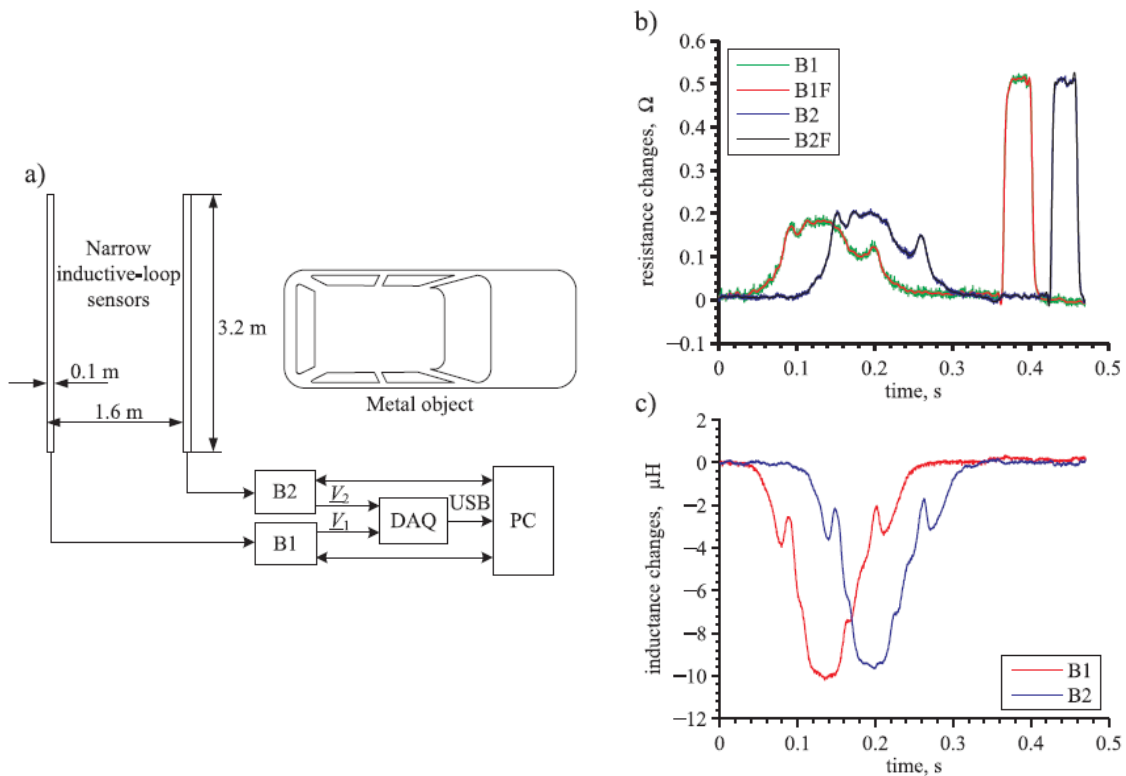
Metalowym obiektem była blacha ferromagnetyczna o wymiarach $100 \times 100 \times 1 \text{ mm}$. Dedykowane oprogramowanie komputerowe przeprowadziło pozycjonowanie metalowego obiektu i akwizycję danych. Algorytmy 1-3 zostały zaimplementowane w środowisku LabVIEW z zainstalowanym modulem MathScript, który wykonuje kod w składni języka MATLAB w czasie rzeczywistym. Jako przyrząd referencyjny użyto precyzyjnego miernika LCR E4980A. Porównanie wyników pomiarów za pomocą przyrządu referencyjnego (A) i systemu mostka Maxwella-Wiena z VVM (B) przedstawiono na rys. 12. W tym eksperymencie pomiary wykonywano w czasie, gdy położenie obiektu metalowego względem czujnika zostało już osiągnięte, a obiekt znajdował się w pożądanym miejscu. Maksymalny błąd względny w odniesieniu do wartości międzyszczytowej zmiany impedancji dla obiektu metalowego nie przekracza 5%. Widoczne impulsy w sygnale rezystancyjnym i brak impulsów w sygnale indukcyjności, podczas Testu ($R_T = 0,5 \Omega$), wskazują, że zmiana rezystancji nie wpływa na indukcyjność co potwierdza prawidłowe rozdzielanie składowych impedancji czujnika.

W celu sprawdzenia właściwości dynamicznych układu w rzeczywistych warunkach drogowych skonfigurowano dwukanałowy układ pomiarowy, zaprezentowany na rys. 13a. Podsystemy (B1 i B2) składają się z transformatora, mostka Maxwella-Wiena z obwodem testowym, woltomierza wektorowego, mikrokontrolera oraz konwertera USB na port szeregowy. Komputerowy system pomiarowy steruje i zarządza pracą podsystemów B1 i B2, a na końcu rejestruje wyniki. W celu uniknięcia wzajemnych zakłóceń częstotliwość zasilania

mostka w podsystemie B1 wynosi 15 kHz, natomiast w B2 10 kHz. Podsystemy zostały podłączone do wąskich czujników indukcyjnych zlokalizowanych na drodze krajowej nr DK81.



Rys. 12. Rezultat porównania wyników pomiarów wartości impedancji czujnika przyrządem odniesienia (A) i badanym mostkiem (B): (a) dla rezystancji czujnika, (tu widoczny jest impuls podczas procedury testowania kąta fazowego dwukrotnie, na początku i na końcu sygnału); b) dla indukcyjności czujnika [H2].



Rys. 13. a) Dwukanałowy system do pomiaru małych i szybkich zmian w składowych impedancji wąskiego czujnika indukcyjnego pętlowego od pojazdu; b) zmiany rezystancji; (c) zmiany indukcyjności [H2].

Częstotliwość próbkowania DAQ została ustawiona na 10 kS/s na każdym z czterech kanałów używanych do pozyskiwania napięć wyjściowych VVM (V_1 i V_2). Algorytm pomiarowy na PC obliczał składowe impedancji z częstotliwością równą częstotliwości próbkowania DAQ.

Przykładowy eksperyment wyglądał następująco (rys. 13a). Pojazd osobowy przejechał przez stanowisko z wąskimi czujnikami indukcyjnymi pętlowymi, następnie system przeprowadził procedurę testową w obwodzie mostka (rys. 13b). W tym czasie rejestrowano wyniki pomiarów rezystancji i indukcyjności czujnika. Ponadto w czasie $t=0$ zmierzono wartości rezystancji i indukcyjności, które wyniosły $R_{B1}=126,2\Omega$ i $L_{B1}=6,01$ mH, oraz $R_{B2}=121,8\Omega$ i $L_{B2}=5,91$ mH, odpowiednio dla podsystemów B1 i B2. Wartości uzyskane w czasie $t=0$ wykorzystano do obliczenia sygnałów zmian rezystancji i indukcyjności. Pozwala to na prezentację wyników w jednym układzie współrzędnych. Sygnały zmian rezystancji i indukcyjności przedstawiono odpowiednio na rys. 13b i 13c. Warto zauważyć, że większy szum występuje w sygnałach zmian rezystancji niż w sygnałach zmian indukcyjności. Sygnały zmiany rezystancji (rys. 13b) poddane zostały filtracji cyfrowej, w wyniku której otrzymano dodatkowe sygnały B1F i B2F. Filtry dolnoprzepustowe wewnątrz VVM zostały skonfigurowane do pracy z częstotliwością odcięcia 100 Hz. Filtry te ograniczają czas narastania sygnału wyjściowego VVM, a także ograniczają górne pasmo pracy systemu. Na podstawie obserwacji sygnału zmiany rezystancji w trakcie procedury badawczej wyznaczono praktyczny czas narastania na 5 ms. Sygnały zmiany rezystancji i indukcyjności zawierają artefakty pochodzące od kół pojazdu widoczne jako lokalne maksima w sygnale na rys. 13c. Na podstawie czasu wystąpienia tych artefaktów i odległości między wąskimi czujnikami indukcyjnymi pętlowymi obliczono, że pojazd przejechał przez stację z prędkością 115 km/h.

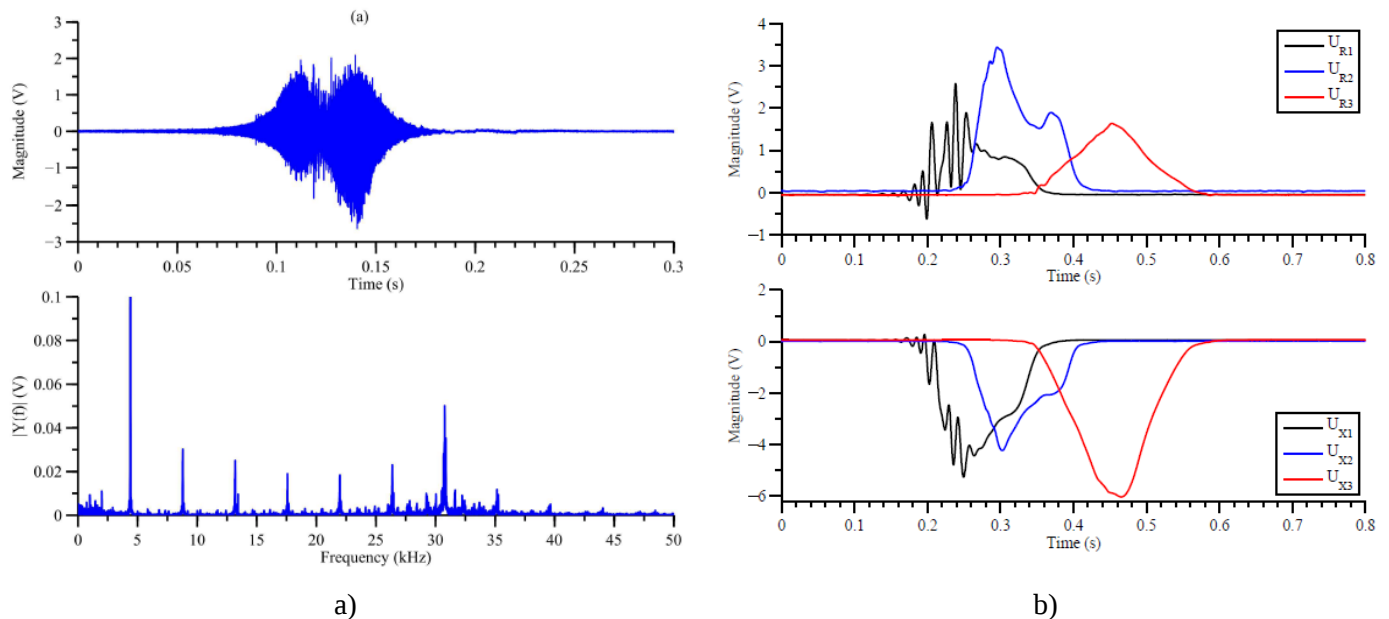
W badaniach porównawczych z miernikiem impedancji E4980A (Keysight), wykonanych na zbudowanym do tego celu stanowisku laboratoryjnym (rys. 4 w [H2]), błąd w odniesieniu do wartości międzyszczytowej zmian impedancji nie przekracza 5%. System przeszedł również eksperymenty na stanowisku drogowym wyposażonym w czujniki wąskie. Wyniki badań są opublikowane w prestiżowym czasopiśmie Measurement jako indywidualna praca [H2]. **Oryginalnym wkładem habilitanta w rozwój dyscypliny AEEiTK jest opracowana i przetestowana metoda pomiaru składowych impedancji wąskiego czujnika indukcyjnego pętlowego z mostkiem Maxwella-Wiena i woltomierzem wektorowym pozwalająca na zastosowanie systemu do uzyskiwania sygnałów użytecznych (rezystancyjnych i reaktancyjnych profili pojazdów), wymaganych w szczególności do detekcji osi, w tym osi uniesionej.**

2. Opracowanie układów do pomiaru impedancji jednocześnie na wielu częstotliwościach dla celów kondycjonowania sygnału czujnika indukcyjnego pętlowego o odpowiednio wysokiej czułości dla czujników wąskich

[C2] Z. Marszałek, R. Sroka, T. Żegleń: „Multi-frequency conditioning system of the inductive loop sensor - simulation investigations”, 22nd international conference on Methods and Models in Automation and Robotics, IEEE, 2017.

[H3] Z. Marszałek, K. Duda: „Multifrequency vector measurement system for reliable vehicle magnetic profile assessment”, Sensors, ISSN 1424-8220, vol. 20, is. 17, art. no. 4933, s. 1–15, 2020.

Elementy składowe napędu pojazdów samochodowych generują zakłócenia elektromagnetyczne (EMI) i co istotne zakłócenia te mają charakter wąskopasmowy. Mogą one zakłócać proces pomiaru składowych impedancji czujnika indukcyjnego pętlowego, co było obserwowane podczas prac badawczych realizowanych również w warunkach rzeczywistego ruchu drogowego. Na rys. 14a pokazano zarejestrowany sygnał EMI na zaciskach czujnika indukcyjnego pętlowego podczas przejazdu pojazdu i widmo DFT tego sygnału. Natomiast na rys. 14b pokazano efekty jakie mogą być obserwowane w rejestrowanych profilach rozdzielonych na składowe impedancji w sytuacji, gdy zakłócenia wystąpią w paśmie pracy układu kondycjonowania. Przypadłość ta dotyczy zarówno układów mostkowych jak i układów przedstawionych w pracach [H1], [H2], [C1]. Wobec tego problemu, który dotyczy około 10 % rejestrowanych sygnałów, podjęto badania modelowe dotyczące wieloczęstotliwościowego układu kondycjonowania sygnału czujnika indukcyjnego pętlowego pod kątem jego wrażliwości na zakłócenia wąskopasmowe wchodzące i niewchodzące w pasmo pracy układu. Habilitant wykazał, że takie zakłócenia mogą mieć wpływ na kształt uzyskiwanego profilu w szczególności w sytuacji, gdy w pobliżu częstotliwości prądu pomiarowego (nośnego) wystąpią zakłócenia, tj. gdy częstotliwość różnicowa ($|\text{zakłócenia} - \text{nośna}|$) znajdzie się w paśmie przepustowym filtrów wyjściowych (dolnoprzepustowych).



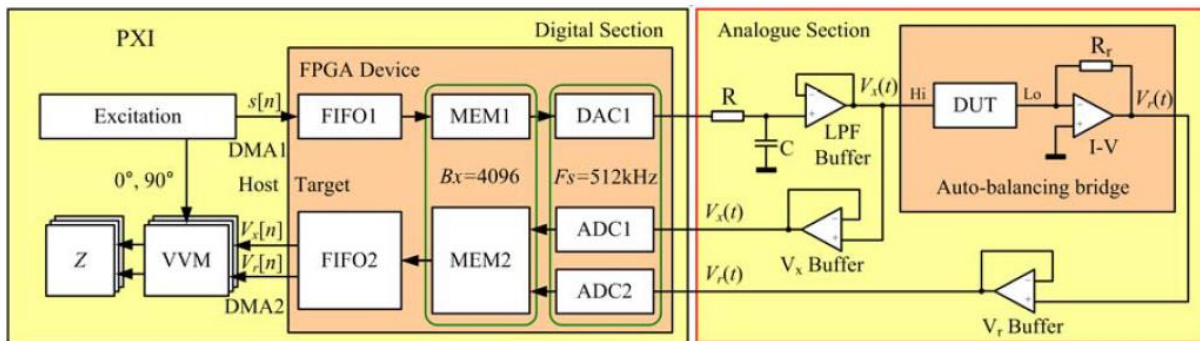
Rys. 14. a) Sygnał EMI zarejestrowany na zaciskach czujnika indukcyjnego pętlowego podczas przejazdu pojazdu i widmo DFT (poniżej); b) efekt zakłóceń EMI widoczny w sygnałach reprezentowanych linią czarną, źródło [C2].

Co ważne, profile uzyskiwane jednocześnie na różnych częstotliwościach składowych prądu pomiarowego pozostają niezakłócone i dlatego też niezakłócone profile pozwalają na poprawny pomiar parametrów pojazdu w ruchu drogowym. Trzeba nadmienić, że pomiar parametrów pojazdu realizowany jest zawsze w ramach jednej szansy, czyli jednego przejazdu bez możliwości powtórzeń w rzeczywistym ruchu drogowym.

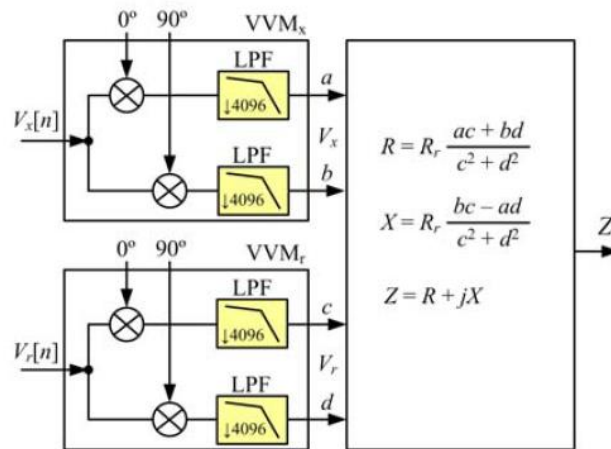
Oryginalnym wkładem habilitanta w rozwój dyscypliny AEEiTK są wyniki badań symulacyjnych przedstawione na forum międzynarodowej konferencji Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR 2017) i opublikowane w [C2], które potwierdzają, że wieloczęstotliwościowy układ pomiaru impedancji daje możliwość zwiększenie niezawodności w systemach pomiaru parametrów pojazdów w ruchu drogowym ponieważ wprowadza redundancję w ramach jednej szansy na prawidłowy pomiar profilu pojazdu.

Wnioski uzyskane w wyniku badań symulacyjnych skłoniły habilitanta do przeprowadzenia prac dotyczących projektu, budowy, uruchomienia i przetestowania w warunkach laboratoryjnych systemu mierzącego impedancję czujnika indukcyjnego pętlowego na trzech częstotliwościach składowych prądu pomiarowego jednocześnie. Schemat budowy trójczęstotliwościowego systemu pomiaru impedancji przedstawiono na rys. 15 i 16. Układ składa się z części analogowej i cyfrowej, przy czym część analogowa została znacznie zredukowana

w stosunku do rozwiązań przedstawionych we wcześniejszych pracach [H1] i [H2]. Generowanie sygnału zasilającego (*Excitation*), obliczenia napięć i prądów zespolonych oraz wyznaczanie impedancji przeniesiono do części cyfrowej, zrealizowanej z wykorzystaniem przemysłowego komputera NI-PXI z zaawansowaną kartą przetworników ADC i DAC z dostępem przez FPGA. **Część analogowa nie zawiera rezystorów służących do równoważenia układu, co jest korzystne i sprawdza się praktyce. Jest to znaczący krok w dążeniu do wypracowania systemu niewymagającego regulacji a zwłaszcza ręcznego strojenia.** Dużą czułość na małe zmiany w parametrach impedancji czujnika (na schemacie z rys. 15 blok DUT) uzyskano stosując nadpróbkowanie (512 kHz) i uśrednianie (z 4096 próbek) realizowane w bloku cyfrowego woltomierza wektorowego (VVM) zintegrowanego z blokiem wyliczającym impedancję Z (rys. 16). Zbudowany i uruchomiony przez habilitanta system został poddany szczegółowym badaniom w warunkach statycznych. Na rys. 17 pokazano schemat opracowanego i dostosowanego do nowych badań stanowiska laboratoryjnego, używanego wcześniej w pracy [H2].

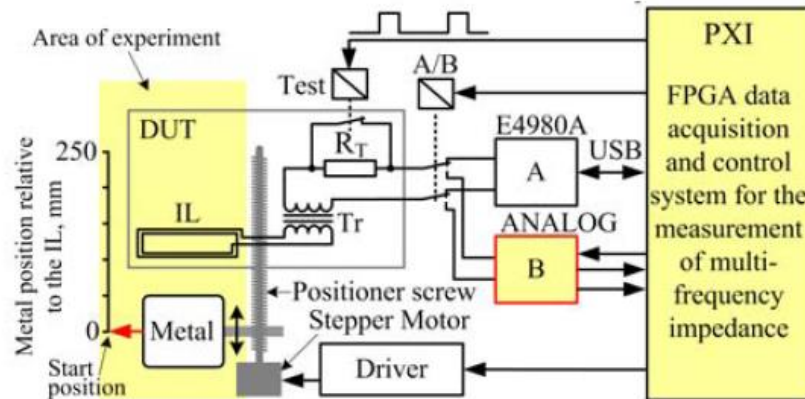


Rys. 15. Trój-częstotliwościowy jedno-kanalowy system pomiaru impedancji, źródło [23].



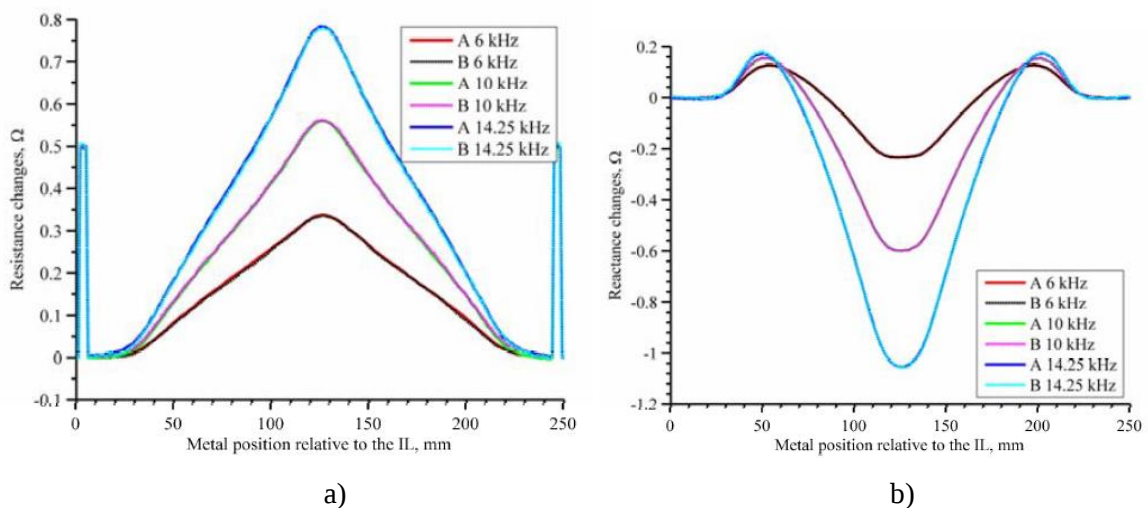
Rys. 16. Schemat realizacji pojedynczego bloku VVM z rys. 15, źródło [23].

Do badań włączona została, świetnie sprawdzająca się w praktyce, procedura testowania poprawności działania całego systemu pomiarowego opierająca się na dodatkowym rezystorze ($R_T = 0,5 \Omega$) włączonym szeregowo z czujnikiem indukcyjnym pętlowym. Rezystor R_T jest pomijany w układzie poprzez normalnie zwarty przełącznik Test (rys. 17).



Rys. 17. Schemat laboratoryjnego stanowiska badawczego do testowania zaproponowanego systemu, A – przyrząd referencyjny, B – badany system, źródło [23].

Na rys. 18 zestawiono rezultat laboratoryjnego porównania wyników pomiaru impedancji systemu badanego (B) z wynikami uzyskanymi z precyzyjnego miernika impedancji E4980A (Agilent) zastosowanego jako przyrząd referencyjny (A).



Rys. 18. Wyniki laboratoryjnych pomiarów składowych impedancji (a) R, b) X) uzyskanych z przyrządu referencyjnego w zestawieniu z wynikami systemu pomiaru impedancji mierzonej jednocześnie na trzech częstotliwościach. Częstotliwości prądu pomiaru impedancji podano w legendzie, przy czym opis rozpoczynający się od A oznacza przyrząd referencyjny, B – badany system, źródło [23].

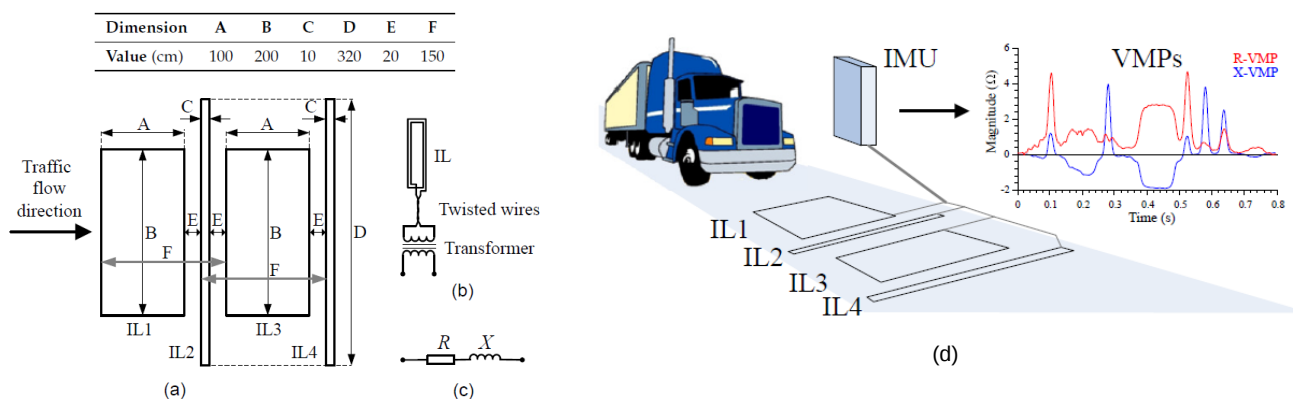
Przedstawione na konferencji ICSES2018 prace wstępne potwierdziły: 1) możliwość znacznej cyfryzacji impedancyjnego układu kondycjonowania sygnału czujnika indukcyjnego pętlowego, 2) osiąganie odpowiednio wysokiej czułości pomiarowej poprzez zastosowanie

nadpróbkowania i uśredniania, 3) dużą dokładność pomiaru impedancji na 3 częstotliwościach jednocześnie.

W testach laboratoryjnych błąd dla części rezystancyjnej (tabela II w [22]) nie przekroczył 2 %, a błąd dla składowej reaktancyjnej nie przekroczył 1.1 % (w odniesieniu do wartości międzyszczytowej). Dla zastosowań w układach do kondycjonowania sygnału czujnika indukcyjnego pętlowego uzyskany wynik porównania jest bardzo dobry. Stwierdzono również bardzo niski poziom „przesłuchu” sygnałów składowych rezystancyjnych do składowych reaktancyjnych dla wszystkich trzech składowych częstotliwości prądu pomiarowego. Widoczny impuls o amplitudzie $0,5 \Omega$ na początku i końcu uzyskanego sygnału (rys. 18a) i brak przesłuchu na rys. 18b, podczas przeprowadzanego wbudowanego w system „Testu”, potwierdza bardzo dobrą zdolność układu wieloczęstotliwościowego do rozdzielania składowych impedancji.

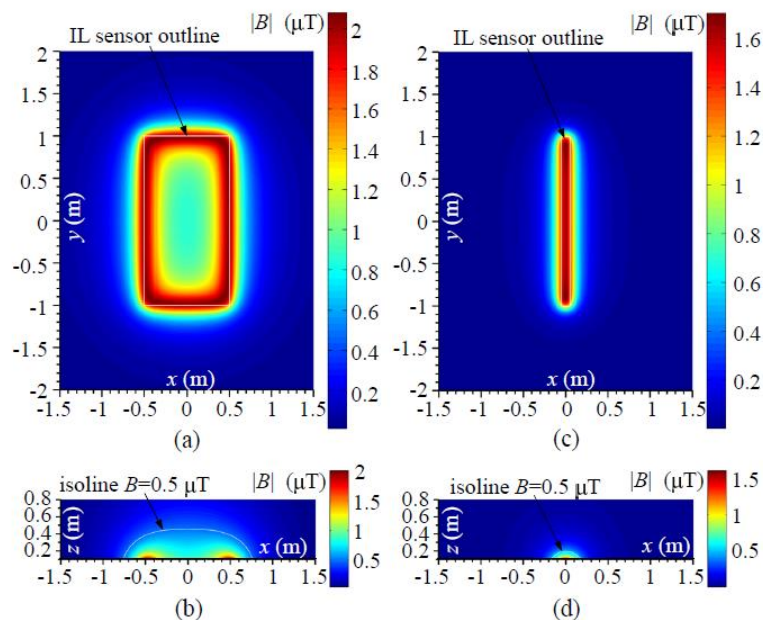
Dokładny pomiar odległości między osiami wymaga dokładnego pomiaru prędkości pojazdu. W układzie z jednym czujnikiem indukcyjnym pętlowym dokładność pomiaru prędkości jest silnie ograniczona. Dlatego do dokładnego pomiaru prędkości stosowane są dwa takie same czujniki umieszczone na pasie drogowym jeden za drugim w określonej odległości i pozwalające na pomiar przesunięcia pomiędzy profilami w czasie np. przez zastosowanie korelacji wzajemnej. Z drugiej zaś strony czujniki wąskie, sprawdzające się przy detekcji osi, nie sprawdzają się tak dobrze, jak czujniki indukcyjne pętlowe szerokie w zadaniu do skutecznej detekcji pojazdów z wysokim zawieszeniem i z przyczepami.

Toteż w pracy [H3] przedstawiona została koncepcja układu czterech czujników indukcyjnych pętlowych – dwóch szerokich i dwóch wąskich umieszczonych naprzemiennie (rys. 19). Przerwa pomiędzy czujnikami IL wynosi 20 cm, a więc są one umieszczone stosunkowo blisko siebie, przez co są ze sobą sprzężone magnetycznie. System pomiarowy współpracujący z przedstawionym układem 4 czujników musi odznaczać się małą wrażliwością na sygnały indukowane poprzez sprzężenia.



Rys. 19. Koncepcja układu dwóch szerokich i dwóch wąskich czujników indukcyjnych pętlowych umieszczonych naprzemiennie, źródło [H3].

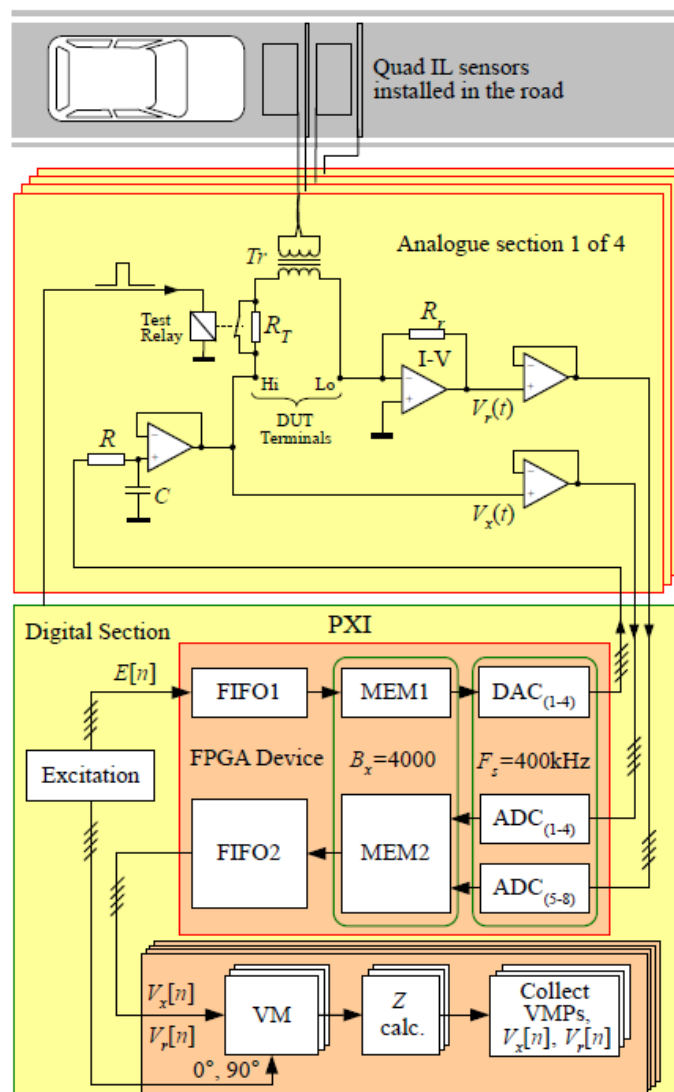
Czujniki indukcyjne, ale też i pojemnościowe, wytwarzają w swoim sąsiedztwie rozproszone pole elektromagnetyczne. W momencie, gdy oddziałujący obiekt wjedzie w to pole, impedancja czujnika ulegnie zmianie i dzięki temu obiekt można wykryć bez kontaktu fizycznego. W pracy zamieszczono wyniki badań symulacyjnych rozkładów pola magnetycznego czujników indukcyjnych pętlowych wąskiego i szerokiego (rys. 20). Rozkłady indukcji obrazują i tłumaczą różne zastosowania: 1) wspomniana zdolność do detekcji osi czujnika wąskiego – niewielki zasięg pola, 2) zdolność detekcji podwozia pojazdu z wysokim zawieszeniem i przyczepy przez czujnik szeroki.



Rys. 20. Rozkład indukcji magnetycznej: (a) w płaszczyźnie poziomej 10 cm nad szerokim czujnikiem indukcyjnym pętlowym, (b) w płaszczyźnie pionowej nad tym czujnikiem, (c) w płaszczyźnie pionowej 10 cm nad wąskim czujnikiem indukcyjnym pętlowym, (d) w płaszczyźnie pionowej.

Podjętym celem było 1) zbudowanie stanowiska badawczego z układem 4 czujników indukcyjnych pętlowych wg rys. 19 na uczęszczanej przez pojazdy drodze; 2) zbudowanie

wieloczęstotliwościowego, 4-kanalowego systemu pomiarowego do rejestracji impedancyjnych profili magnetycznych pojazdów. Schemat systemu przedstawia rys. 21.



Rys. 21. Schemat wieloczęstotliwościowego systemu pomiaru impedancji, źródło [H3].

Stanowisko badawcze z układem 4 czujników indukcyjnych pętlowych zostało zbudowane na drodze wewnętrznej AGH, na której codziennie rejestrowano około 400 przejazdów. Habilitant kierował tymi pracami.

Wnioski zdobyte podczas prac nad układem omówionym w [23] dla jednego czujnika wykorzystano w tej pracy, jednak znacznie przebudowano algorytmy pomiarowe i oprogramowanie. Zastosowano tu również znacznie szerzej niż dotychczas cyfrowe przetwarzanie sygnałów w 4 kanałach czujnikowych, a część analogowa układu została odpowiednio rozbudowana (rys. 21).

Pojedynczy sygnał wzbudzenia generowany przez blok *Excitation* (rys. 21) ma postać:

$$E[n] = \sum_{k=1}^K A_k \sin(\omega_k n + \varphi_k) \quad (12)$$

gdzie $\omega_k = 2\pi F_k/F_s$ jest znormalizowaną pulsacją w radianach sygnału dyskretnego w czasie, F_s jest wartością częstotliwości próbkowania w Hz, A_k to amplituda, F_k to częstotliwość w Hz, φ_k to kąt fazowy w radianach, dolny indeks k odnosi się do k -tej składowej częstotliwości sygnału wzbudzenia, a n oznacza numer próbki. Sygnał $E[n]$ przetwarzany jest na postać napięciową za pomocą przetwornika DAC (rys. 21) i filtru RC w części analogowej. Wykaz częstotliwości zastosowanych w poszczególnych kanałach przetwarzania zestawiono w tab. 6:

Tab. 6. Lista częstotliwości wzbudzenia zastosowanych systemie 4-kanałowym, [H3].

Frequency Value in kHz in a Given Channel	f_1	f_2	f_3
#1: for the first standard IL1 sensor	8	12	16.2
#3: for the second standard IL3 sensor	9	13	17.2
#2: for the first slim IL2 sensor	6	10	14.2
#4: for the second slim IL4 sensor	7	11	15.2

where: f_1, f_2, f_3 —denote excitation frequencies

W przedstawionym systemie profile pojazdów (przykłady przedstawiają rys. 8-10 w [H3]) są uzyskiwane w wyniku pomiarów napięć zespolonych, dalej przetwarzanych na chwilowe wartości impedancji czujników IL. Napięcia zespolone, $v_k^x[n]$ i $v_k^r[n]$, są obliczane w części cyfrowej. Ponieważ wartość R_r jest znana, to w stanie statycznym, aby obliczyć n impedancji zespolonych $Z_k[n]$ czujnika IL stosuje się:

$$Z_k[n] = R_k[n] + jX_k[n] = R_r \frac{v_k^x[n]}{v_k^r[n]} \quad (13)$$

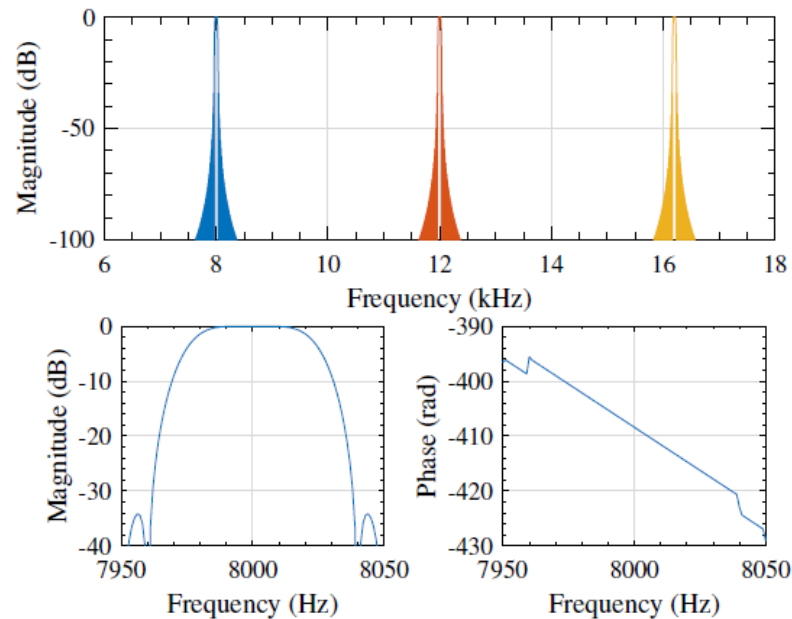
gdzie: n jest numerem próbki (impedancji jako liczby), k jest numerem kanału.

Należy zauważyć, że $V_x[n]$ i $V_r[n]$, rejestrowane przez przetworniki ADC, są dyskretnymi wersjami odpowiedników w czasie ciągłym $V_x(t)$ oraz $V_r(t)$ (rys. 21). Sygnały $V_x[n]$ i $V_r[n]$ są demodulowane jednocześnie dla wszystkich pulsacji wzbudzenia ω_k za pomocą pasmowo-przepustowych transformacji Hilberta z płaską charakterystyką w paśmie przenoszenia (FTBPHT) zaimplementowanych jako filtry FIR [19]. Filtr FTBPHT został wybrany ze względu na wyjątkową dokładność demodulacji amplitudy i fazy oraz wysokie tłumienie niepożądanych składowych widmowych, np. innych częstotliwości nośnych, co jest wymagane przez niezerowe sprzężenia czujników IL. Odpowiedź impulsową o wartości zespolonej $h_k[n]$ filtra FIR FTBPHT uzyskuje się poprzez modulację okna z płaską charakterystyką przenoszenia $w_M[n]$ do pożądanej pulsacji wzbudzenia ω_k :

$$h_k[n] = w_M[n] e^{j\omega_k n} \quad (14)$$

gdzie okno $w_M[n]$ z płaską charakterystyką przenoszenia jest oknem cosinusowym [20].

Rys. 22 przedstawia odpowiedź częstotliwościową zaprojektowanych filtrów o płaskiej charakterystyce w paśmie przepustowym.



Rys. 22. Odpowiedzi częstotliwościowe filtrów pasmowych o płaskiej charakterystyce przenoszenia zaprojektowane dla 3 częstotliwości: 8 kHz, 12 kHz i 16,2 kHz oraz charakterystyka fazowa, [H3].

W celu realizacji demodulacji, czyli obliczania zespolonych napięć $v_k^x[n]$ (i analogicznie $v_k^r[n]$) w systemie wieloczęstotliwościowym zaimplementowano spłot napięcia $V_x[n]$ (i analogicznie $V_r[n]$) z odpowiedzią impulsową filtra o wartościach zespolonych $h_k[n]$ (14):

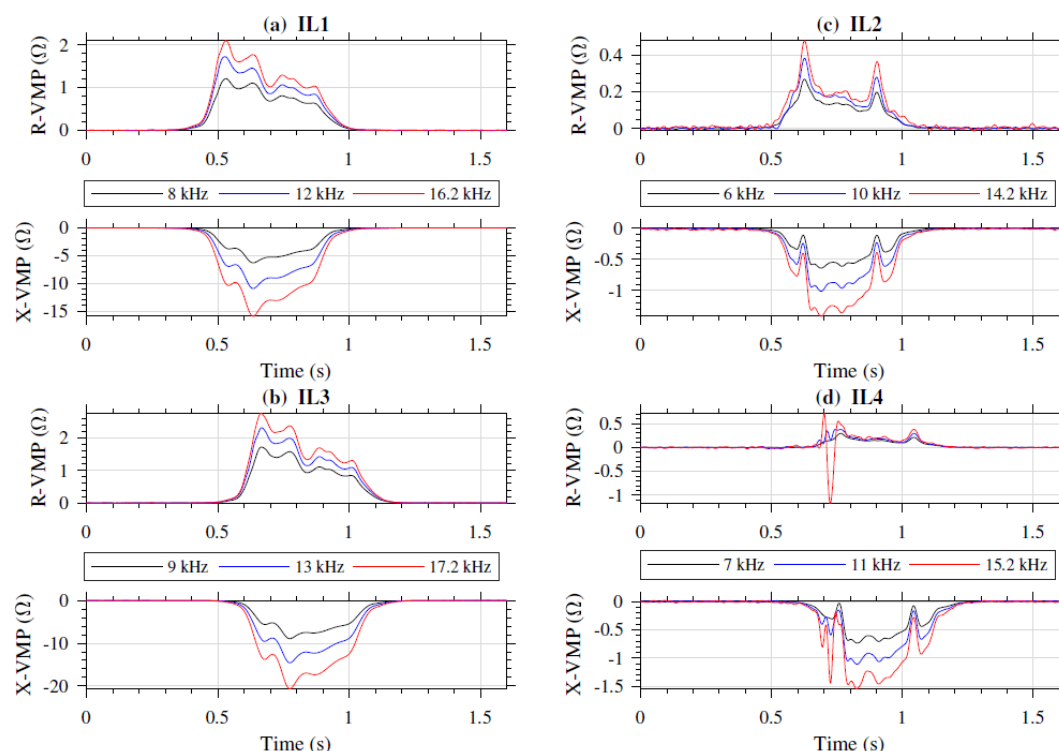
$$v_k^x[n] = \sum_{m=0}^{N-1} h_k[m] V_x[n-m] \quad (15)$$

Analogicznie jest w przypadku $v_k^r[n]$ - indeksy x zostają zastąpione przez r w (15).

Napięcia $V_x[n]$ i $V_r[n]$ są silnie nadpróbkowanymi (400 kHz) sygnałami. Wyjścia demodulatorów $v_k^x[n]$ i $v_k^r[n]$ mogą być obliczane co L próbek, a nie dla każdej pojedynczej próbki n . Podstawiając za $n = l \cdot L$, $l = 0, 1, 2, \dots$ w (15) filtr $h_k[n]$ jest przesuwany o L indeksów wzdłuż filtrowanego sygnału, **przez co L razy zmniejsza się nakład obliczeniowy**. W rozwiązaniu docelowym zastosowano $L = 400$, przez co przy częstotliwości próbkowania przetworników ADC wynoszącej 400 kHz uzyskuje się 1000 liczb zespolonych $v_k^r[n]$ i $v_k^x[n]$ na sekundę, a częstotliwość próbkowania profili pojazdów wynosi wtedy 1 kHz. Rozdzielczość czasowa profilu wynosząca 1 ms jest wystarczająca z punktu widzenia lokalizacji osi w bryle pojazdu.

Ponadto w pracy [H3] przedstawiono realizację i testy czterokanałowego wieloczęstotliwościowego systemu pomiaru impedancji opartego na FPGA, dobór jego parametrów, integrację całego systemu i wiele szczegółów związanych z opracowanym

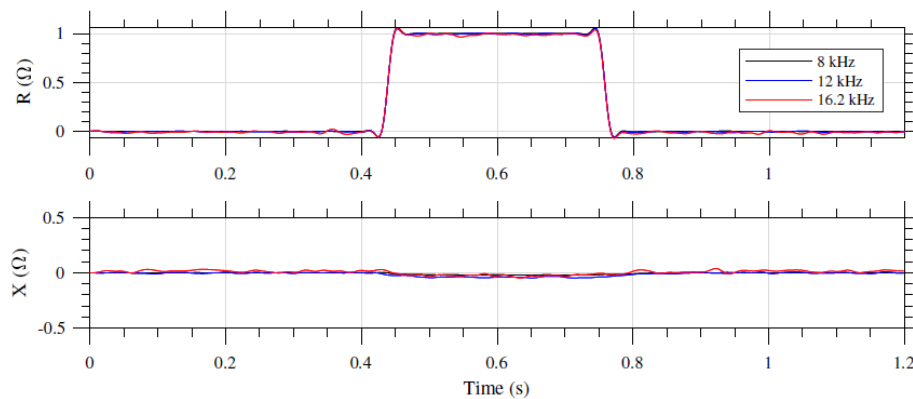
oprogramowaniem do automatycznej akwizycji profili pojazdów. Rys. 23 przedstawia przykładowe profile pojazdu dostawczego.



Rys. 23. Profile magnetyczne samochodu dostawczego, R-VMP i X-VMP oznaczają odpowiednio część rzeczywistą i urojoną zmian składowych impedancji; (a) VMP z czujnika szerokiego IL1, (b) VMP z czujnika szerokiego IL3, (c) VMP z czujnika wąskiego IL2, (d) VMP z czujnika wąskiego IL4 – profil oznaczony kolorem czerwonym został zakłócony.

W kontekście uzyskiwania profilu magnetycznego pojazdu niezawodność systemu wieloczęstotliwościowego jest większa w porównaniu do systemu pracującego na jednej częstotliwości, ponieważ jeśli profile na danej częstotliwości są zakłócone (patrz. rys. 23d, IL4 sygnał czerwony), algorytm może to wykryć i bazować na sygnałach niezakłóconych. Co istotne, opisana metoda nie traci też informacji o części rzeczywistej impedancji czujnika. W przyszłych pracach profile R i X mogą być wykorzystane do wizualizowania konstrukcji podwozia pojazdu. Dodatkowo, metoda ta nie wymaga czasochłonnego równoważenia i znacznie upraszcza konstrukcję części analogowej, co również zwiększa niezawodność systemu. Jednoczesny pomiar wieloczęstotliwościowy zmniejsza negatywne skutki zakłóceń EMI napędu pojazdu, co z kolei zmniejsza liczbę błędnie mierzonych parametrów pojazdu (np. liczba osi). Opisywany system jest również metodą wielosensorową, dlatego możliwa jest fuzja profili do zastosowania w celu poprawy jakości wyników pomiaru parametrów pojazdu (liczby osi, ułożenia osi w bryle pojazdu, odległości między osiami) i klasyfikacji (kategoryzacji pojazdów wymaganej w GPR).

Rys. 24 przedstawia wynik działania wbudowanego w system „Testu” dla walidacji pierwszego kanału pomiarowego tj. dla czujnika IL1. Podczas krótkiego załączenia przełącznika (rys. 21) w obwodzie czujnika zmienia się rezystancja, ponieważ przestaje być bocznikowany rezystor $R_T = 1 \Omega$. W wyniku testu widoczne są zmiany w części rzeczywistej impedancji (R), w której obserwowany jest chwilowy impuls prostokątny o wartości równej 1Ω . Jednocześnie w części urojonej (X) zmiana jest pomijalnie mała, co potwierdza poprawność działania systemu.



Rys. 24 . Odpowiedź systemu na impulsową zmianę rezystancji w obwodzie czujnika w ramach wbudowanego w system „Testu” realizowanego z udziałem rezystora $R_T = 1 \Omega$, źródło [H3].

System pracował przez 2 lata na zbudowanym stanowisku badawczym, był testowany i stopniowo udoskonalany przez habilitanta. W przeciągu tego okresu system zarejestrował około 200 tysięcy profili pojazdów.

Przedstawiony w pracy [H3] oryginalny wkład habilitanta w rozwój dyscypliny AEEiTK jest następujący: 1) opracowanie i budowa nowatorskiego wieloczęstotliwościowego (12 częstotliwości), wielokanałowego (4 kanały) systemu akwizycji impedancyjnych profili magnetycznych pojazdów, 2) znaczące usprawnienie systemu pomiarowego poprzez zintegrowanie w systemie nadpróbkowania i uśredniania z filtrem o płaskiej charakterystyce w paśmie przenoszenia; 3) uruchomienie, walidacja i długoterminowe testy systemu w warunkach rzeczywistego ruchu drogowego na zbudowanym 4-czujnikowym stanowisku badawczym.

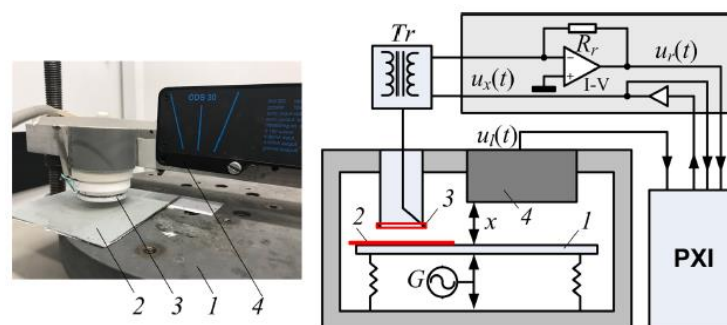
3. Badania w obszarze zastosowań dla wieloczęstotliwościowych impedancyjnych profili pojazdów – pomiar odległości między osiami, długości pojazdu, zwisów i estymacja masy ładunku zidentyfikowanego samochodu

[H4] Z. Marszałek, W. Gawędzki, K. Duda: “A reliable moving vehicle axle-to-axle distance measurement system based on multi-frequency impedance measurement of a slim inductive-loop sensor”, *Measurement*, ISSN 0263-2241, vol. 169 art. no. 108525, s. 1–9. 2021.

[H5] Z. Marszałek, K. Duda, P. Piwowar, M. Stencel, T. Żegleń, J. Izydoreczek: „Load estimation of moving passenger cars using inductive-loop technology”, *Sensors*, ISSN 1424-8220, vol. 23, is. 4, art. no. 2063, s. 1–19, 2023.

[H6] Z. Marszałek, K. Duda: „Validation of Multi-Frequency Inductive-Loop Measurement System for Parameters of Moving Vehicle Based on Laboratory Model”, *Sensors*, ISSN 1424-8220, vo. 24, is. 22, art. no. 7244, 2024, <https://doi.org/10.3390/s24227244>.

W zależności od sytuacji na drodze, ruch odbywa się z niskimi, bądź wysokimi prędkościami. Pojazd jadący z dużą prędkością ma profil o krótszym czasie trwania niż w przypadku identycznego pojazdu jadącego wolno. Co więcej pojazdy silnikowe generują silne wąskopasmowe zakłócenia elektromagnetyczne (EMI), które utrudniają pomiar impedancyjnych profili pojazdów. Badaniach dotyczące dynamiki filtrów w systemie pomiarowym rozpoczęte przez habilitanta w pracy [H3] zostały przez Niego rozszerzone i kontynuowane w [H4]. Do tego celu habilitant zbudował stanowisko badawcze (rys. 25) na bazie laboratoryjnego wzbudnika wibracyjnego, używanego do badań dynamiki czujników drgań. Do głowicy wzbudnika wibracyjnego 1 zamontowano drgający obiekt metalowy 2, czujnik indukcyjny 3 i laserowy referencyjny czujnik odległości 4.

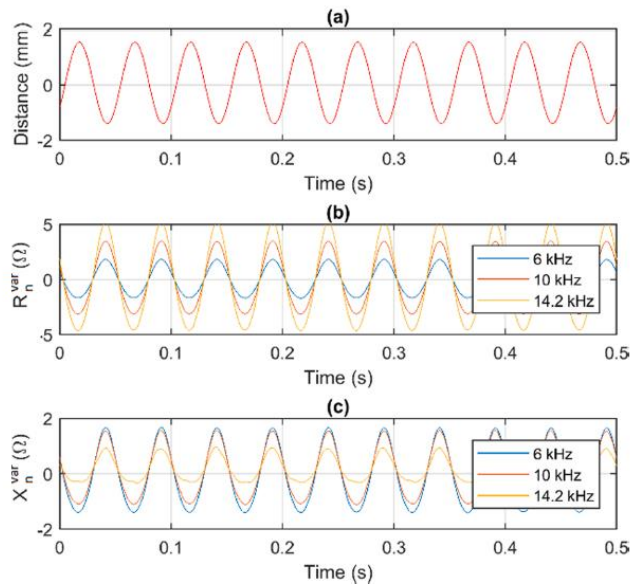


Rys. 25. Stanowisko do badania parametrów dynamicznych systemu monitorowania impedancji. Lewa strona - zdjęcie z laboratorium, prawa strona – schemat blokowy systemu gdzie: 1 - głowica wzbudnicy drgań, 2 - blacha ze stali ferromagnetycznej, 3 - czujnik indukcyjny pętlowy, 4 - laserowy czujnik odległości x , Tr – transformator do separacji galwanicznej.

Wieloczęstotliwościowy system pomiaru impedancji, omówiony szczegółowo w pracy [H3] został przekonfigurowany do dodatkowej rejestracji odległości x mierzonej czujnikiem laserowym 4 (rys. 25). Przeprowadzono szereg rejestracji uzyskiwanych sygnałów (zmiennej w czasie impedancji i odległości x) dla zadawanych różnych częstotliwości f_d drgań obiektu zestawionych w tab. 7. Uzyskiwano więc zsynchronizowane w czasie sygnały mierzonych zmian parametrów wieloczęstotliwościowej impedancji i odległości (przykład na rys. 26).

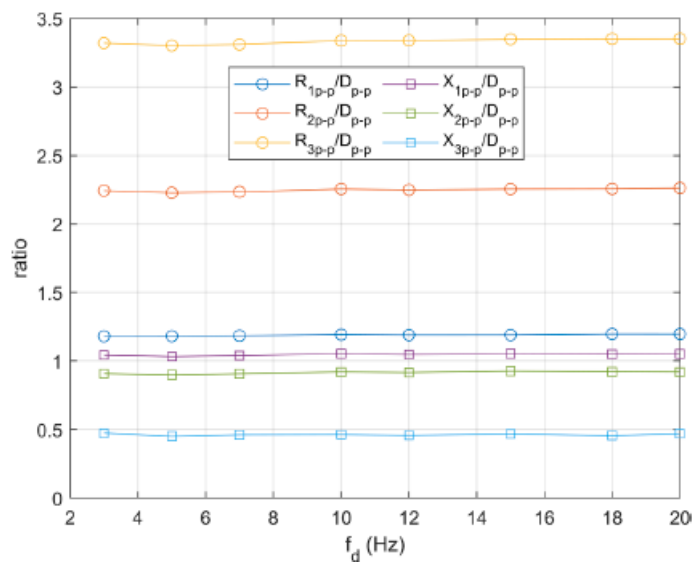
Tab. 7. Zadawane wartości przemieszczeń drgań międzyszczytowych (D_{p-p}) dla różnych częstotliwości drgań wzbudnicy f_d , uzyskane wyniki impedancji międzyszczytowych Z_{1p-p} , Z_{2p-p} , Z_{3p-p} oraz f_1 , f_2 i f_3 – wartości częstotliwości składowych prądu pomiarowego czujnika, źródło [H4].

f_d (Hz)	D_{p-p} (mm)	Z_{1p-p} ($f_1 = 6$ kHz)		Z_{2p-p} ($f_2 = 10$ kHz)		Z_{3p-p} ($f_3 = 14.2$ kHz)	
		R_{1p-p} (Ω)	X_{1p-p} (Ω)	R_{2p-p} (Ω)	X_{2p-p} (Ω)	R_{3p-p} (Ω)	X_{3p-p} (Ω)
3	2.95	3.486	3.078	6.620	2.681	9.796	1.396
5	2.94	3.476	3.037	6.549	2.644	9.712	1.327
7	2.92	3.461	3.035	6.524	2.650	9.669	1.348
10	2.94	3.508	3.098	6.633	2.704	9.813	1.361
12	2.91	3.463	3.046	6.546	2.665	9.717	1.333
15	2.93	3.488	3.083	6.609	2.714	9.814	1.369
18	2.94	3.521	3.087	6.635	2.711	9.855	1.341
20	2.94	3.520	3.093	6.653	2.704	9.857	1.378
mean	2.934	3.49	3.06	6.596	2.684	9.779	1.357
STD	0.013	0.024	0.026	0.049	0.028	0.071	0.024
RSE(%)	0.444	0.682	0.846	0.742	1.05	0.723	1.747



Rys. 26. Przykładowe wyniki badań dynamicznych uzyskane podczas drgań obiektu metalowego przy $f_d = 20$ Hz: (a) odległość czujnika od obiektu, (b) zmienna rzeczywista część impedancji (R_n^{var}) i (c) zmienna urojona część impedancji (X_n^{var}) wyznaczone dla składowych prądu pomiarowego przy 6 kHz, 10 kHz i 14,2 kHz, [H4].

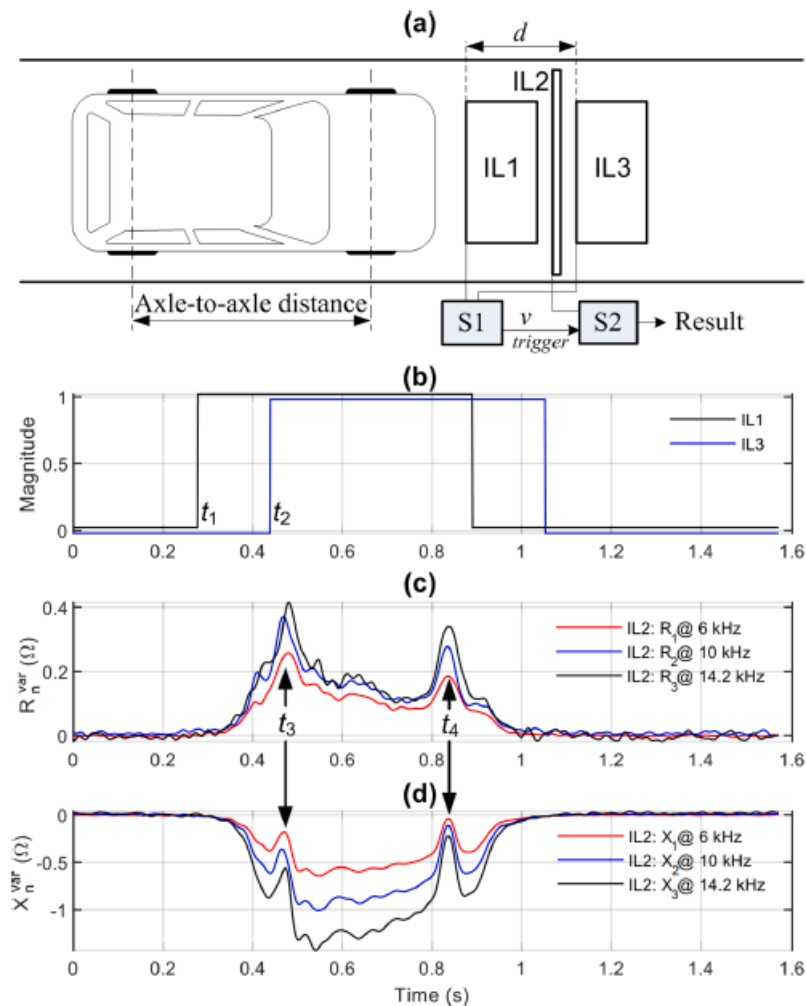
Badania dotyczyły optymalnego doboru częstotliwości odcięcia filtrów wieloczęstotliwościowego systemu pomiaru impedancji do współpracy z wąskim czujnikiem IL dedykowanym do detekcji osi pojazdów. Filtr o zbyt niskiej częstotliwości odcięcia tłumi impulsy pochodzące od kół pojazdu. Filtr o zbyt wysokiej częstotliwości odcięcia przenosi zakłócenia elektromagnetyczne i szумы, co jest krytyczne również z punktu widzenia poprawnego działania algorytmu detekcji osi. Obecność koła (zbudowanego z felgi i stalowego opasania opony) powoduje impuls w impedancyjnych profilach pojazdu. Zakładając, że samochód porusza się z ograniczeniem prędkości do 50 km/h (14 m/s), a rozkład pola wąskiego czujnika IL ma około 0,7 m szerokości, koło oddziałuje z polem czujnika przez około 50 ms ($0,7/14$) - dlatego też można wnioskować, że czas trwania tego impulsu nie jest krótszy niż 50 ms. W badaniach laboratoryjnych w polu czujnika indukcyjnego umieszczono wibrującą metalową płytkę zamiast koła samochodowego. Wibrujący metalowy obiekt emulował okresowe impulsy, takie jak obserwowane w impedancyjnych profilach, gdy pojazd przejeżdża przez wąski czujnik IL. Obiekt metalowy wzbudzano do drgań z częstotliwościami f_d (tab. 7) przy założeniu prędkości pojazdu nieprzekraczającej 50 km/h. Badano filtry o płaskiej charakterystyce w paśmie przenoszenia. Analizy pokazały, że dla pojazdów nie przekraczających typowego ograniczenia prędkości w ruchu miejskim możemy zastosować filtr, który bez tłumienia przenosi częstotliwości do 20 Hz (rys. 27).



Rys. 27. Graficzna reprezentacja wyników z tab. 7 jako stosunek R_{p-p}/D_{p-p} i X_{p-p}/D_{p-p} [H4].

Przy prędkości pojazdu większej niż 50 km/h częstotliwość pasma przepustowego musi być zwiększona. Częstotliwość odcięcia f_t w Hz, dla określonej prędkości v w km/h, można oszacować na podstawie uproszczonego równania $f_t = 0,4 v$.

Na rys. 28 przedstawiono system do pomiaru odległości między osiami pojazdu w ruchu drogowym oparty na wieloczęstotliwościowym pomiarze impedancji jednego wąskiego czujnika indukcyjnego pętlowego i dwóch szerokich. Zastosowany system mierzy impedancję wąskiego czujnika indukcyjnego pętlowego przy trzech częstotliwościach jednocześnie (6 kHz, 10 kHz i 14,2 kHz), a ponadto poprzez zastosowanie cyfrowych filtrów pasmowo-zaporowych (*ang. notch*) dla częstotliwości nośnych system umożliwia uzyskiwanie przebiegu sygnału zakłóceń EMI.



Rys. 28. Terenowe stanowisko pomiarowe i przykładowe wyniki: (a) schemat stanowiska, gdzie: IL1 i IL3 to szerokie czujniki indukcyjne pętlowe (2 m na 1 m), IL2 to wąski czujnik indukcyjny pętlowy (3,2 m na 0,1 m), S1 to podsystem pomiaru prędkości, S2 to 3-częstotliwościowy system pomiaru impedancji; (b) sygnały cyfrowe obecności pojazdu, (c) profile rezystancyjne; (d) profile reaktancyjne. Źródło [H4].

Prędkość pojazdu v mierzona jest w podsystemie S1 na podstawie znanej odległości d między czujnikami IL1 i IL3 i przesunięcia w czasie między sygnałami obecności pojazdu na czujnikach IL1 i IL3 w oparciu o zależność:

$$v = \frac{d}{t_2 - t_1} \quad (17)$$

gdzie: t_1 – to czas pojawienia się pojazdu w polu czujnika IL1, t_2 – to czas pojawienia się pojazdu w pole czujnika IL3. W przykładzie pokazanym na rys. 28 prędkość pojazdu wynosiła 34 km/h. Zmierzona wartość prędkości v jest następnie przesyłana do systemu S2. Logiczna suma cyfrowych sygnałów obecności pojazdu jest również wykorzystywana do wyzwalania akwizycji danych na żądanie w podsystemie S2. W pracy tej zaproponowano ulepszony w stosunku do pracy [H1] i [H2] algorytm detekcji osi, a zmiana dotyczy wyznaczania współczynników g_n :

$$g_n = \frac{|X_n^{var}[m]|}{R_n^{var}[m]} \quad (18)$$

gdzie: m jest numerem próbki, dla której wartość sygnału X_n^{var} osiąga minimum.

Ponieważ pojazdy z niskim zawieszeniem generują sygnały ze słabo widocznymi impulsami od kół, dla takich sygnałów zaproponowano następującą procedurę wzmacniającą impulsy od osi:

$$K_n = g_n R_n^{var} + X_n^{var} \quad (19)$$

Warto więc zauważyć, że współczynnik g_n wyznacza się dla trzech profili R_n^{var} , X_n^{var} i dla każdej częstotliwości oddzielnie oraz w taki sposób, aby dla minimalnej wartości $X_n^{var}[m]$, sygnał K_n osiągał zero. Ostatecznie

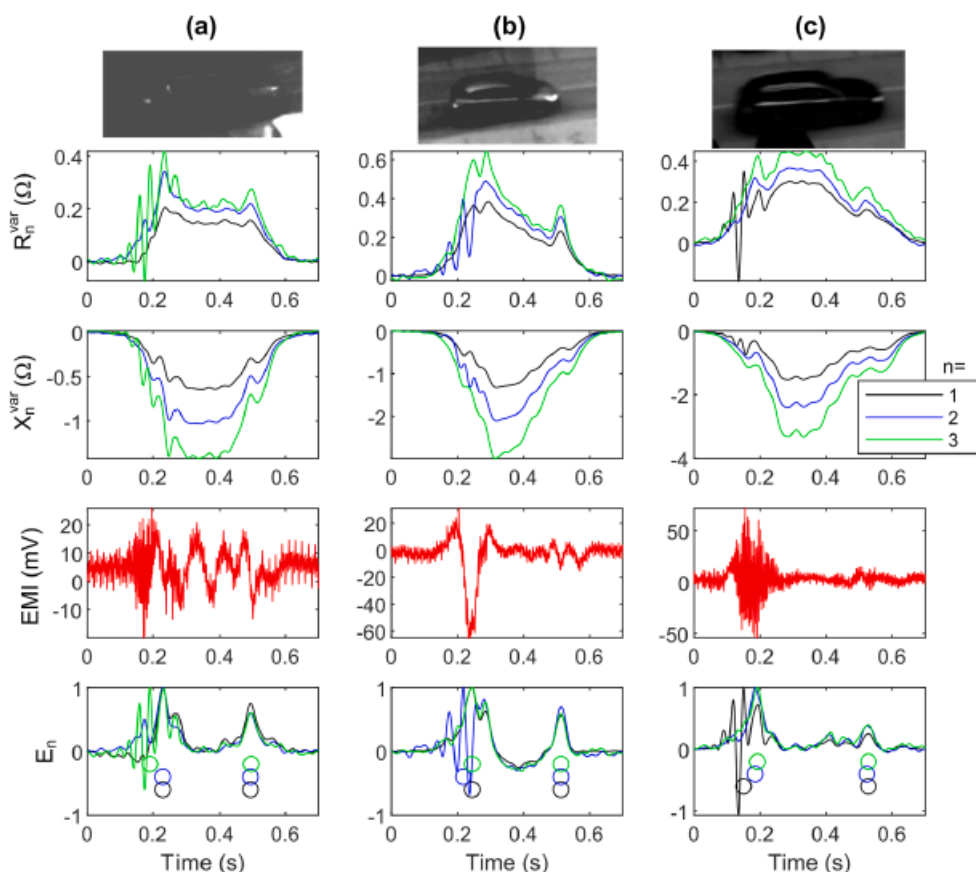
$$E_n = \frac{K_n}{\max(K_n)} \quad (20)$$

W sygnale E_n wyszukiwane są lokalne maksima przekraczające określony poziom i brany jest czas ich wystąpień (t_3 i t_4 z rys. 28), po czym odległość między osiami wyznaczana jest z zależności:

$$D_{a2a} = v(t_4 - t_3) \quad (21)$$

gdzie: v to uzyskany wynik prędkości pojazdu z (17).

Na rys. 29 zaprezentowano trzy różne przykłady zakłóceń widocznych w profilach. Rejestracje te wykonano w rzeczywistym ruchu drogowym na stanowisku badawczym. Wyniki obrazują trzy przypadki zakłócania pomiaru profili na różnych częstotliwościach i wpływ na wynik pomiaru odległości między osiami tych pojazdów.



Rys. 29. Przykłady wieloczęstotliwościowych impedancyjnych profili magnetycznych (R_n^{var} i X_n^{var} , $n = 1, 2, 3$) trzech pojazdów, przy czym na: (a) R_3^{var} i X_3^{var} są zakłócone, (b) R_2^{var} i X_2^{var} są zakłócone, (c) R_1^{var} i X_1^{var} są zakłócone. Źródło [H4].

W tab. 8 zestawiono uzyskane wyniki pomiaru odległości między osiami trzech testowych pojazdów. Zestawiono wyniki dla profili zakłóconych i niezakłóconych.

Tab. 8. Wyniki pomiarów odległości oś-oś (21) pojazdów z rys. 29. Źródło [H4]

		Measurement frequency (kHz)		
		6	10	14.2
		Axle-to-axle distance (m)		
Vehicle (a)	36.1	2.64	2.64	3.05
Vehicle (b)	34.3	2.57	2.82	2.57
Vehicle (c)	28.7	3.01	2.69	2.68

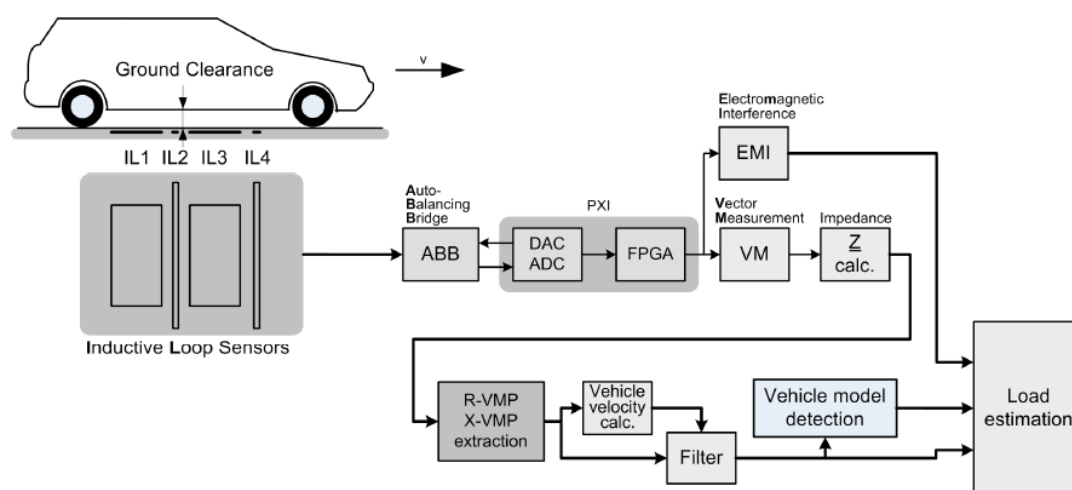
Błąd pomiaru odległości między osiami dla profili zakłóconych może sięgać 40 cm. Wyniki badań habilitanta pokazały, że zaproponowana metoda bazująca na wieloczęstotliwościowych profilach, uzyskiwanych jednocześnie z jednego czujnika na trzech częstotliwościach, pozwala na wykrycie zakłóceń w profilu, odrzucenie wartości odstającej i uśrednianie z pozostałych niezakłóconych wyników pomiarów odległości

między osiami. Zaproponowana metodologia prowadzi do poprawy dokładności pomiaru odległości między osiami. Błąd pomiaru odległości między osiami w badanych przypadkach nie był wyższy niż 2 cm. W artykule tym potwierdzono, że użycie systemu do jednoczesnego, wieloczęstotliwościowego pomiaru impedancji wąskiego czujnika indukcyjnego pętlowego wraz z inteligentną aplikacją do przetwarzania wieloczęstotliwościowych magnetycznych profili prowadzi do poprawy dokładności pomiaru odległości między osiami poruszającego się pojazdu. Jednoczesna praca na kilku częstotliwościach zwiększa wiarygodność informacji i pozwala na pomiar odległości między osiami z niższym błędem mimo wystąpienia zakłóceń w niektórych sygnałach. Szerokość pasma pracy tego systemu została ustalona w zakresie 0-20 Hz, co odpowiada przyjętej prędkości pojazdów do 50 km/h. Wyniki uzyskane z badań laboratoryjnych potwierdziły, że informacja zawarta w sygnałach impedancyjnych jest uzyskiwana prawidłowo w zadanym paśmie. Pomiary terenowe potwierdziły możliwość zastosowania systemu symultanicznego pomiaru impedancji do przemieszczających się pojazdów i pomiaru odległości między osiami pojazdu ze zwiększoną odpornością na zakłócenia elektromagnetyczne. Ważnym osiągnięciem w tej pracy jest praktyczna formuła łącząca wymagane pasmo przenoszenia częstotliwości systemu pomiaru impedancji z prędkością pojazdu, określaną dla częstotliwości granicznej filtrów $f_k = 0,4 v$ [Hz], gdzie v to prędkość w km/h. Z punktu widzenia konstrukcji systemu pomiarowego formuła ta pozwala, po pomiarze prędkości pojazdu, na odpowiedni dobór filtrów i znaczącą poprawę jakości profili pojazdów uzyskiwanych z czujników wąskich.

Oryginalnym osiągnięciem habilitanta stanowiącym istotny wkład w rozwój dyscypliny AEEiTK jest uzyskanie większej liczby redundantnych impedancyjnych profili z wąskiego czujnika indukcyjnego pętlowego (wcześniej uzyskiwano 1 profil, a proponowane rozwiązanie uzyskuje 6) oraz jednoczesna ekstrakcja sygnału o poziomie zakłóceń EMI. Zwiększenie liczby profili o odpowiedniej dynamice potwierdzonej badaniami laboratoryjnymi owocuje poprawą wyników (błąd 40 cm może być zredukowany do 2 cm) na dalszym etapie przetwarzania realizowanym w aplikacji działającej na podstawie informacji zawartych w profilach, a w pracy [H4] ma istotny wpływ na uzyskanie dokładniejszego wyniku pomiaru odległości między osiami.

Szacowanie obciążenia poruszających się samochodów jest ważne, ponieważ pojazdy przeciążone, ze względu na brak sterowności podczas jazdy, stanowią duże zagrożenie dla

bezpieczeństwa pasażerów i ruchu drogowego⁶. Na rys. 30 przedstawiono schemat blokowy nowatorskiego systemu estymacji masy ładunku zidentyfikowanego samochodu, działającego na bazie prześwitu. W systemie zastosowano technologię czujników indukcyjnych pętlowych z wieloczęstotliwościową metodą pomiaru impedancyjnych profili pojazdów i metodą do uzyskiwania sygnałów zakłóceń elektromagnetycznych (EMI).



Rys. 30. Schemat blokowy systemu szacowania obciążenia (masy ładunku) zidentyfikowanego pojazdu, przy czym IL1 – pierwszy szeroki czujnik indukcyjny pętlowy, IL2 – pierwszy wąski czujnik, IL3 – drugi szeroki czujnik, IL4 – drugi wąski czujnik, źródło [H5].

Wykaz zastosowanych w systemie częstotliwości prądu pomiarowego zestawiono w tab. 9, a przykładowe profile oraz sygnały EMI dla samochodu Hyundai ix35 przedstawia rys. 31.

Tab. 9. Wykaz częstotliwości składowych prądu pomiarowego zastosowanych w systemie, [H5].

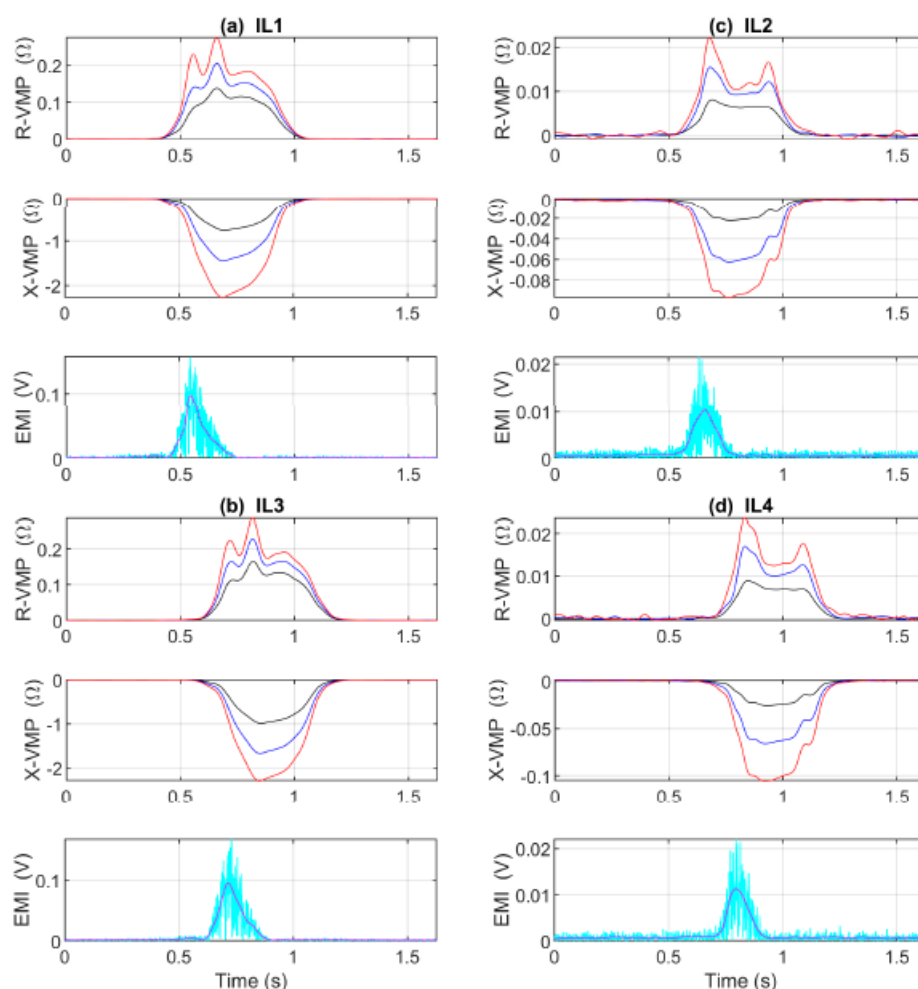
Frequency Value in kHz in a Given Channel:	f1	f2	f3
#1: for the first standard IL1 sensor	10	18	27
#3: for the second standard IL3 sensor	13	21	28
#2: for the first slim IL2 sensor	6	15	22
#4: for the second slim IL4 sensor	7	16	24

Where: f1, f2, f3—denote excitation frequencies.

Publikacja [H5] powstała w wyniku prowadzenia badań w ramach stażu naukowego habilitanta na Politechnice Śląskiej. Dedykowane systemy pomiaru masy pojazdów w ruchu zazwyczaj korzystają z drogich rozwiązań wykorzystujących czujniki nacisku, które również

⁶ Główny Inspektorat Transportu Drogowego, <https://www.gov.pl/web/gitd/przeciazzone-pojazdy-i-kierowcy-bez-uprawnien>, 2022.

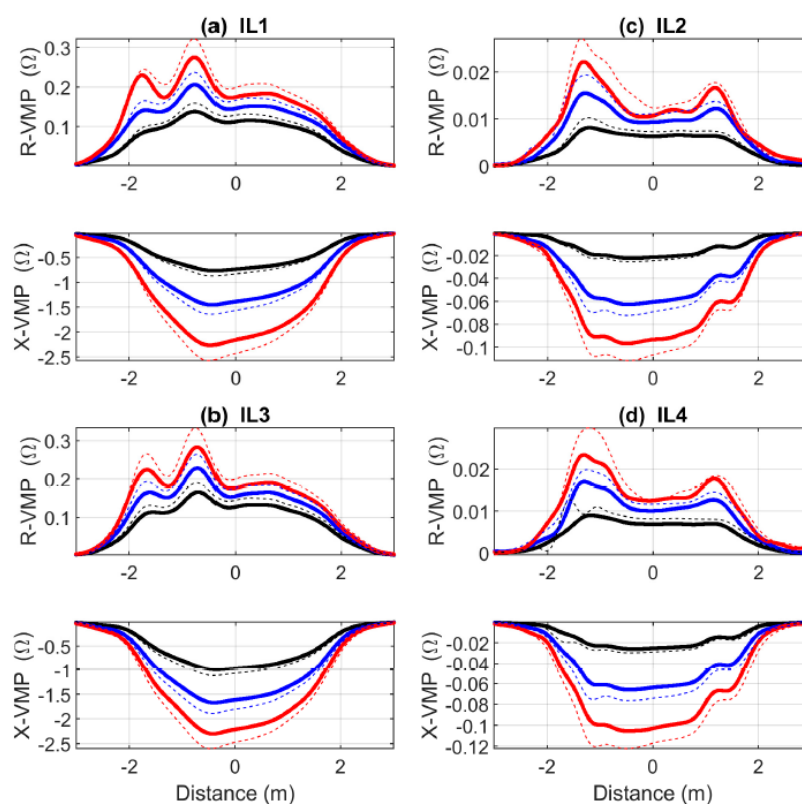
wymagają ingerencji w drogę podczas instalacji, a do zachowania dokładności wymagają cyklicznej kalibracji. Zaproponowana metoda szacowania masy ładunku samochodu umożliwia wykrycie przeładowania zidentyfikowanego pojazdu, a tym samym może znaleźć zastosowanie w poprawie bezpieczeństwa ruchu drogowego.



Rys. 31. Przykładowe impedancyjne profile magnetyczne i sygnały EMI samochodu Hyundai ix35, gdzie R-VMP oraz X-VMP oznaczają rzeczywiste i urojone składowe zmian impedancji dla a) czujnika IL1; b) czujnika IL3; c) czujnika IL2; oraz d) czujnika IL4; czerwone sygnały są uzyskiwane przy składowej o wysokiej częstotliwości; niebieskie sygnały otrzymano przy pośredniej wartości składowej częstotliwości; czarne sygnały otrzymano na najniższej składowej częstotliwości, zgodnie z częstotliwościami roboczymi wymienionymi w tab. 9. Błękitny sygnał EMI to napięcie bezwzględne, sygnał magenta obrazuje średnią uzyskaną po filtracji dolnoprzepustowej. Źródło [H5].

Innym zastosowaniem systemu może być dodatkowy nadzór nad zmianą ładunku wjeżdżającego samochodu, a później opuszczającego rozważaną strefę lub obiekt przemysłowy, gdzie powszechnie przy szlabanach wjazdowych stosuje się identyfikację na podstawie tablic rejestracyjnych. Natomiast w pracy [H5], podczas badań, do automatycznej identyfikacji danego pojazdu testowego (tab. 10) zastosowano impedancyjne profile

przedstawiane w dziedzinie drogi - przykład przedstawia rys. 32. Identyfikacja odbywała się automatycznie na podstawie porównania z wzorcami profili w dziedzinie drogi zapisanymi w bazie referencyjnej, a przyjęte kryterium to minimum sumy kwadratów błędów.



Rys. 32. Przykładowe profile magnetyczne pojazdu (VMP) samochodu Hyundai ix35 przedstawione jako funkcja przebytej odległości; grubą linią oznaczono VMP samochodu bez ładunku, cienką przerywaną linią oznaczono VMP tego pojazdu jadącego z ładunkiem o masie 306 kg; czerwone VMP są uzyskiwane przy składowej wysokiej częstotliwości; niebieskie VMP uzyskuje się przy wartości pośredniej; czarne VMP przy najniższej składowej częstotliwości, zgodnie z tab. 9.

Tab. 10. Dane techniczne samochodów użytych w eksperymencie i waga kierowcy.

Car Model	Car Weight (kg)	Permissible Load (kg)	Driver Weight (kg)	M (%)
Mercedes GLA200	1320	600	85	65.1
Hyundai i30	1193	527	68	71.2
Hyundai ix35	1366	464	82	83.6

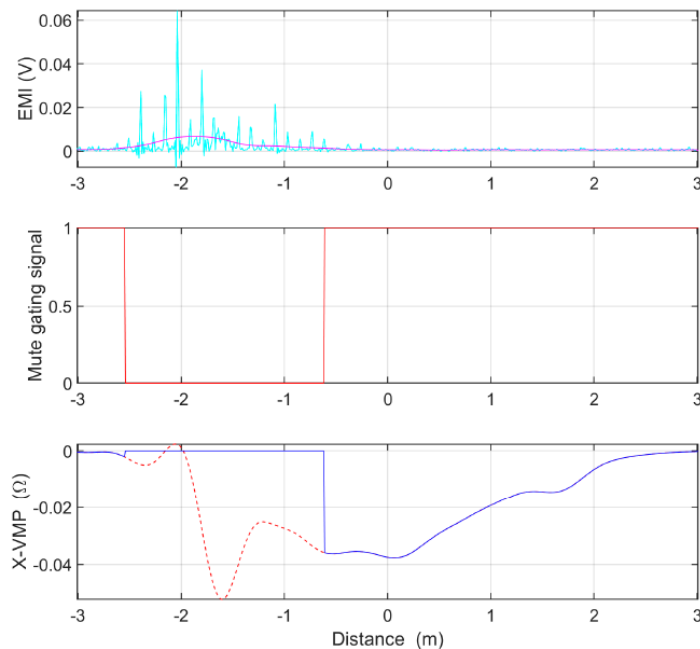
Where $M = (\text{Driver weight} + 306) / (\text{Permissible load}) 100\%$.

Głównym celem eksperymentu była weryfikacja postawionej hipotezy, że istnieje relacja między obciążeniem identyfikowanych pojazdów a ich profilami, która może dalej służyć do oszacowania masy ładunku (obciążenia) na podstawie uzyskanego profilu. Eksperyment pomiarowy został przeprowadzony na terenie kampusu AGH, gdzie stanowisko testowe znajduje się na drodze wewnętrznej. Na prostym odcinku drogi, na jednym pasie ruchu, cztery czujniki indukcyjne pętlowe zainstalowane są w układzie pokazanym na rys. 19. Stanowisko

badawcze nie jest wyposażone w inne czujniki do dynamicznego ważenia pojazdów w ruchu. Do przeprowadzenia eksperymentu wykorzystano trzy samochody osobowe: Mercedes GLA200, Hyundai i30 oraz Hyundai ix35. W eksperymencie każdy pojazd przejeżdżał przez czujniki indukcyjne pętlowe przy prędkości od 30 km/h do 50 km/h. Kierowca starał się utrzymać stałą prędkość podczas przejazdów przez stanowisko testowe. Każdy pojazd wykonał sześć przejazdów, w tym trzy przejazdy w kierunku głównym i trzy w kierunku powrotnym. Impedancyjne profile pojazdów z wąskich czujników indukcyjnych pętlowych oraz sygnały EMI przetwarzane są zgodnie z (22), a uzyskiwana wartość zaproponowanego parametru jest proporcjonalna do obciążenia pojazdu.

$$\text{Load parameter} = \text{mean}(\text{abs}(\text{min}(\text{mute}(\text{X-VMP}, \text{EMI})))) \quad (22)$$

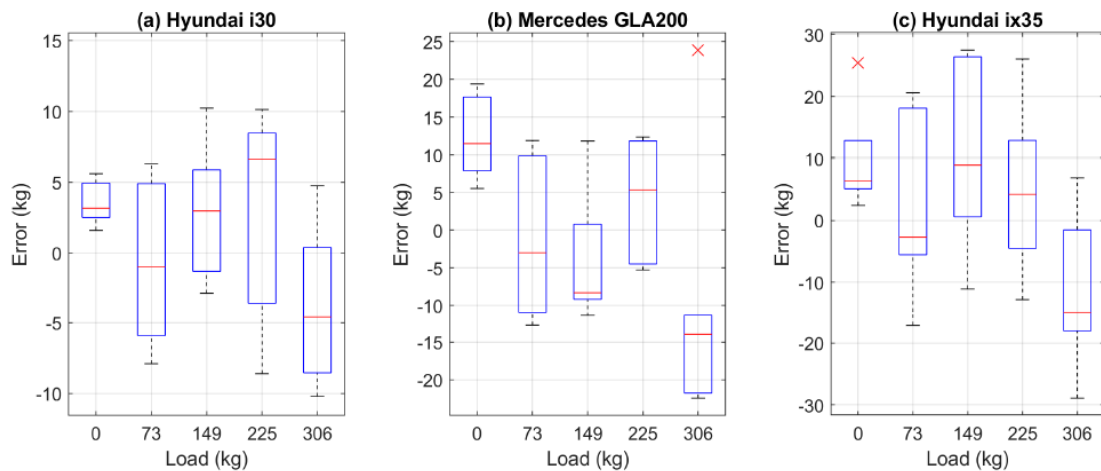
Rys. 33 wyjaśnia działanie zaproponowanej funkcji wyciszającej (mute) artefakty od zakłóceń EMI, które mogą pozostać, nawet po zastosowaniu zaawansowanej falkowej redukcji szumów (rys. A2, str. 11 w [H5]) i zastosowaniu filtra z płaską charakterystyką przenoszenia dostosowaną do zmierzonej prędkości pojazdu (rys. A3, str. 12 w [H5]).



Rys. 33. Przykładowe działanie funkcji wyciszenia. Oscylacje w X-VMP (czerwona linia przerywana) spowodowane zakłóceniami elektromagnetycznymi zostały skutecznie wyciszone. Źródło [H5].

Zweryfikowano przydatność zaproponowanego parametru (22) eksperymentalnie w testach terenowych na specjalnie przygotowanym stanowisku dodatkowo wyposażonym w kamerę

wykonującą fotografię w chwili wykrycia pojazdu (rys. A4, str. 13 w [H5]). W ramach badań wykonano łącznie 120 przejazdów różnie obciążanymi pojazdami testowymi. Kolejno opracowano charakterystyki masy obciążenia w zależności od zaproponowanego parametru obciążenia (rys. 5 w [H5] i tab. A1 str. 13). Wyznaczono liniowe współczynniki skalujące, wartości przedstawia tabela 3 w [H5], które zastosowano w systemie pomiarowym. W kolejnym kroku, określono błędy systemu, które przedstawiono na wykresach pudełkowych, rys. 34.

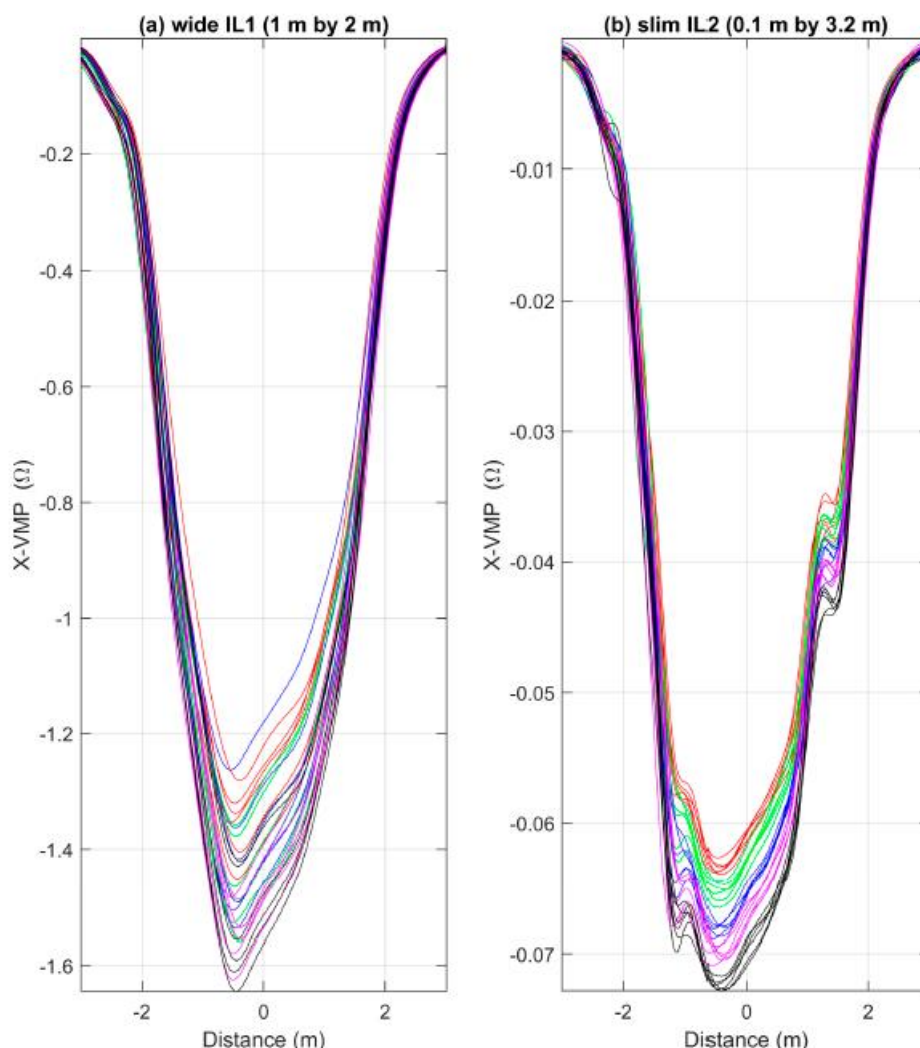


Rys. 34. Błąd pomiaru obciążenia samochodów testowych. Na każdym pudełku środkowy czerwony znak wskazuje medianę, a dolna i górna krawędź pudełka wskazują odpowiednio 25. i 75. percentyl, wąsy rozciągają się do najbardziej ekstremalnych punktów danych, które nie są uważane za wartości odstające, a wartości odstające są wykreślane indywidualnie przy użyciu symbolu "x" [28], [H5].

Wrażliwość reaktancyjnego profilu magnetycznego na zmianę obciążenia wynika z faktu, że większe obciążenie pojazdu zmniejsza wartość prześwitu i elementy metalowe podwozia gdy są bliżej czujnika indukcyjnego pętlowego oddziałują z jego polem intensywniej. Wykazano, że tylko wąskie czujniki indukcyjne pętlowe umożliwiają zbudowanie systemu szacowania masy ładunku, którego maksymalny błąd nie przekroczył 30 kg. Sformułowano więc wniosek, że błąd systemu na tym poziomie pozwala na określanie liczby dorosłych pasażerów zidentyfikowanego samochodu. W celu zweryfikowania przyjętych procedur i opracowanego oprogramowania do estymacji ładunku, wykonano dodatkowo uproszczoną kalibrację dwupunktową systemu dla innego samochodu. Do wyznaczenia współczynników skalujących wykorzystano jedynie wyniki z dwóch przejazdów: przejazd tylko z kierowcą i drugi przejazd z trzema pasażerami wstępnie zważonymi. Uzyskane błędy pomiaru obciążenia w pozostałych testach nie przekroczyły 20 kg. Szczegóły zawiera dodatek C, str. 15 i 16 w [H5].

Oryginalnym wkładem habilitanta w rozwój dyscypliny AEEiT_K są wyniki badań wskazujące, że do szacowania obciążenia można zastosować wieloczęstotliwościowe

profile magnetyczne pojazdu uzyskiwane z czujników wąskich. Istotne jest też to, że szerokie czujniki pętlowe, ze względu na zbyt dużą wrażliwość ścieżki przejazdu na profil magnetyczny, mają za duże rozrzuty w uzyskiwanych wartościach profili i nie nadają się do tego zastosowania. Brak zdolności szacowania obciążenia samochodu przez szerokie czujniki IL zobrazowano rys. 35a.

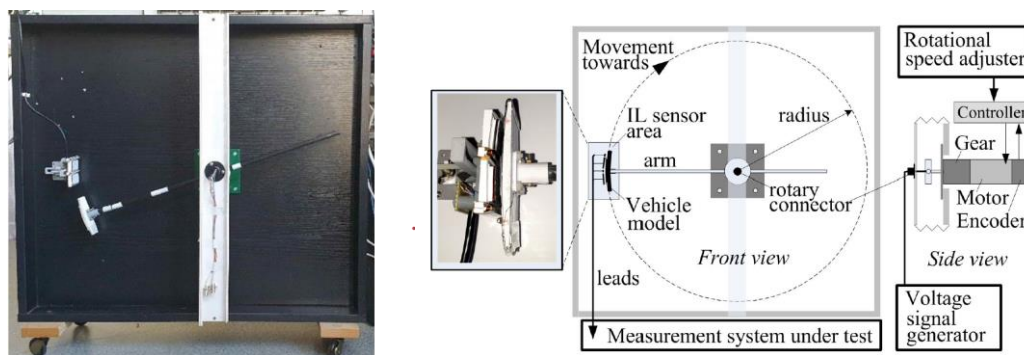


Rys. 35. Profile reaktancyjne (X-VMP) samochodu testowego Hyundai ix35 uzyskane przy środkowej częstotliwości prądu pomiarowego (patrz tab. 9, f2), sygnały czerwone dotyczą nieobciążonego samochodu testowego, zielone dotyczą samochodu z dodatkowym ładunkiem 73 kg, niebieskie z ładunkiem 149 kg, magenta z ładunkiem 225 kg i czerwone są uzyskane przy obciążeniu ładunkiem 306 kg, (a) dla szerokiego czujnika indukcyjnego pętlowego (1 m na 2 m); b) dla wąskiego czujnika indukcyjnego pętlowego (0,1 m na 3,2 m). Źródło [H5].

Przedstawiona nowa oryginalna koncepcja rozszerza więc obszar zastosowania wąskich czujników indukcyjnych pętlowych, dotychczas służących do detekcji i pomiaru odległości między osiami. Habilitant wykazał, że system pomiarowy działający z wykorzystaniem wieloczęstotliwościowej technologii czujników indukcyjnych pętlowych może znaleźć nowe zastosowanie przyczyniające się do poprawy

bezpieczeństwa w ruchu drogowym i nadzorem określonych stref. Warto nadmienić, że ta aplikacja jest pierwszą opisaną w literaturze.

W pracy [H6] skupiono się na szczegółowych badaniach laboratoryjnych systemu wieloczęstotliwościowego pomiaru impedancji. Opracowane stanowisko laboratoryjne (LTB), przedstawione na rys. 36, pozwala modelowi pojazdu wykonanego w skali na poruszanie się z ustaloną prędkością przez obszar działania pola czujników indukcyjnych pętlowych (IL), również zminiaturyzowanych. Stanowisko laboratoryjne pozwala na generowanie sygnałów pomiarowych odpowiadających sygnałom uzyskanym na rzeczywistym stanowisku drogowym (RTB), jednocześnie pozwala zadawać zakłócenia elektromagnetyczne (EMI) wytwarzane przez silnik pojazdu. Model pojazdu podąża trajektorią kołową o stałym promieniu. Układ napędowy ramienia obrotowego składa się z silnika, przekładni planetarnej, enkodera i programowalnego sterownika. Sterownik reguluje prędkość obrotową na podstawie danych otrzymanych z enkodera. Opracowane oprogramowanie dla sterownika silnika umożliwia obrót ramienia z określoną prędkością obrotową i przez ustaloną liczbę okrążeń. Na końcu ramienia zamontowany jest model pojazdu. Złącze obrotowe zamontowane w osi silnika dostarcza sygnał napięciowy z generatora do cewki pozwalającej generować zakłócenia elektromagnetyczne (EMI) analogicznie jak do tych, które generują rzeczywiste pojazdy w ruchu drogowym [C2]. Parametry projektowe stanowiska LTB zostały wymienione w tab. 11. Modele pojazdu i czujników IL są wykonane w skali 1:50 w stosunku do rzeczywistych wymiarów.

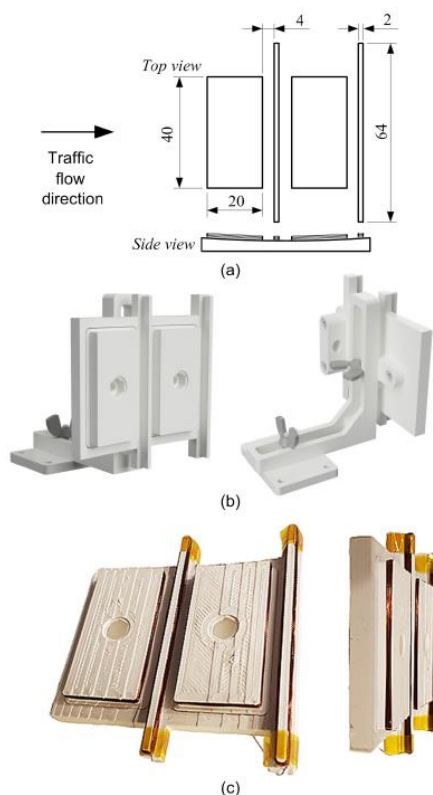


Rys. 36. Zdjęcie stanowiska laboratoryjnego (LTB, po lewej); schemat blokowy stanowiska laboratoryjnego wraz komponentami (po prawej), [H6].

Tab. 11. Wykaz komponentów stanowiska laboratoryjnego, [H6].

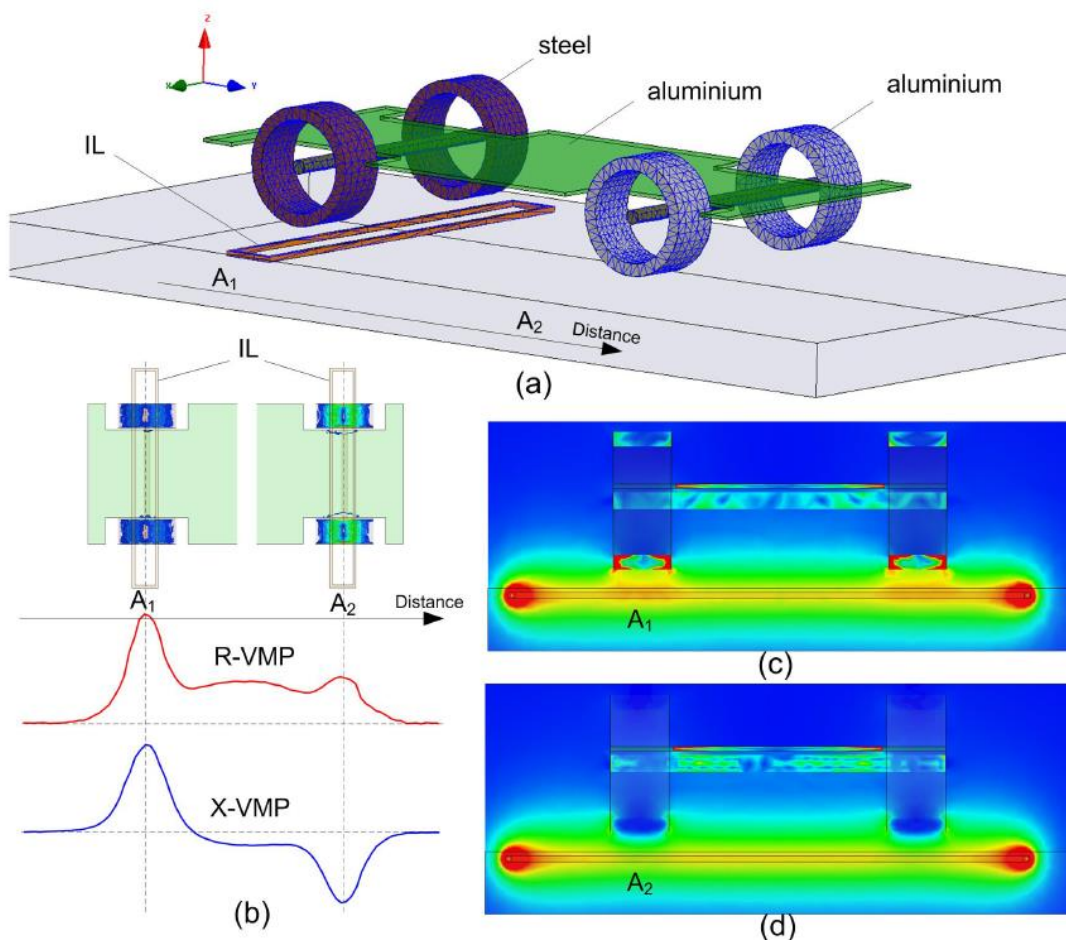
Parameter or Component	Value or Name
Scale	1:50
Radius	308 mm
Motor	Eazy-Motor
Encoder	10,000 ppr
Controller	Eazy-Servo
Planetary gear	Gear ratio 10:1
Rotary connector	SRC012

Obszar czujnika (IL sensor area) widoczny na rysunku 36 zawiera zestaw czterech czujników indukcyjnych pętlowych wykonanych w pomniejszonej skali, a przyjęte wymiary przedstawia rys. 37a. Ze względu na przyjęty ruch kołowy, płaski układ czujników został przeniesiony na segment powierzchni cylindra. Projekt korpusu, na którym zamontowano czujniki IL, wykonano w oprogramowaniu Autodesk Fusion360. Plastikowy korpus wykonano w technologii druku 3D. Zaprojektowano dedykowany regulowany uchwyt, umożliwiający korektę położenia czujnika podczas montażu. Projekt 3D i podstawa montażowa zostały pokazane na rys. 37b. Technologia druku 3D zapewniła precyzyjne wykonanie bryły zgodnie z założonymi wymiarami. Do nawijania użyto drutu emaliowanego o grubości 0,1 mm. Liczba zwojów dla każdego czujnika została dobrana w taki sposób, aby czułość była porównywalna z czułością rzeczywistego czujnika.



Rys. 37. Laboratoryjny model zestawu czujników indukcyjnych pętlowych: (a) widok z góry i z boku, wymiary w (mm); (b) projekt 3D rdzenia czujników i mocowania; (c) zdjęcia wykonanych czujników, [H6].

Model fizyczny pojazdu opracowano na podstawie analizy jego podstawowych parametrów geometrycznych, w tym długości pojazdu, rozstawu osi, przedniego zwisu i tylnego zwisu. Analizy skupiały się na przyczynach widocznych artefaktów w sygnałach magnetycznych profili pojazdów uzyskiwanych z czujników pętlowych. Obejmowała ona liczne eksperymenty fizyczne ale także symulacje zjawisk elektromagnetycznych przy użyciu metody elementów skończonych (MES) w środowisku ANSYS Maxwell 3D. Rys. 38a przedstawia opracowany przykładowy model numeryczny czujnika pętlowego i uproszczone podwozie pojazdu, zaprojektowane w środowisku ANSYS Maxwell 3D. Model ten wykorzystano do zbadania uzyskanych przebiegów magnetycznych profili R-VMP i X-VMP (rys. 38b), w zależności od tego, czy felga samochodu jest wykonana ze stali czy aluminium. Rozkłady pola indukcji magnetycznej B obliczono dla wielu położenia pojazdu względem czujnika, oraz pokazano w wybranych przekrojach (Distance, A_1 , A_2 , rys. 38b, c, d).



Rys. 38. (a) Model MES czujnika IL i pojazdu, (b) przykład uzyskanych sygnałów R-VMP i X-VMP, (c) przekrój pola dla położenia czujnika IL w przekroju A_1 , (d) rozkład pola dla położenia czujnika IL w przekroju A_2 , [H6].

Na podstawie uzyskanego rozkładu pola, średnia energia zmagazynowana w polu magnetycznym czujnika pętlowego jest określana następująco:

$$W_{AV} = \frac{1}{4} \int_V \vec{B} \cdot \vec{H}^* dV \quad (23)$$

Wówczas indukcyjność czujnika można obliczyć z:

$$L = \frac{4 W_{AV}}{I_{peak}^2} = \frac{\int_V \vec{B} \cdot \vec{H}^* dV}{I_{peak}^2} \quad (24)$$

gdzie: $\vec{B}$ - zespolony wektor indukcji magnetycznej w przestrzeni V ,

$\vec{H}^*$ - zespolony sprzężony wektor natężenia pola magnetycznego,

I_{peak} - amplituda prądu zasilającego.

Część rzeczywistą impedancji (rezystancję) można wyznaczyć z ogólnej zależności (25). Przy czym dla wiernego odwzorowania rzeczywistości należałoby wziąć sumaryczną moc P wydzieloną w czujniku, w obiekcie metalowym, w którym płyną prądy wirowe, jak również moc wypromieniowaną [24].

$$R = \frac{P}{I_{RMS}^2} \quad (25)$$

Z zależności (26) można wyznaczyć moc wydzieloną w objętości V przewodnika o konduktywności σ , w którym znany jest rozkład gęstości prądu J .

$$P = \frac{1}{2\sigma} \int_V \vec{J} \cdot \vec{J}^* dV \quad (26)$$

gdzie: $\vec{J}^*$ - zespolony sprzężony wektor gęstości prądu,

σ - konduktywność właściwa materiału w S/m.

W kolejnych krokach symulacji MES, położenie czujnika pętlowego jest zmieniane w stosunku do uproszczonego modelu pojazdu. Wyniki tych analiz ułatwiają opracowywanie różnych uproszczonych modeli podwozi pojazdów. Analizy podsumowano w następujący sposób:

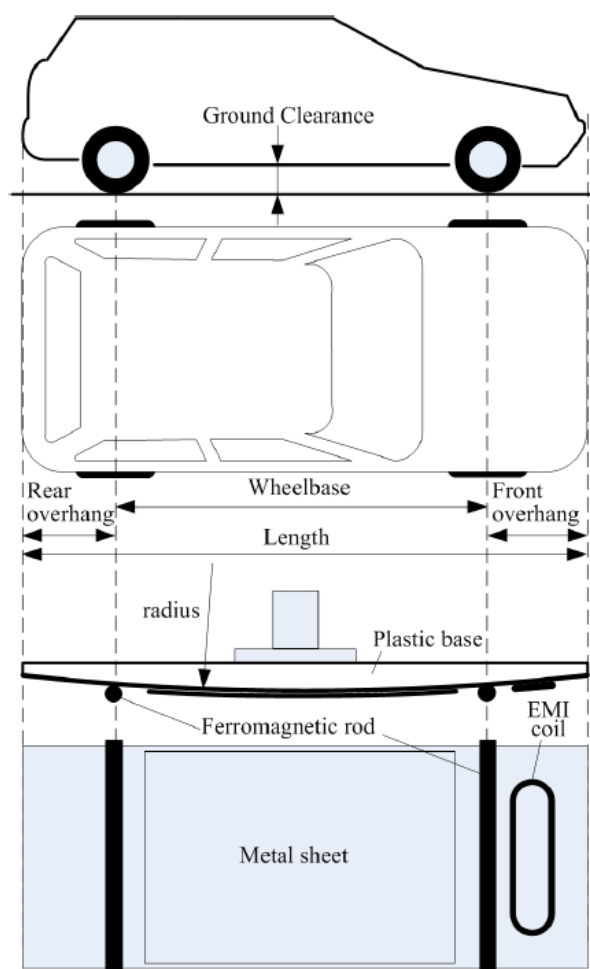
1. Płaski arkusz aluminium skutecznie symuluje „nadwozie pojazdu”. Jest to szczególnie widoczne w sygnale R-VMP pokazanym na rysunku 38b, gdzie poziom R-VMP znacznie wzrasta, gdy metalowe elementy podwozia pojazdu są umieszczone w polu indukcji $\vec{B}$ czujnika pętlowego. Zmiany w sygnale X-VMP są również obserwowane podczas interakcji między polem czujnika pętlowego a podwoziem pojazdu.
2. Elementy metalowe, takie jak pręty stalowe lub fragmenty rur (pierścienie) usytuowane w linii z osiami pojazdu i zamontowane na arkuszu aluminium, generują lokalne

ekstrema w sygnałach R-VMP i X-VMP, analogicznie do efektów od kół pojazdu w rzeczywistych warunkach.

3. Intensywność obserwowanych zjawisk zmienia się w zależności od rodzaju metalu użytego do konstrukcji pierścieni (felg), co ilustrują rozkłady wektora indukcji magnetycznej $\vec{B}$ i wektora gęstości prądu $\vec{J}$. W symulacji MES parametry geometryczne i materiałowe wybrano tak, aby wyraźnie pokazać dwa kluczowe zjawiska: prądy wirowe i efekt rdzenia ferromagnetycznego. Dokładniej, pierścień A_1 został zamodelowany jako wykonany ze stali ferromagnetycznej, podczas gdy pierścień A_2 został zbudowany z aluminium (rysunek 38a).
4. Interesujące artefakty w sygnałach R-VMP i X-VMP są oznaczone pionowymi liniami przerywanymi oznaczonymi A_1 i A_2 na rysunku 38b, które jednocześnie określają położenia czujnika pętlowego względem modelu pojazdu.
5. Obecność stalowej felgi i stalowego opasania opony powoduje wyraźne lokalne maksimum w obu sygnałach R-VMP i X-VMP. W przypadku A_1 obserwuje się wyraźny efekt rdzenia ferromagnetycznego. Indukcyjność L czujnika pętlowego, wyrażona wzorem (24), jest związana z reaktancją $X = 2\pi f L$. Lokalny wzrost indukcji $\vec{B}$ w ferromagnetycznych elementach koła odpowiada lokalnemu maksimum w sygnale X-VMP. Rysunek 38c ilustruje rozkład indukcji $\vec{B}$ w przekroju oznaczonym jako A_1 , pokazując znaczące lokalne maksimum. Prądy wirowe indukowane w przewodzących materiałach ferromagnetycznych przyczyniają się do strat prądów wirowych, które korelują ze wzrostem w R-VMP jak również w X-VMP. Rozkład wektora gęstości prądu $\vec{J}$ uzyskany z symulacji MES, ujawnia, że straty wiropądowe są najbardziej widoczne w pozycji A_1 . Zgodnie z (25) rezystancja wzrasta wraz ze wzrostem mocy.
6. Dla felgi A_2 , zamodelowanej jako wykonanej z aluminium (materiału paramagnetycznego), przedstawiono hipotetyczne zmiany w R-VMP i X-VMP dla aluminiowej obręczy pozbawionej typowego opasania ferromagnetycznego opony. Gdy czujnik pętlowy oddziałuje z aluminiowym pierścieniem w pozycji A_2 , obserwuje się lokalne minimum w X-VMP i lokalne maksimum w R-VMP. To zachowanie przypisuje się intensywnym efektom indukcji prądów wirowych, które lokalnie zmniejszają indukcję $\vec{B}$ w aluminiowym pierścieniu, jak pokazano na przekroju poprzecznym na rysunku 38d. Głębokość wnikania indukcji $\vec{B}$ jest ograniczona w aluminium, co prowadzi do zmniejszenia średniej energii zmagazynowanej w polu magnetycznym opisanym przez $\vec{B}$ i $\vec{H}$ w (23). Energia ta jest proporcjonalna do indukcyjności L (24). W konsekwencji, wysoka intensywność prądów wirowych objawia się jako lokalne minimum w X-VMP. Prąd wirowy indukowany w pierścieniu aluminiowym, reprezentowany przez wektor gęstości prądu $\vec{J}$, generuje straty mocy P proporcjonalne do rezystancji R . Tak więc, podczas gdy obserwujemy lokalne maksimum przy A_2 w R-VMP, jest ono mniej intensywne niż lokalne maksimum widoczne w A_1 .
7. Warto zauważyć, że występowanie przypadku jak w położeniu A_1 jest typowe w praktyce, biorąc pod uwagę powszechne stosowanie opon z opasaniem stalowym. Wzajemne oddziaływanie między zjawiskami prądów wirowych w aluminiowej feldzie

a efektem rdzenia ferromagnetycznego może prowadzić do równowagi, skutkując wypłaszczeniem w sygnale X-VMP (oznaczającym brak lokalnych minimów lub maksimów), podczas gdy wyraźny szczyt pojawia się w sygnale R-VMP. **Zjawisko to podkreśla, dlaczego systemy kondycjonowania dla czujników pętlowych, które wyłącznie zapewniają X-VMP — powszechne w obecnych zastosowaniach — są niewystarczające do skutecznego wykrywania osi.**

Wyniki analiz MES doprowadziły do wniosków, które umożliwiły opracowanie uproszczonego fizycznego modelu pojazdu. Ze względu na przyjęty ruch kołowy, model podwozia został przeniesiony na powierzchnię cylindra o stałym promieniu (rys. 39).



Rys. 39. Dwuosiowy model fizyczny pojazdu, [H6].

Plastikowa podstawa modelu podwozia pojazdu została wykonana przy użyciu technologii druku 3D. Do podstawy przymocowano prostokątny arkusz aluminium o grubości 1 mm o wymiarach proporcjonalnych do wymiarów pojazdu widzianego z góry. Aby odwzorować kształt sygnałów uzyskanych z czujników IL w przestrzeni między osiami, dodano drugą

warstwę mniejszego arkusza o tej samej grubości. Aby artefakty kół były widoczne w sygnale VMP, w miejsce osi zainstalowano ferromagnetyczne pręty o średnicy 2 mm.

Cewka do zadawania zakłóceń elektromagnetycznych (EMI coil na rys. 39) została zamontowana w przedniej części modelu. Zaciski cewki EMI zostały wyprowadzone do części stacjonarnej poprzez złącze obrotowe. Cewka EMI może być zasilana przez laboratoryjny generator sygnału. Umożliwia to przeprowadzanie testów systemu pomiaru parametrów pojazdu w ruchu w obecności zakłóceń EMI, które powstają podczas pracy rzeczywistego silnika pojazdu.

Oszacowanie błędów zadawania parametrów pojazdu w ruchu

Kluczowe z punktu widzenia budowy laboratoryjnego stanowiska było określenie błędów zadawania prędkości modelu pojazdu. Wartość zadawanej prędkości stycznej v w ruchu ramienia po okręgu o promieniu R (tab. 11) nastawiana jest przez zadawanie odpowiedniej liczby impulsów generowanych przez encoder w ciągu sekundy n_{pps} wyrażonej w pps (pulse per second), i można ją przedstawić zależnością:

$$v = \frac{n_{pps}}{n_{ppr}} \cdot 2\pi R \cdot m_s \cdot 3,6 \cdot 50 \quad (\text{km/h}) \quad (27)$$

gdzie:

n_{pps} – zadana liczba impulsów, która ma być generowana w ciągu sekundy przez encoder w trakcie obrotów ramienia, o wartości zależnej od zadanej prędkości,

n_{ppr} – liczba impulsów na jeden obrót encodera, wyrażona w ppr (pulse per rotation), przy czym na stanowisku zastosowano encoder o $n_{ppr} = 10000$ (tab. 11),

R – promień obrotu ramienia mierzony od osi obrotu do środka prętów imitujących osie w modelu pojazdu, przy czym na stanowisku zastosowano promień o wartości $R = 0,308$ m,

m_s – współczynnik przekładni planetarnej przełożenia obrotów silnika z encoderem na obroty ramienia, przy czym na stanowisku zastosowano przełożenie $m_s = 0,1$ (tab. 11).

Mnożnik o wartości 3,6 – służy przeliczeniu wartości prędkości z jednostek m/s na km/h, mnożnik o wartości 50 – służy przeskalowaniu prędkości zgodnie ze skalą zbudowanego modelu stanowiska pomiarowego.

Podstawiając do (27) przyjęte wartości $n_{ppr} = 10000$ i $m_s = 0,1$ otrzymujemy zależność służącą obliczaniu prędkości stycznej wyrażonej w km/h:

$$v = 360 \cdot \pi \cdot \frac{n_{pps}}{100000} \cdot R \quad (28)$$

Stosując prawo przenoszenia błędów można określić bezwzględną graniczną wartość niepewności zadawania prędkości stycznej za pomocą zależności:

$$\Delta v = \pm \left(\frac{360 \cdot \pi \cdot R}{100000} \cdot \Delta n_{pps} + \frac{360 \cdot \pi \cdot n_{pps}}{100000} \cdot \Delta R \right) \quad (29)$$

Niepewność Δn_{pps} realizacji zadanej liczby impulsów n_{pps} w ciągu sekundy generowanej przez encoder w układzie automatycznej regulacji napędu Easy Servo wynosi $\Delta n_{pps} = \pm 1$ pps. Niepewność określania promienia obrotu R wynosi $\Delta R = \pm 0,0015$ m, i jest zdeterminowana niepewnością określenia położenia osi modelu pojazdu względem osi obrotu ramienia.

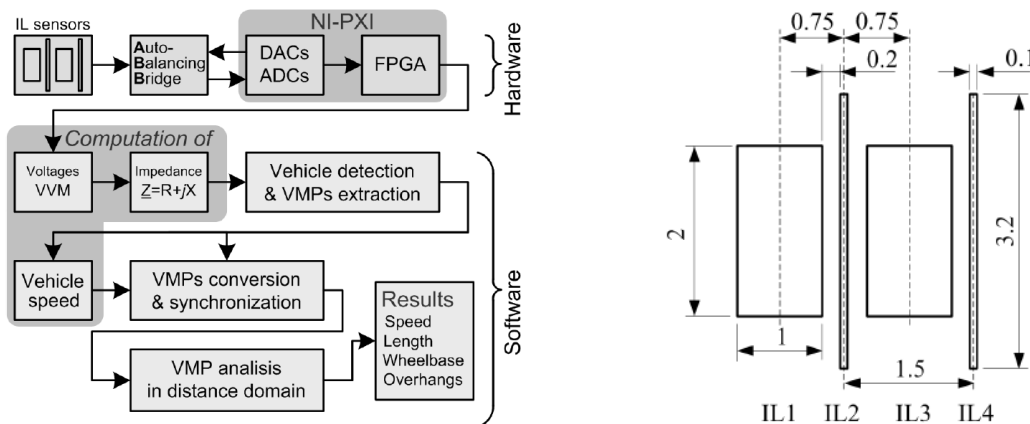
Wartość niepewności określania prędkości stycznej Δv dla skrajnych wartości zadawanych prędkości na podstawie (29) wynosi:

$$\text{dla } v = 10 \text{ km/h} \quad n_{pps} = 2871 \text{ pps} \quad \Delta v = \pm(0,0035 + 0,0487) \text{ km/h} = 0,052 \text{ km/h} \quad (30)$$

$$\text{dla } v = 150 \text{ km/h} \quad n_{pps} = 43061 \text{ pps} \quad \Delta v = \pm(0,0035 + 0,731) \text{ km/h} = 0,73 \text{ km/h} \quad (31)$$

Na podstawie drugiego składnika zależności (29) można zauważyć duży wpływ niepewności ΔR określania promienia na niepewność zadawania prędkości, szczególnie dla rosnącej wartości prędkości, gdyż rośnie wówczas liniowo z prędkością wartość liczby zadawanych impulsów n_{pps} (co pokazują przykłady (30) i (31)).

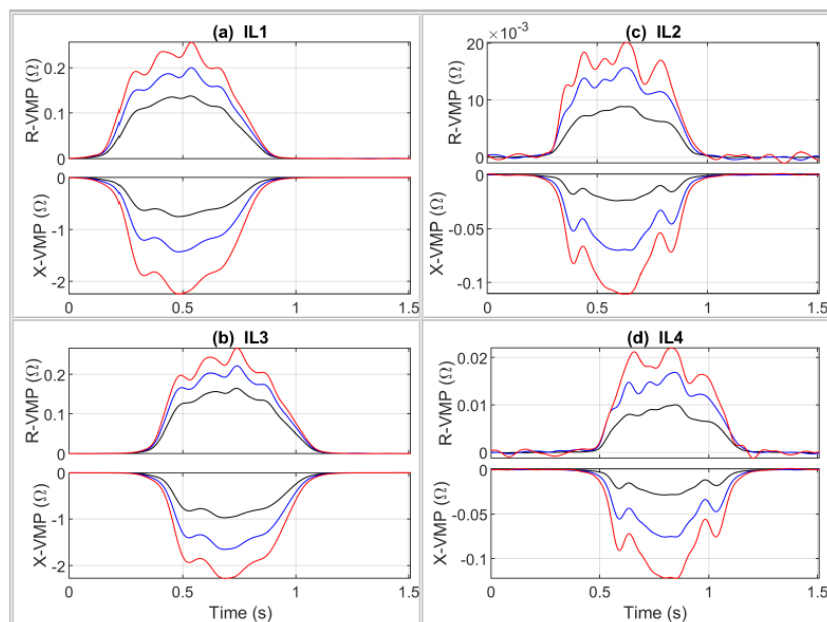
W omawianym osiągnięciu [H6] przedstawiono skondensowany opis dotyczący wieloczęstotliwościowego systemu pomiaru impedancji (MFIM), który został zintegrowany z dedykowanymi algorytmami cyfrowego przetwarzania sygnałów zrealizowanymi programowo. Schemat blokowy systemu pomiarowego przedstawiono na rys. 40.



Rys. 40. Schemat blokowy systemu (z lewej), rozmieszczenie czujników (z prawej), [H6].

Z systemem wieloczęstotliwościowego pomiaru impedancji oprócz algorytmu detekcji pojazdu i ekstrakcji magnetycznych profili pojazdów zintegrowano: algorytmy pomiaru prędkości, konwersji sygnałów VMP uzyskiwanych w dziedzinie czasu do dziedziny drogi i ich synchronizacji, algorytmy analizy VMP dostarczających takich wyników jak: długość pojazdu, rozstaw między osiami a także wymiary zwisów.

Detekcja pojazdu i ekstrakcja jego profilu. Analiza zmian w sygnałach impedancji $\underline{Z}$ spowodowanych obecnością pojazdu jadącego przez pole czujników pętlowych jest wykorzystywana do wykrywania pojazdu. Pojazd jest wykrywany, jeśli sygnał sumy geometrycznej $\underline{Z}$ przekracza pewien wstępnie zdefiniowany poziom. Stan wykrycia pojazdu rozpoczyna przesyłanie zbuforowanych danych do pliku. Wyjściowy rekord zawiera: określoną liczbę próbek sygnałów przed zdarzeniem wykrycia pojazdu, próbki w stanie obecności pojazdu i określoną liczbę próbek po zaniku stanu wykrycia pojazdu. Sygnały R i X zawierają składową stałą równą wartości nominalnej rezystancji i reaktancji czujnika pętlowego mierzone na określonej częstotliwości prądu pomiarowego. Te wartości nominalne są odejmowane od wszystkich wartości próbek składowych sygnałów $\underline{Z}$ i nie występują w wyjściowych zapisach R-VMP i X-VMP. Przykładowe wyodrębnione sygnały VMP samochodu osobowego pokazano na rys. 41.



Rys. 41. Przykładowe wyodrębnione VMP samochodu osobowego (Toyota RAV4), gdzie R- i X- oznaczają odpowiednio zmiany rezystancji i reaktancji zachowane w VMP. Czerwone, niebieskie i czarne sygnały VMP uzyskano odpowiednio przy najwyższej, średniej i najniższej częstotliwości prądu pomiarowego danego czujnika IL1-IL4 (tab. 9).

Pomiar prędkości. Obliczenie prędkości pojazdu obejmuje analizę przesunięcia czasowego (Δt) między sygnałami X-VMP zarejestrowanymi przez dwa czujniki szerokie (IL1 i IL3) umieszczone w odległości $d = 1,5$ m od siebie. Sygnały X-VMP są preferowane ze względu na ich zwiększoną odporność na zakłócenia elektromagnetyczne, co czyni je bardziej niezawodnymi niż R-VMP. Aby oszacować opóźnienie czasowe, przeprowadza się korelację wzajemną znormalizowanych sygnałów X-VMP. Opóźnienie czasowe odpowiada punktowi, w którym funkcja korelacji wzajemnej osiąga maksymalną wartość, a prędkość $v = d/\Delta t$.

Konwersja sygnałów VMP z dziedziny czasu do dziedziny dystansu i synchronizacja.

W systemie pomiarowym czujniki IL1-IL4 są rozmieszczone jeden za drugim (rys. 40), a informacja dotycząca pojazdu w VMP pojawia się w kolejności chronologicznej (rys. 41). Stałe znane odległości między czujnikami (pokazane na rys. 41-prawym) umożliwiają transformację osi czasu w oś reprezentującą drogę przebytą przez pojazd w czasie rejestracji VMP. W przypadku tej transformacji rozdzielczość osi dystansu została ustalona na 1 cm, co oznacza, że sygnały VMP są repróbrowane w odstępach 1 cm w dziedzinie dystansu. Ten proces wymaga repróbrowania sygnałów w dziedzinie czasu, gdzie nowy wektor próbek czasu jest określany przez $tr = 0,01/v$. W rezultacie, gdy nowy wektor czasu jest mnożony przez prędkość pojazdu, uzyskiwany jest wektor dystansu o rozdzielczości 1 cm. W przypadku prędkości pojazdu poniżej 36 km/h algorytm wykonuje próbkowanie w dół (downsampling), natomiast w przypadku prędkości powyżej 36 km/h realizuje nadpróbkowanie. Po przekonwertowaniu sygnałów do domeny dystansu, dane z czujników IL1, IL3 i IL4 są przesuwane o odpowiednie odległości montażowe względem IL2 (rys. 41-prawy). Umożliwia to synchronizację VMP w domenę dystansu, umożliwiając dokładne porównania sygnałów rejestrowanych przy różnych prędkościach. Przykłady tego procesu pokazano na rysunku 42.

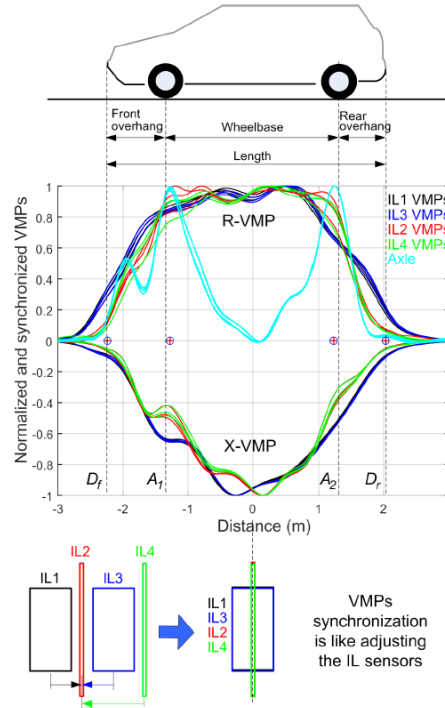
Analiza VMP i wykrywanie artefaktów w dziedzinie dystansu. Analiza VMP w dziedzinie dystansu prowadzi do wykrywania lokalizacji artefaktów pochodzących od przodu, tyłu i osi pojazdu. Wykrywanie przodu i tyłu jest przeprowadzane w celu zmierzenia długości pojazdu. Lokalizacja osi w nadwoziu pojazdu pozwala zmierzyć odległość między osiami oraz tzw. przedni i tylny zwis pojazdu. Wykrywanie osi umożliwia Algorytm 1, który wzmacnia informacje o osiach poprzez łączenie R-VMP i X-VMP uzyskanych z wąskich czujników IL2 i IL4. Algorytm 1 przybrał postać funkcji języka MATLAB zaprojektowanej w celu wzmocnienia sygnału osi ($Axle$).

Algorithm 1 MATLAB function for enhancing axle signal from R, and X VMP

```

function Axle = AxleEnhance(R, X)
[x, k] = min(X)
r = R(k)
gain = abs(x)/r
K = gain · R + X
Axle = K/max(K)

```



Rys. 42. Przykładowe znormalizowane sygnały VMP, wyodrębnione sygnały osi (Axle) i zlokalizowane artefakty. Lokalizacja artefaktów (D_f — przód pojazdu, A_1 — pierwsza oś, A_2 — druga oś, D_r — tył pojazdu) są oznaczone kółkami ze znakiem plus. Wartości odniesienia są oznaczone pionowymi liniami przerywanymi. Dla każdego z czterech czujników IL trzy linie tego samego koloru reprezentują trzy częstotliwości prądu pomiarowego.

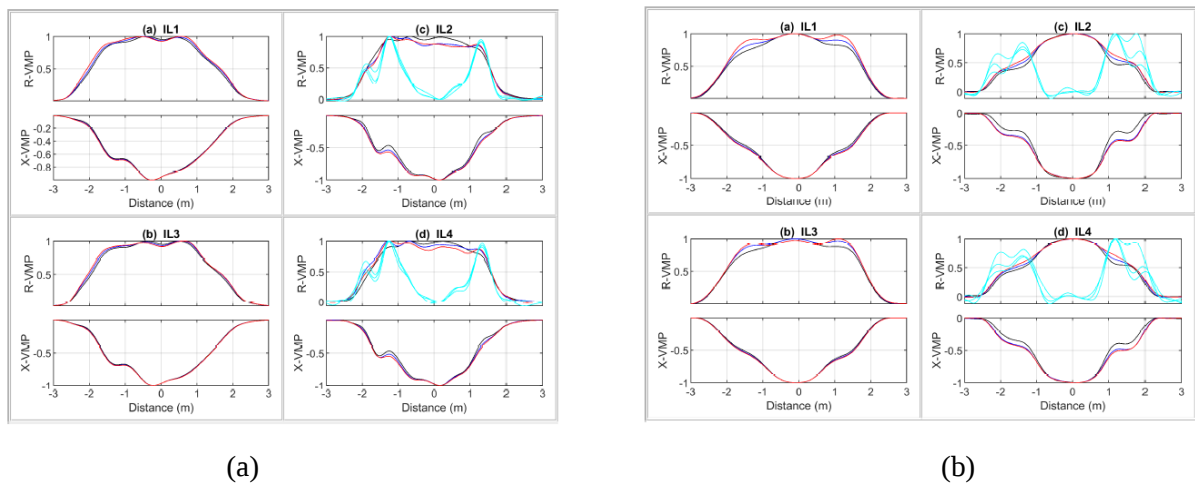
Algorytm 1 jest stosowany oddzielnie do poszczególnych sygnałów VMP uzyskanych przy różnych częstotliwościach nośnych z udziałem wąskich czujników IL2 i IL4. Ponadto niektóre VMP zawierają zakłócenia EMI, dlatego do uzyskanych wyników stosuje się medianę, aby złagodzić ich wpływ. Wykrywanie przodu i tyłu pojazdu odbywa się przy użyciu komparatora programowego o określonym poziomie porównania i histerezy. Poziom porównania komparatora i histereza zostały dobrane eksperymentalnie dla modelu pojazdu użytego w badaniach.

Długość pojazdu V_L , rozstaw między osiami W_B , wymiar zwisu przedniego O_f , oraz tylnego O_r , obliczane są z następujących zależności:

$$V_L = D_r - D_f, \quad W_B = A_2 - A_1, \quad O_f = A_1 - D_f, \quad O_r = D_r - A_2. \quad (32)$$

Zgodność sygnałów VMP uzyskiwanych na stanowisku laboratoryjnym i drogowym.

Przykładowe sygnały VMP zarejestrowane na stanowisku drogowym, samochodu osobowego, pokazano na rysunku 43a, natomiast sygnały VMP zarejestrowane z wykorzystaniem stanowiska laboratoryjnego i fizycznego modelu samochodu pokazano na rysunku 43b. Zmierzona wartość prędkości została użyta do przeliczenia osi czasu pomiaru na dystans przebyty przez pojazd w tym czasie. Dlatego VMP są reprezentowane w dziedzinie dystansu (w m) przebytego przez pojazd względem stałej lokalizacji czujnika. Taka procedura umożliwia porównanie kształtów uzyskiwanych VMP.

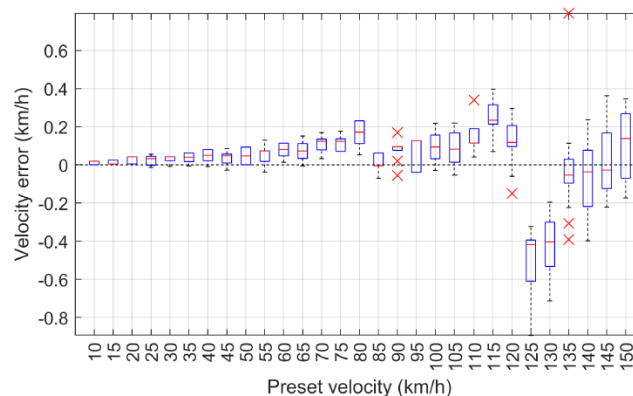


Rys. 43. Znormalizowane VMP i sygnały osi samochodu osobowego dwuosiowego (Hyundai i30) zarejestrowane na stanowisku drogowym (a); znormalizowane VMP i sygnał osi zarejestrowane na stanowisku laboratoryjnym (b), [H6].

Ogólne porównanie uzyskanych VMP dla rzeczywistego pojazdu i jego modelu sprowadza się do następujących wniosków. Arkusz metalu w sygnałach VMP jest odpowiednią reprezentacją podwozia pojazdu. Pręt ferromagnetyczny działa jak stalowy pas w oponie, powodując artefakty w postaci lokalnego odkształcenia w VMP. Do laboratoryjnych testów systemu pomiaru impedancji, zgodność VMP modelu z rzeczywistym pojazdem jest wystarczająca.

Wyniki badań laboratoryjnych. Ponieważ każdy pojazd generuje zakłócenia elektromagnetyczne [C2], podczas testu systemu przez cewkę do zadawania zakłóceń EMI zastosowano sygnał prostokątny o częstotliwości podstawowej 14,3 kHz. Poziom zakłóceń został dobrany tak, aby odzwierciedlał typowy poziom występujący w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego. Ponieważ badany system MFIM wykorzystuje wysoce selektywne filtry pasmowo-przepustowe, które są dostrojone do częstotliwości roboczych określonych w tab. 9 i które charakteryzują się wysokim tłumieniem pasma zaporowego, to przy tych parametrach praktycznie nie obserwowano zakłóceń w rejestrowanych sygnałach

VMP. Dla każdej wstępnie ustawionej prędkości w zakresie od 10 km/h do 150 km/h w odstępach co 5 km/h, przeprowadzano 21 powtórzeń przejazdów testowych. W sumie wykonano 609 przebiegów dla jednego pełnego testu systemu. Dla każdego przebiegu system MFIM rejestrował sygnały VMP po czym opisane algorytmy wykonywały obliczenia parametrów: prędkość i długość modelu pojazdu, rozstaw osi oraz tylne i przednie wymiary zwisów. Błędy prędkości dla każdego pomiaru, obliczone jako różnica między prędkością mierzoną przez system MFIM a prędkością wstępnie ustawioną, są pokazane na rys. 44 w formie wykresu pudełkowego [25]. Na każdym pudełku centralny czerwony znaczek wskazuje medianę, dolna i górna krawędź pudełka wskazują odpowiednio 25. i 75. percentyl, wąsy rozciągają się do najbardziej ekstremalnych punktów danych, które nie są uważane za wartości odstające, a wartości odstające są wykreślane indywidualnie przy użyciu czerwonego symbolu $\times$. Wartości odstające zostały zidentyfikowane przy użyciu funkcji wykresu pudełkowego MATLAB opartej na metodzie rozstępu interkwartylowego (IQR).

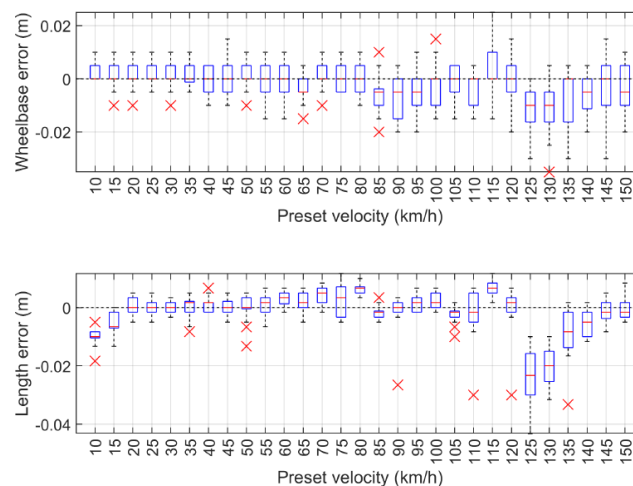


Rys. 44. Błąd prędkości mierzonej przez system MFIM zależny od zadanej prędkości określonej na podstawie enkodera [H6].

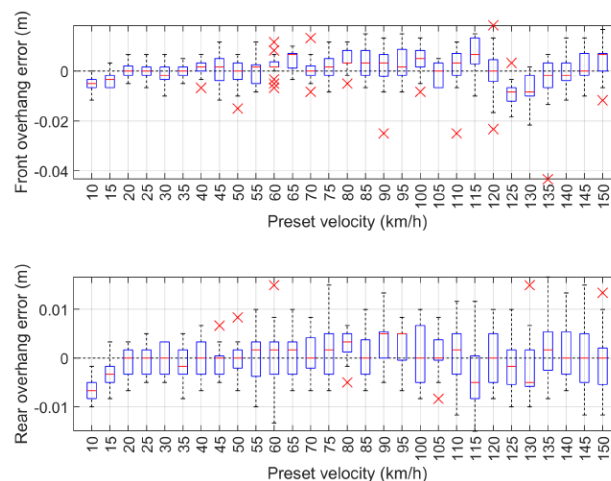
Wyniki pomiaru błędu rozstawu osi i błędu długości pojazdu zależnego od zadanej prędkości przejazdowej przedstawiono na rys. 45. Wartości błędu przedniego i tylnego zwisu modelu pojazdu w zależności od ustawionej prędkości przedstawiono na rys. 46.

Maksymalny błąd pomiaru prędkości modelu pojazdu wynosi 0,895 km/h i wystąpił przy ustawionej prędkości 125 km/h. Bezwzględne błędy pomiaru rozstawu osi i długości wynoszą 3,5 cm i 4,3 cm i wystąpiły odpowiednio przy prędkości 130 km/h i 125 km/h. Bezwzględne błędy pomiaru przedniego i tylnego zwisu wynoszą 4,3 cm i 1,7 cm, które wystąpiły przy ustawionej prędkości 135 km/h. Maksymalny błąd pomiaru prędkości mniejszy niż 1 km/h

pokazuje, że system działa niezawodnie przy dużych prędkościach. Ponadto, błędy pomiarów rozstawu osi i długości, które mieszczą się w granicach kilku centymetrów, wskazuje na wysoki poziom dokładności. Ta precyzja, osiągnięta w warunkach laboratoryjnych dla systemu MFIM, jest kluczowa dla różnych zastosowań, w tym klasyfikacji pojazdów, gdzie nawet niewielkie rozbieżności mogą skutkować błędami klasyfikacji pojazdów. Ogólnie rzecz biorąc, wyniki te ilustrują skuteczność zastosowanej technologii do uzyskiwania wiarygodnych wyników pomiarów w szerokim zakresie prędkości.



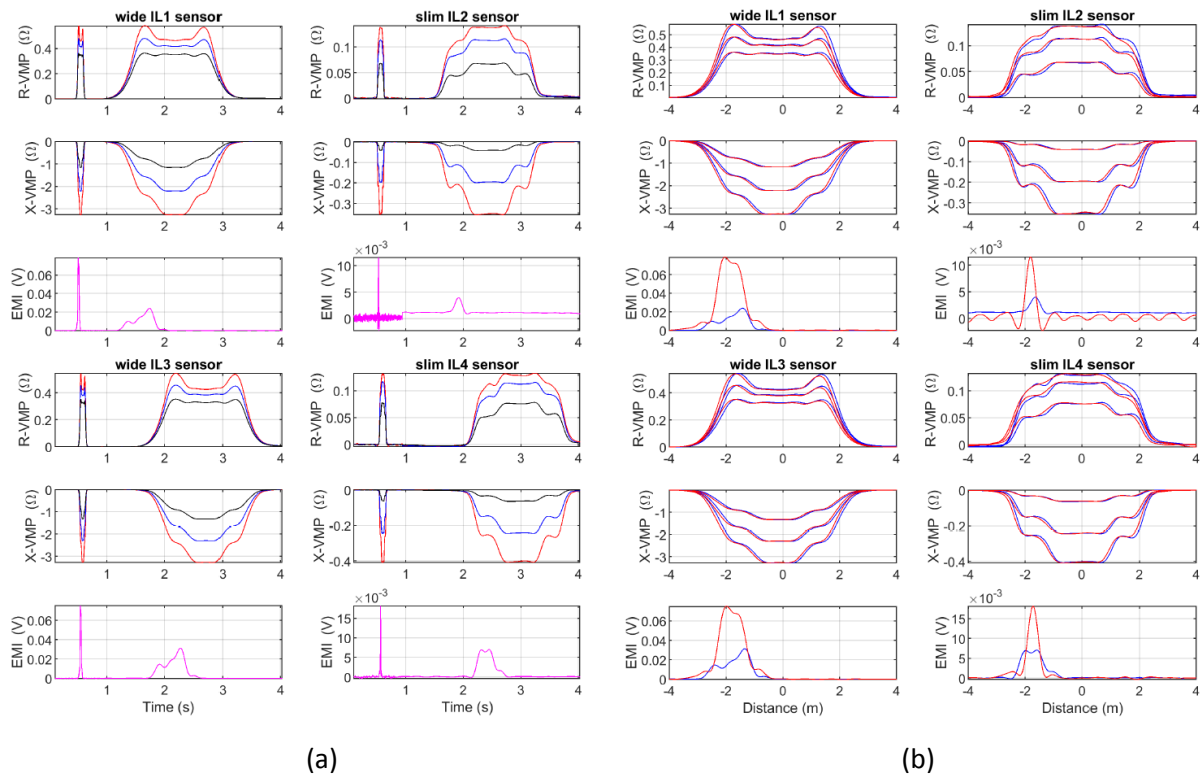
Rys. 45. Wyniki testów pomiarowych: błędy pomiaru rozstawu osi (góra) i błędy pomiaru długości pojazdu (dół) zależnie od prędkości, [H6].



Rys. 46. Wyniki błędu pomiaru zwisu przedniego (góra) i błędu pomiaru zwisu tylnego (dół) w zależności od ustawionej prędkości, [H6].

Dodatkowo, powtarzalność uzyskanych VMP w dziedzinie dystansu została zbadana przy ekstremalnych prędkościach 10 km/h i 150 km/h. Rys. 47a przedstawia sygnały VMP

w dziedzinie czasu dla dwóch realizacji przejazdów modelu pojazdu poruszającego się najpierw z dużą i kolejno niską prędkością. Oba sygnały (o krótkim czasie trwania i długim) zostały poddane tej samej procedurze konwersji do dziedziny dystansu wraz z synchronizacją i przedstawione na wspólnym rys. 47b. Widać dobrą spójność kształtu poszczególnych sygnałów VMP uzyskanych przy skrajnie różnych prędkościach (10 km/h i 150 km/h, odpowiednio przebiegi niebieskie i czerwone na rys. 47b).



Rys. 47. Wizualne porównanie VMP uzyskanych przy niskiej prędkości (10 km/h) i dużej prędkości (150 km/h): (a) w dziedzinie czasu (czerwone, niebieskie i czarne VMP uzyskano odpowiednio przy najwyższej, średniej i najniższej częstotliwości), sygnały VMP o krótkim czasie trwania uzyskano przy prędkości 150 km/h, o dłuższym czasie trwania przy 10 km/h, (b) nałożono na siebie VMP w dziedzinie dystansu (tj. po konwersji na dziedzinę dystansu i po synchronizacji), czerwone sygnały są uzyskane przy prędkości 150 km/h, niebieskie sygnały przy prędkości 10 km/h.

Dyskusja. Wyniki LTB przedstawione w tym badaniu uzyskano w warunkach stałej prędkości pojazdu podczas przejazdów przez obszar pracy czujników pętlowych. Potencjalne zmiany prędkości pojazdu (hamowanie, przyspieszanie) można też łatwo zaobserwować w sygnałach VMP w domenie dystansu. Widoczny jest wówczas wyraźny brak nakładania się unormowanych VMP rejestrowanych przez czujniki (IL1 i IL3 – o tych samych wymiarach) oraz dwa wąskie czujniki (IL2 i IL4). W literaturze [12,26,27] wprowadzono koncepcję „długości magnetycznej” pojazdu, która różni się od rzeczywistej długości pojazdu. Długość magnetyczna jest definiowana jako iloczyn czasu obecności pojazdu w polu czujnika IL i jego prędkości. Chociaż możliwe jest oszacowanie rzeczywistej długości na podstawie długości

magnetycznej przy użyciu eksperymentalnie określonego współczynnika korekcji, współczynnik ten różni się między pojazdami o wysokim i niskim zawieszeniu. Zastosowanie jednego uniwersalnego współczynnika korekcji dla wszystkich pojazdów wprowadza znaczące błędy, z rozbieżnościami sięgającymi kilkudziesięciu centymetrów, jak zauważono w [28]. Kolejne wyzwanie w dokładnym pomiarze długości pojazdu przy użyciu analizy VMP wynika z faktu, że duża część nowoczesnych komponentów pojazdów jest wykonana z plastiku, który nie oddziałuje z polem elektromagnetycznym czujnika IL. Rozwiązanie tego problemu wymaga wysoce selektywnego procesu klasyfikacji pojazdów opartego na VMP, uzupełnionego o kompensację tych zmian przy użyciu kompleksowej bazy wiedzy na temat parametrów pojazdu odniesienia. Wyniki uzyskane w tej pracy opierały się na starannym dostrojeniu algorytmów wykrywania artefaktów, w tym ustawieniu odpowiednich progów komparatora i poziomów histerezy, w celu skutecznego filtrowania zakłóceń w sygnale VMP. Wczesna klasyfikacja pojazdu ma kluczowe znaczenie podczas przetwarzania sygnału, ponieważ umożliwia dokładne dostrojenie algorytmów analizy VMP w celu uzyskania dokładniejszych pomiarów parametrów pojazdów. Błąd pomiaru prędkości jest najbardziej znaczącym czynnikiem przyczyniającym się do niedokładności w szacowaniu długości pojazdu, szczególnie ze względu na jego wpływ na wykrywanie przedniej części pojazdu. Aby złagodzić te błędy i poprawić precyzję systemów, kluczowe jest wdrożenie filtrów z płaską odpowiedzią w paśmie przepustowym, starannie dostrojonych do prędkości pojazdu, jak w proponowanym systemie MFIM. Takie podejście zachowuje kształt VMP w dziedzinie dystansu przy różnych prędkościach, zwiększając w ten sposób powtarzalność i dokładność wyników.

Wyniki uzyskane na stanowisku laboratoryjnym dotyczące powtarzalności VMP uzyskanych przy różnych prędkościach i przeliczonych na dziedzinę dystansu mają duże znaczenie, szczególnie w kontekście klasyfikacji pojazdów [31], a zwłaszcza bazującej na odległościach między osiowych i zwisach, np. ALT20 [29].

Podsumowanie osiągnięcia [H6]. Opracowane stanowisko laboratoryjne do testowania systemu MFIM umożliwia szacowanie parametrów metrologicznych w szerokim zakresie prędkości drogowych. Rejestrowane sygnały VMP na proponowanym stanowisku są w dobrej zgodności z tymi uzyskiwanymi na rzeczywistym stanowisku drogowym, zatem wnioski wyciągnięte z testów laboratoryjnych mają swoje przełożenie na warunki terenowe. Proponowane stanowisko laboratoryjne umożliwia powtarzalne przejazdy modelu pojazdu przez obszar działania czujników indukcyjnych pętlowych, a tym samym pozwala określić

błędy pomiaru w zadanym zakresie prędkości, przy czym analogiczne badania byłyby trudne do przeprowadzenia w warunkach terenowych. Testy różnych konfiguracji czujników pętlowych można również z powodzeniem przeprowadzić w proponowanym stanowisku bez konieczności przebudowy kosztownego stanowiska drogowego. Konstrukcja stanowiska laboratoryjnego pozwala na zadawanie zakłóceń EMI, co umożliwia kompleksową analizę błędów pomiaru spowodowanych różnymi zakłóceniami. System MFIM może współpracować z laboratoryjnymi czujnikami indukcyjnymi pętlowymi analogicznie jak na stanowisku drogowym. Opracowany system pomiarowy jest w stanie mierzyć prędkość pojazdu, rozstaw osi, długość i zwisy, a zaproponowane stanowisko laboratoryjne pozwoliło określić błędy tych parametrów w szerokim zakresie prędkości drogowych od 10 km/h do 150 km/h w krokach co 5 km/h. Ponadto wykazano powtarzalność rejestrowanych i przetworzonych na dziedzinę dystansu sygnałów VMP przy dwóch skrajnie różnych prędkościach, tj. 10 km/h i 150 km/h. Po konwersji na dziedzinę dystansu uzyskano bardzo spójne wyniki sygnałów z systemu MFIM. Ta powtarzalność jest kluczowa dla procesu klasyfikacji pojazdów, na podstawie sygnałów VMP, w ruchu drogowym. Ten aspekt badań habilitanta ma bezpośrednie implikacje dla zastosowań w ITS i Generalnym Pomiarze Ruchu, ale także w zastosowaniu w systemach zarządzania ruchem drogowym, gdzie dokładna i powtarzalna klasyfikacja pojazdów może usprawnić analizę przepływu ruchu i zautomatyzowane sterowanie, a powyższe stanowi oryginalny wkład habilitanta w rozwój dyscypliny AEEiTK.

Podsumowanie

Cykl przedstawionych 8 prac dotyczy różnych aspektów rozwoju nauki w obszarze systemów i metod pozyskiwania efektywnych informacji z wykorzystaniem technologii czujników indukcyjnych pętlowych. Prace prezentowane na międzynarodowych konferencjach [C1], [C2] przedstawiają badania wstępne natomiast prace opublikowane w recenzowanych czasopismach naukowych z listy JCR prezentują główne osiągnięcia.

Za swój główny wkład merytoryczny w rozwój dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne habilitant uważa badania nad wysoko czułymi metodami pomiaru impedancji czujników indukcyjnych pętlowych, propozycję zastosowania ściśle związanego z impedancją pojęcia profilu magnetycznego pojazdu, proponowanie rozwiązań układowych, które zostały użyte w praktyce, zwłaszcza do pomiaru impedancji wąskiego czujnika indukcyjnego pętlowego do detekcji osi i pomiaru odległości między osiami, wprowadzenie redundancji informacji poprzez adaptację wieloczęstotliwościowej metody pomiaru impedancji, zwiększenie liczby jednocześnie

rejestrowanych profili pojazdu w ruchu i poprawę ich jakości a także zwiększenie odporności systemu na zakłócenia elektromagnetyczne oraz propozycję nowej metody estymacji masy ładunku zidentyfikowanego samochodu z wykorzystaniem wprowadzonej technologii, i badania laboratoryjne zrealizowane w szerokim zakresie prędkości.

Obszarami zastosowań wyników badań są inteligentne systemy transportowe i Generalny Pomiar Ruchu, w których pożądana jest wysoka dokładność klasyfikacji pojazdów, przy czym system wieloczęstotliwościowego pomiaru impedancyjnych profili magnetycznych pozwala ją istotnie zwiększyć [31].

Co istotne opracowane przez habilitanta systemy pomiarowe są aktualnie wdrażane na drodze krajowej DK44 i drodze wojewódzkiej DW975, a uzyskiwane wyniki poddawane są dodatkowym analizom. Prace te są prowadzone we współpracy z Uniwersytetem Bielsko-Bialskim i Politechniką Śląską. Dotyczą klasyfikacji pojazdów z wykorzystaniem uczenia maszynowego, pomiaru prędkości oraz ulepszeń dla systemów WIM niezdolnych do detekcji osi uniesionej. Wyniki tych prac zostały przedstawione w artykułach:

1. Krzysztof Duda, Zbigniew Marszałek: "Vehicle speed determination with inductive-loop technology and fast and accurate fractional time delay estimation by DFT", *Metrology and Measurement Systems*, (IF=1.0) – **praca przyjęta do publikacji**.

2. Zbigniew Marszałek, Tomasz Konior, Jacek Izydorczyk, Mateusz Szulik, Krzysztof Duda, "Vehicle Classification based on Multi-frequency Resistance and Reactance Magnetic Profiles", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, (IF=7.9) – **praca przyjęta do publikacji**.

3. Zbigniew Marszałek, Artur Ryguła, Andrzej Maczyński, Krzysztof Duda, „Application of a multi-frequency inductive loop system for measuring vehicle inter-axle distance, including scenarios involving a lifted axle”, – praca zgłoszona do recenzji.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Od roku 2022 habilitant pełni funkcję koordynatora ds. współpracy między uczelniami Akademią Górniczo-Hutniczą i Politechniką Śląską. W roku 2022 doprowadził do podpisania aneksu do umowy o współpracy standaryzującej i rozszerzającej obszary współpracy międzyuczelnianej. W ramach nawiązanej współpracy z prof. dr hab. inż. Jackiem Izydorczykiem (Politechnika Śląska, Wydział

Automatyki, Elektroniki i Informatyki) aktywność naukowa habilitanta na drugiej uczelni została sformalizowana umową o staż naukowy w Zakładzie Telekomunikacji i Teleinformatyki Wydziału Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej w okresie od 2 stycznia do 30 czerwca 2023 roku. Istotnymi efektami stażu naukowego są: publikacja naukowa w czasopiśmie z listy JCR (IF 3.9) **[H5]** oraz referat na spotkaniu technicznym polskich oddziałów IEEE VTS i ComSoc, jak również wyniki badań do publikacji na temat zastosowania uczenia maszynowego do klasyfikacji na podstawie parametrów profili magnetycznych pojazdów [31]. Kopie zaświadczenia o odbyciu tego stażu zawiera załączniki nr 3b-1.

W okresie od 15.11.2023 roku do 15.02.2024 roku habilitant odbył staż naukowy w innej instytucji naukowej, tj. na Uniwersytecie Bielsko-Bialskim w Katedrze Transportu. Istotnymi efektami stażu naukowego są wyniki badań dotyczących analiz wyników laboratoryjnych i pomiarowych systemu uruchomionego na drodze krajowej DK44, zebranych w manuskrypcie publikacji złożonej do recenzji w czasopiśmie naukowym. Kopia zaświadczenia o odbyciu tego stażu stanowi załącznik nr 3b-2.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

Osiągnięcia dydaktyczne: Habilitant samodzielnie opracował i prowadzi następujące przedmioty:

- Wprowadzenie do programowania, wykład i laboratorium dla studentów 1 roku na kierunku Mikroelektronika w Technice i Medycynie
- Zaawansowane Metody Programowania Systemów Wbudowanych, wykład, laboratorium i projekt dla studentów studiów magisterskich na kierunku Mikroelektronika w Technice i Medycynie

Prowadzi również zajęcia laboratoryjne z przedmiotów:

- Systemy pomiarowe na kierunku Automatyka i Robotyka
- Pomiary parametrów ruchu drogowego na kierunku Elektrotechnika
- Miernictwo przemysłowe (Elektrotechnika)
- Pomiary elektryczne wielkości nieelektrycznych (Elektrotechnika)
- Pomiary wielkości nieelektrycznych (Elektrotechnika)

Kształcił studentów na studiach stacjonarnych i niestacjonarnych. Habilitant był promotorem 24 prac inżynierskich i 25 prac magisterskich.

Osiągnięcia organizacyjne: Habilitant od 2010 roku pełni funkcję koordynatora do spraw związanych z organizacją zajęć dydaktycznych, a w szczególności opracował 13 planów obciążeń dydaktycznych i 12 rozliczeń obciążeń dydaktycznych w Katedrze Metrologii i Elektroniki zatrudniającej 31 pracowników.

Osiągnięcia popularyzujące naukę: Habilitant brał udział w przygotowaniach i pracach Komitetu Głównego Ogólnopolskiej Olimpiady Wiedzy Elektrycznej i Elektronicznej.

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

Wnioskodawca był członkiem Rady Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH w latach 2016-2019.

Jest członkiem stowarzyszenia ITS-Polska. Zdobył wyróżnienie Lider ITS w 2014. Wnioskodawca otrzymał indywidualną Nagrodę Rektora AGH za osiągnięcia naukowe: II stopnia w 2019, i III stopnia w latach 2021 i 2022 (załącznik 4a).

Wnioskodawca w ramach projektu badawczego⁷ zrealizował dwa stanowiska badawcze: 1) zlokalizowane na drodze krajowej DK44, rys. 48a; 2) zlokalizowane na drodze wojewódzkiej DW975, rys. 48b, obejmujące cały przekrój drogi.

a)



b)



Rys. 48. Widok z kamer poglądowych na stanowiska badawcze: a) na drodze DK44, b) na drodze DW975 (stanowisko podwójne – obejmuje cały przekrój drogi).

Stwierdzam, że w ramach wypełnienia wymogów Art. 219. ust. 1 Ustawy:

1) posiadam stopień doktora

2) przedstawiłem 1 cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b Ustawy oraz wykaz osiągnięć naukowych stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny

3) prowadziłem badania z pracownikami naukowymi Politechniki Śląskiej, w wyniku czego powstały publikacje [H5] i [31]. Dodatkowo prowadziłem i kontynuuję szeroką współpracę z pracownikami Uniwersytetu Bielsko-Bialskiego, a w procesie recenzji znajduje się wspólna publikacja.

⁷ Projekt badawczy finansowany ze środków programu „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza” w AGH

Literatura

- [1] Z. Marszałek, K. Duda: „Vehicle magnetic signature compatibility for inductive loop sensor with various signal conditioning systems”, 2018 International Conference on Signals and Electronic Systems, IEEE, 2018.
- [2] Y.-K. Ki and D.-K. Baik, “Vehicle-classification algorithm for single-loop detectors using neural networks,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 55, no. 6, pp. 1704–1711, 2006.
- [3] C. Sun, “An investigation in the use of inductive loop signatures for vehicle classification,” Inst. Transportation Studies, Univ. California, Berkeley, CA, California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2000-4, 2000.
- [4] C. Sun, S. G. Ritchie, and S. Oh, “Inductive classifying artificial network for vehicle type categorization,” Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol. 18, no. 3, pp. 161–172, 2003.
- [5] J. Gajda and R. Sroka, “Vehicle classification by parametric identification of the measured signals,” in Proc. 16th IMEKO Congr., vol. 9, 2000, pp. 199–204.
- [6] C. Oh and S. G. Ritchie, “Recognizing vehicle classification information from blade sensor signature,” Pattern Recognition Letters, vol. 28, no. 9, pp. 1041–1049, Jul. 2007.
- [7] S.-T. C. Jeng and S. G. Ritchie, “Real-time vehicle classification using inductive loop signature data,” Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 2086, no. 1, pp. 8–22, 2008.
- [8] H. A. Oliveira, F. R. Barbosa, O. M. Almeida, and A. P. S. Braga, “A vehicle classification based on inductive loop detectors using artificial neural networks,” in 2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2010. IEEE, Nov. 2010.
- [9] S. Meta and M. G. Cinsdikici, “Vehicle-classification algorithm based on component analysis for single-loop inductive detector,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 59, no. 6, pp. 2795–2805, Jul. 2010.
- [10] S. S. M. Ali, N. Joshi, B. George, and L. Vanajakshi, “Application of random forest algorithm to classify vehicles detected by a multiple inductive loop system,” in 2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Anchorage, AK, USA: IEEE, Sep. 2012, pp. 491–495.
- [11] J. Lamas-Seco, P. Castro, A. Dapena, and F. Vazquez-Araujo, “Vehicle classification using the discrete fourier transform with traffic inductive sensors,” Sensors, vol. 15, no. 10, p. 27201–27214, Oct. 2015.doi: <http://dx.doi.org/10.3390/s151027201>
- [12] B. R. Vasconcellos, M. Rudek, and M. De Souza, “A Machine Learning Method for Vehicle Classification by Inductive Waveform Analysis,” IFAC-PapersOnLine, vol. 53, no. 2, pp. 13 928–13 932, 2020.
- [13] C.-F. Liao, “Refining inductive loop signature technology for statewide vehicle classification counts,” University of Minnesota. Department of Mechanical Engineering, Minnesota, USA, Tech. Rep., 12 2021. [Online]. Available: <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/62297>

- [14] XP Metal Detectors, Fast Multi-frequency metal detector <https://www.xpmetaldetectors.com>, Dostęp: 2024.10.17.
- [15] F. Villa, A. Magnani, M. Maggioni, A. Stahn, S. Rampichini, G. Merati, and P. Castiglioni, "Wearable multi-frequency and multi-segment bioelectrical impedance spectroscopy for unobtrusively tracking body fluid shifts during physical activity in real-field applications: A preliminary study," *Sensors*, vol. 16, no. 5, p. 673, May 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/s16050673>
- [16] J. Sui, N. Gandotra, P. Xie, Z. Lin, C. Scharfe, and M. Javanmard, "Multi-frequency impedance sensing for detection and sizing of DNA fragments," *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, p. 6490, Mar. 2021. <https://www.nature.com/articles/s41598-021-85755-9>
- [17] B. Wolter, B. Straß, K. Jacob, M. Rauhut, T. Stephani, M. Riemer, and M. Friedemann, "Nondestructive material characterization and component identification in sheet metal processing with electromagnetic methods," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, Mar. 2024. doi: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-024-55927-4>.
- [18] L. S. Rosado, P. M. Ramos, and M. Piedade, "Real-time processing of multifrequency eddy currents testing signals: Design, implementation, and evaluation," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, no. 5, p. 1262–1271, May 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2013.2283633>.
- [19] J. Gajda, P. Piwowar, R. Sroka, M. Stencel, and T. Zeglen, "Application of inductive loops as wheel detectors," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 21, no. 1, pp. 57–66, 2012.
- [20] K. Duda, P. Turcza, T.P. Zielinski, Z. Marszalek, "Flat-Top Bandpass FIR Hilbert Transformers". In *Proceedings of the 2018 International Conference on Signals and Electronic Systems (ICSSES)*, Kraków, Poland, 2018, doi:10.1109/icses.2018.8507307.
- [21] K. Duda, T.P. Zieliński, S.H. Barcentewicz, "Perfectly flat-top and equiripple flat-top cosine windows". *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2016, 65, 1558–1567. doi: 10.1109/tim.2016.2534398.
- [22] Marszalek, Z., Sroka, R., Zeglen, T.: "Inductive Loop for Vehicle Axle Detection from First Concepts to the System Based on Changes in the Sensor Impedance Components", *MMAR 2015: 20th international conference on Methods and Models in Automation and Robotics*, IEEE, 2015.
- [23] Z. Marszałek, K. Duda, P. Turcza: „Design and experimental validation of multi-frequency impedance measurement system”, *2018 International Conference on Signals and Electronic Systems*, IEEE, 2018.
- [24] D. Poljak, *Advanced Modeling in Computational Electromagnetic Compatibility*; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2007.
- [25] R. McGill, J.W. Tukey, W.A. Larsen, *Variations of Box Plots*. *Am. Stat.* 1978, 32, 12.
- [26] L.A. Klein. *Sensor Technologies and Data Requirements for ITS*; Artech House: Boston, MA, USA, 2001.

- [27] F.M. Belenguer, A.M. Salcedo, A.G. Ibañez, V.M. Sánchez, Advantages offered by the double magnetic loops versus the conventional single ones. *PLoS ONE* 2019, 14, e0211626.
- [28] B. Coifman, S. Kim, Speed estimation and length based vehicle classification from freeway single-loop detectors. *Transp. Res. Part Emerg. Technol.* 2009, 17, 349–364.
- [29] P. Burnos, Alternative Automatic Vehicle Classification Method, *Metrology and Measurement Systems*, Vol. XVII, No. 3, pp. 323-334, 2010.
- [30] K. Duda, Z. Marszałek: “Vehicle speed determination with inductive-loop technology and fast and accurate fractional time delay estimation by DFT”, *Metrology and Measurement Systems*, Vol. 31, No. 4, 2024, doi: 10.24425/mms.2024.152048.
- [31] Z. Marszałek, T. Konior, J. Izydorczyk, M. Szulik, D. Krzysztof, Vehicle Classification based on Multi-frequency Resistance and Reactance Magnetic Profiles, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025, doi: 10.1109/TITS.2025.3537137.

.....
(podpis wnioskodawcy)