

Analiza sygnałów reprezentujących składowe impedancje czujnika indukcyjnego pętlowego

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę i interpretację sygnałów reprezentujących składowe impedancje czujnika indukcyjnego pętlowego, zastosowanego do identyfikacji parametrów poruszających się pojazdów samochodowych w ruchu drogowym. Zastosowany układ kondycjonowania umożliwia uzyskiwanie dwóch sygnałów - profili (rezystancyjnego i reaktancyjnego) proporcjonalnych do zmian składowych impedancji czujnika pętlowego. Informacje zawarte w tych profilach zostały zinterpretowane w odniesieniu do zjawisk fizycznych zachodzących w polu magnetycznym czujnika oraz w odniesieniu do konstrukcji mechanicznej pojazdu. W celu jednoznacznej detekcji niektórych elementów konstrukcyjnych pojazdów zastosowano metody fuzji obu rejestrowanych sygnałów.

Abstract. The paper presents an analysis and interpretation of signals representing the components of the inductive loop sensor impedance. Such a sensor is used for the identification of the moving vehicles in traffic. Applied conditioning system makes it possible to obtain two signals (profiles) at its output. These signals are proportional to changes in the constituent parameters of the loop sensor impedance. The information included in these profiles were interpreted in relation to the physical phenomena occurring in the magnetic field sensor and in relation to the mechanical design of the vehicle. In order to clear detection of structural elements of vehicles the fusion methods of both recorded signals have been used. (**Analysis of signals representing the components of the inductive loop sensor impedance.**)

Słowa kluczowe: czujnik indukcyjny pętlowy, profil magnetyczny rezystancyjny i reaktancyjny pojazdu, fuzja danych

Keywords: inductive loop sensor, resistance and reactance magnetic profile of vehicle, data fusion

Wstęp

Czujniki indukcyjne pętlowe od wielu lat są powszechnie stosowane do detekcji obecności pojazdów w określonej strefie, zliczania pojazdów, pomiaru ich prędkości i długości, a także do klasyfikacji. Uzyskiwane informacje wykorzystywane są do wyznaczania parametrów opisujących stan ruchu drogowego w danej lokalizacji oraz do inteligentnego sterowania ruchem [1, 2, 3, 4].

Zasada pracy czujnika indukcyjnego pętlowego polega na oddziaływaniu zmiennego pola magnetycznego czujnika z metalowymi elementami pojazdu [5]. Skutki oddziaływania można obserwować w składowej zmiennej sygnałów - profili utworzonych z wyników ciągłych pomiarów parametrów opisujących czujnika. Maksymalna wartość zmian parametrów impedancji stosowanych pętli indukcyjnych nie przekracza kilku procent ich wartości nominalnych i zależy ona m.in. od wymiarów pętli, liczby zwojów, częstotliwości zasilania oraz od właściwości obiektu - pojazdu.

Zazwyczaj do modelowania parametrów czujnika indukcyjnego pętlowego stosuje się szeregowy model impedancji ($Z=R+jX$). Zmiany mierzonych parametrów impedancji czujnika, zarówno w składowej R jak i X , podczas obecności pojazdu w jego polu, można wyjaśnić w oparciu o dwa zjawiska polowe [6].

Pierwsze zjawisko to indukowanie prądów wirowych w metalowych elementach pojazdu będących w zasięgu pola czujnika. Prądy wirowe wytwarzają swój własny strumień magnetyczny skierowany przeciwnie do strumienia pierwotnego czujnika, osłabiając go. W konsekwencji prowadzi to do zmniejszenia wartości średniej energii zgromadzonej w polu magnetycznym czujnika. Zjawisko prądów wirowych skutkuje zmniejszeniem wartości obserwowanej reaktancji czujnika. Efektem płynących w metalowym obiekcie prądów wirowych jest zwiększenie strat mocy czynnej, widocznych jako wzrost wartości składowej R impedancji czujnika.

Drugie zjawisko wynika z faktu, że niektóre elementy pojazdu działają jak rdzeń ferromagnetyczny. Zjawisko to powoduje lokalny wzrost strumienia skojarzonego, a tym samym powoduje wzrost średniej energii gromadzonej w polu magnetycznym. Zjawisko to obserwowane jest jako wzrost mierzonej reaktancji czujnika indukcyjnego

pętlowego w polu którego znajdzie się obiekt ferromagnetyczny.

Podczas przejazdu pojazdu przez pole czujnika oba zjawiska zachodzą jednocześnie. W zależności od kształtu elementów podwozia pojazdu, ich odległości od czujnika, konstrukcji, właściwości zastosowanych metali, zachodzące zjawiska różnią się intensywnością.

Ze względu na niewielkie zmiany parametrów impedancji czujnika, stosowane są dedykowane układy kondycjonowania mające za zadanie przetwarzać przyrosty impedancji na analogowy sygnał napięciowy.

Układy kondycjonowania sygnału czujnika indukcyjnego pętlowego budowane są najczęściej w oparciu o strukturę generatora lub mostka prądu przemiennego [7]. Obie te aplikacje nie umożliwiają niezależnego pomiaru składowych impedancji czujnika i uzyskuje się na ich wyjściu jeden sygnał nazywany profilem magnetycznym [2].

Mając na uwadze, iż profil magnetyczny to jeden sygnał, w którym nieodwracalnie, sprzętowo, łączone są dwie pierwotne informacje (o zmianie wartości rezystancji i reaktancji) opisujące parametry czujnika, podjęto badania i prace konstrukcyjne nad układami kondycjonowania z rozdziałem składowych impedancji [6, 8, 9, 10]. Układy kondycjonowania z rozdziałem składowych impedancji posiadają dwa wyjścia sygnałowe; na jednym dostępny jest profil magnetyczny związany ze zmianą rezystancji czujnika, na drugim profil magnetyczny związany ze zmianą reaktancji czujnika indukcyjnego pętlowego. Sygnały dostępne na tych wyjściach nazywane są odpowiednio magnetycznym profilem rezystancji i magnetycznym profilem reaktancji (profil R i profil X) [6].

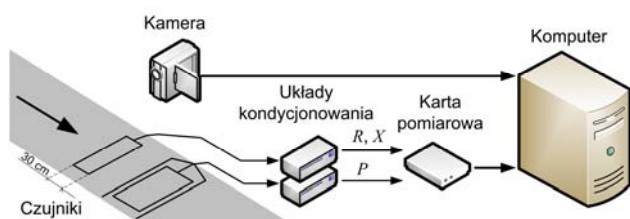
Zaprojektowane układy kondycjonowania pozwalają na niezależne wykorzystywanie każdego z profili lub na ich łączenie (fuzję). Oznacza to, że układ taki może zastąpić dowolny stosowany dotychczas układ kondycjonowania oraz zapewnić dotychczasowe właściwości zastępowanego układu. Jednocześnie umożliwia wydobywanie nowych informacji o pojeździe, poprzez interpretację profili w odniesieniu do zachodzących zjawisk fizycznych (prądy wirowe i efekt ferromagnetyczny). Pozwala to z kolei wnioskować o parametrach konstrukcyjnych (np. obecność płaskiej blachy o dużej stratności wiroprądowej) lub

materiałowych pojazdu (detekcja obecności elementów ferromagnetycznych, np. stalowych drutów obecnych w opasaniu opon bezdętkowych), co daje możliwość detekcji osi pojazdów, również osi podniesionych w pojazdach ciężarowych [6].

Wykorzystanie profili R i X pojazdów w różnych lokalizacjach sieci drogowej stwarza możliwość bardziej efektywnej identyfikacji (klasyfikacji) i reidentyfikacji [11] pojazdów lub grup pojazdów. Skuteczna reidentyfikacja pozwala określać wybrane globalne parametry ruchu drogowego takie jak np. czas podróży. Warto nadmienić, że obecnie określanie czasu podróży realizuje się najczęściej przez rozwiązania wizyjne (kamery) lub też systemy wykrywające użytkowników telefonów komórkowych z wykorzystaniem systemu GPS (rejestrwanie lokalizacji użytkownika), które coraz częściej nie są społecznie akceptowane ze względu na możliwość identyfikacji i śledzenie ich posiadaczy.

Stanowisko pomiarowe

Profile R i X pojazdów rejestrowano za pomocą wielokanałowego systemu zainstalowanego na terenowym stanowisku pomiarowym, zlokalizowanym na drodze krajowej nr 81. Stanowisko badawcze wyposażone jest w zestaw czujników indukcyjnych pętlowych oraz w piezoelektryczne czujniki nacisku umożliwiające detekcję osi pojazdu. Strukturę systemu pomiarowego przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska do automatycznej rejestracji profili pojazdów (R , X – profile składowych impedancji, P – sygnał z czujników piezoelektrycznych)

Do zainstalowanych w jezdni czujników przyłączona jest aparatura: układy kondycjonowania, karta pomiarowa i komputer. W skład systemu wchodzi również kamera, dzięki której oprócz sygnałów uzyskiwanych z układów kondycjonowania, rejestrowany jest film dokumentujący przejazd pojazdu przez stanowisko pomiarowe.

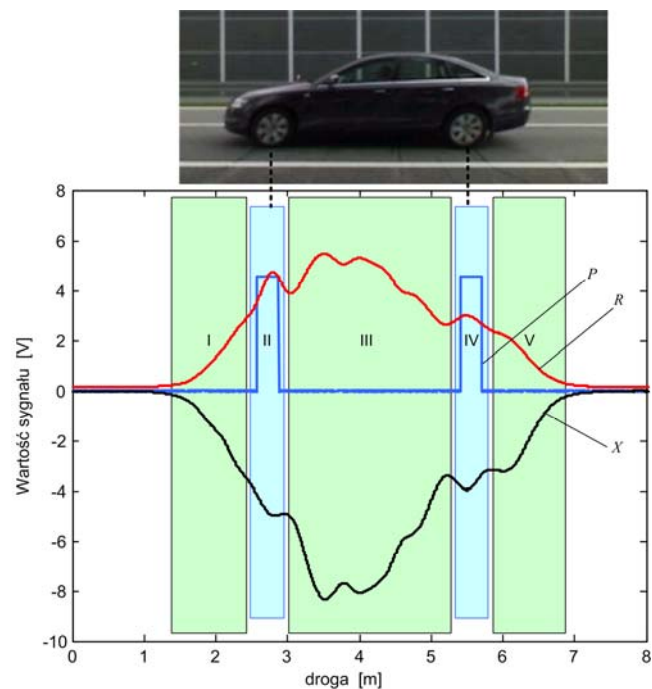
System zaprojektowano w taki sposób, aby możliwa była automatyczna, ciągła rejestracja sygnałów reprezentujących przejeżdżające pojazdy. Pozwoliło to na zbudowanie bazy danych profili różnych pojazdów. Użytkownik bazy danych, na podstawie obrazu wideo, może w dowolnej chwili sprawdzić typ pojazdu czy też ścieżkę przejazdu przez stanowisko pomiarowe i dzięki temu zweryfikować poprawność pozyskanej z profilu informacji na temat cech pojazdu.

Przeprowadzono analizę zarejestrowanych profili R i X pozyskanych z czujnika indukcyjnego pętlowego o wymiarze 30 cm w kierunku ruchu pojazdu i 2 m w kierunku prostopadłym do kierunku jazdy. Na podstawie sygnałów z dwóch piezoelektrycznych detektorów osi wyznaczono prędkość pojazdów. Dzięki temu profile przedstawiono na rysunkach w dziedzinie drogi i zestawiono z sygnałem obecności osi pojazdu oraz zdjęciami analizowanych pojazdów. Podczas analizy brano pod uwagę artefakty występujące w sygnałach profili i ich powiązanie z konstrukcją pojazdów, od których pochodziły oraz zjawiskami fizycznymi zachodzącymi w czasie

oddziaływania pojazdu na czujnik. Szczególnie interesujące obszary profili i ich charakterystyczne artefakty zostały oznaczone i kolejno ponumerowane.

Analiza profili

Profile R i X przykładowego pojazdu osobowego przedstawiono na rysunku 2. Pojazd będąc w polu czujnika spowodował wzrost rezystancji (profil oznaczony jako R) i spadek reaktancji (profil oznaczony jako X). Dwustanowy sygnał (P), uzyskano z udziałem czujnika piezoelektrycznego służącego do detekcji osi pojazdu.

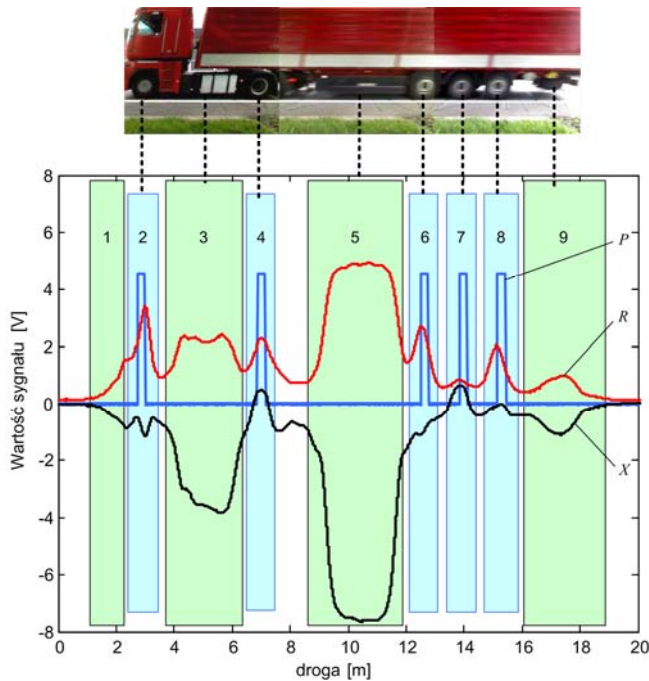


Rys. 2. Profile magnetyczne R i X pojazdu osobowego z wyróżnionymi charakterystycznymi obszarami (I-V)

Artefakty profili w obszarze I i V pochodzą od tzw. zwisów przedniego i tylnego pojazdu, natomiast artefakt w obszarze III od płaskiej części podwozia o największej powierzchni, znajdującego się między osiami pojazdu. Te fragmenty profili są efektem generowania prądów wirowych w płaskich, powierzchniowo dużych obszarach podwozia. Artefakty widoczne w obszarze II i IV pochodzą od kół pojazdu, o czym również świadczy sygnał P pochodzący z piezoelektrycznego czujnika nacisku. Z informacji zawartej w profilu X w obszarach II i IV, wnioskować można, że pojazd wyposażony jest w felgi aluminiowe, ponieważ widać lokalne obniżenie wartości reaktancji, co jest wynikiem wzmożonego działania prądów wirowych (szczególnie dobrze widoczne w obszarze IV). Gdyby felgi pojazdu były wykonane ze stali, zadziałałby również efekt rdzeniowy i pojawiłby się lokalny wzrost reaktancji.

Podobną analizę przeprowadzono dla pięciosiowego pojazdu ciężarowego (dwuosiovy ciągnik z trzyosiową naczepą) o konstrukcji podwozia diametralnie różnej od poprzedniego pojazdu. Na rysunku 3 przedstawiono profile R i X tego pojazdu zestawione z jego obrazem. Na zdjęciu zauważyć można charakterystyczną skrzynię o dużej powierzchni podwieszoną pomiędzy drugą a trzecią osią pojazdu. Skrzynia wykonana jest z blachy, w której silnie indukują się prądy wirowe, co powoduje znaczące zmniejszenie wartości indukcyjności czujnika i wzrost jego rezystancji. Efekt ten zaobserwować można w obszarze 5. Jest to element najbardziej dominujący w profilach R i X reprezentujących konstrukcję podwozia tego pojazdu, które

jest usytuowane stosunkowo wysoko nad powierzchnią jezdni. Inne elementy podwozia tego pojazdu oddziałując na czujnik dają sygnały o mniejszych wartościach niż w przypadku pojazdu osobowego. Jest to też cecha istotna w przypadku klasyfikacji pojazdu z wykorzystaniem jego profili. Podobny efekt widać również w obszarze 3 i pochodzi on od zbiornika paliwa, usytuowanego między pierwszą i drugą osią pojazdu. Obserwując te dwa obszary można wnioskować, że powierzchnia zbiornika paliwa jest znacznie mniejsza niż powierzchnia skrzyni.



Rys. 3. Profile magnetyczne R i X pojazdu ciężarowego z wyróżnionymi rozpatrywanymi obszarami 1-9

W obszarach 2, 4, 6, 7, 8 widoczne są (szczególnie w zestawieniu z sygnałem P) artefakty pochodzące od kół pojazdu. Analizując te artefakty obserwujemy wzrost zarówno rezystancji, jak i reaktancji czujnika. Można stąd wnioskować, że felgi pojazdu są stalowe i w przypadku reaktancji przeważa efekt rdzeniowy (kolejna informacja, która może być użyteczna w procesie klasyfikacji, a nawet identyfikacji konkretnego pojazdu). W obszarach 1 i 9 widoczny jest wpływ nisko zamontowanych zderzaków pojazdu. W sygnale profilu X widać również ciekawy efekt w miejscu, w którym powinien być artefakt od osi trzeciej. Artefakt ten nie pojawił się w profilu X ponieważ bliskość skrzyni spowodowała zrównoważenie się efektów: rdzeniowego od koła i prądów wirowych generowanych w skrzyni. Warto podkreślić, że dzięki obserwacji sygnałów odpowiadających rozdzielonym składowym impedancji, obecność tego koła można wykryć dzięki profilowi R .

Fuzja profili w celu ekstrakcji informacji o pojeździe

Przeprowadzona interpretacja profili magnetycznych pojazdu wskazuje na duży potencjał informacyjny jaki zawierają. Oczywiście przeprowadzona analiza była ułatwiona, dzięki dodatkowemu sygnałowi pochodzącemu z piezoelektrycznego czujnika nacisku. W większości przypadków taki sygnał jest niedostępny i informacje należy pozyskać tylko z profili pojazdu.

Poszukiwane są zazwyczaj informacje o obecności pojazdu w strefie pomiaru, długości pojazdu, liczbie jego osi i odległościach między osiami. Na podstawie

przedstawionych profili (rys. 2 i 3) widać, że detekcja pojazdu jest możliwa na podstawie praktycznie każdego z profili. Problem byłby natomiast z pomiarem długości pojazdu. Profil związany ze zmianami reaktancji czujnika (najczęściej wykorzystywany) dla pojazdu ciężarowego kilkakrotnie zmienia znak. Zastosowanie komparatora z ustawionym na stałe progiem detekcji i pomiar czasu trwania sygnału na wyjściu komparatora nie będzie w tym przypadku miarą długości pojazdu.

Zaletą zastosowania układu kondycjonowania z rozdzielaniem składowych impedancji czujnika jest pozyskanie dwóch komplementarnych sygnałów, które mogą być potem złożone zgodnie z wybranym algorytmem. Możliwa jest więc fuzja profili przeprowadzona tak, aby wydobywać z nich pożądane informacje. We wcześniej stosowanych układach kondycjonowania fuzja ta realizowana była na drodze układowej, z przyjętymi na stałe parametrami układu [12-15].

Pozyskanie informacji o obecności pojazdu w strefie pomiaru i o jego długości można zrealizować wyznaczając moduł impedancji (1) na podstawie uzyskanych profili R i X .

$$(1) \quad Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

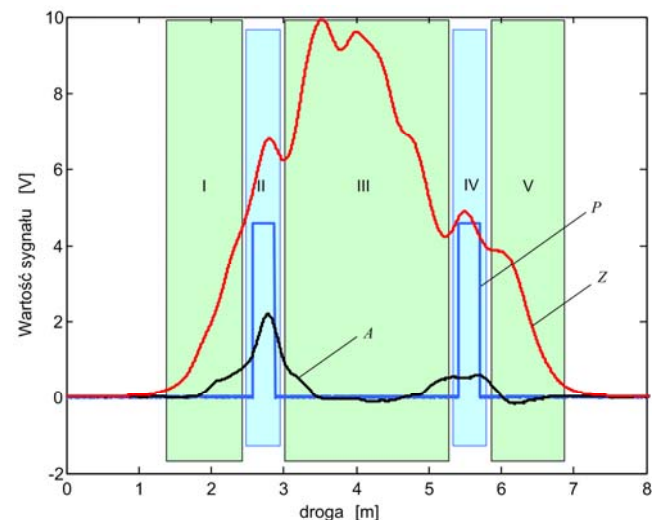
Tak uzyskane nowe sygnały (Z) dla analizowanych pojazdów przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Sygnały te porównane z zadanym stałym progiem pozwalają na jednoznaczną detekcję obecności i pomiar długości pojazdu przy znajomości jego prędkości, która może być mierzona z wykorzystaniem układu dwóch pętli [2].

W uzyskanych sygnałach widoczne są również artefakty związane z występowaniem osi pojazdu (szczególnie dobrze widoczne w zestawieniu z sygnałem z czujnika nacisku P). Pozyskanie takiej informacji z samego profilu Z jest trudne i często niejednoznaczne.

Mając jednak do dyspozycji składowe R i X , można zrealizować ich fuzję polegającą na zastosowaniu np. ważonej sumy (2).

$$(2) \quad A = k R + X$$

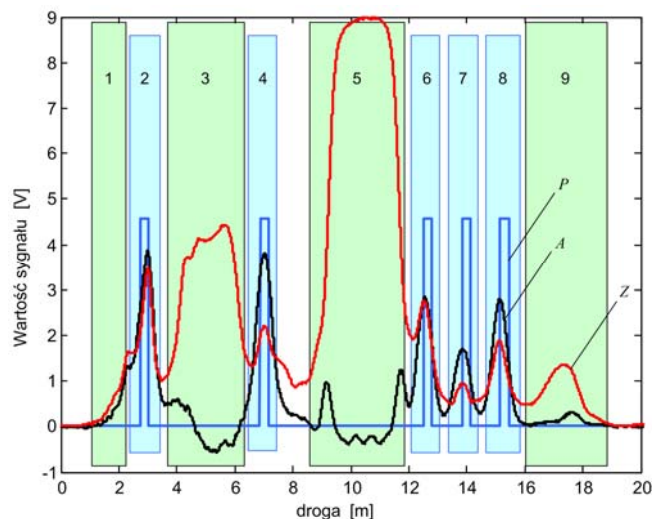
Wartość współczynnika k dobierana jest empirycznie [16] na podstawie analiz wielu profili różnych pojazdów i jest różna dla różnych ich klas (które wstępnie muszą zostać określone np. na podstawie długości pojazdu).



Rys. 4. Wyniki fuzji profili R i X : Z - profil modułu impedancji (1), A - ważona suma (2) profili pojazdu osobowego (dla $k=1,55$)

Efekt zastosowanej fuzji (2) pokazuje możliwość redukcji części artefaktów pochodzących od dużych płaskich powierzchni podwozia i dodatkowo uwypukla artefakty związane z osiami pojazdu. Są to obszary II i IV na rys. 4 (dla pojazdu osobowego) oraz obszary 2, 4, 6, 7, 8 na rysunku 5 dla pojazdu ciężarowego.

Biorąc łącznie pod uwagę sygnały Z i A możliwe jest geometryczne usytuowanie położenia osi w bryle pojazdu. Równoczesna obserwacja położenia uzyskanych w ten sposób osi pojazdu i profilu X pozwala na określenie materiału, z którego zbudowane są felgi pojazdu (aluminium, stal).



Rys. 5. Rezultaty fuzji profili R i X: Z - profil modułu impedancji (1), A - ważona suma profil pojazdu ciężarowego (2) dla $k = 1,53$

Charakterystyczne impulsy w obszarze 5 (sygnał A na rysunku 5) świadczą o ferromagnetycznych właściwościach materiału zastosowanego w konstrukcji skrzyni. Na krawędziach obiektu przeważa efekt ferromagnetyczny (rdzeniowy), a w środkowej części obszaru 5 efekt prądów wirowych.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono metodę wykorzystania profili R i X pochodzących z trzydziestocentymetrowego czujnika indukcyjnego pętlowego. Dokonano analizy sygnałów i powiązano kształt tych sygnałów z konstrukcją mechaniczną pojazdów, od których pochodzą oraz ze zjawiskami fizycznymi zachodzącymi w trakcie oddziaływania pola magnetycznego czujnika z elementami konstrukcyjnymi tych pojazdów. Profile R i X niosą znacznie więcej informacji niż sygnały uzyskiwane w stosowanych dotychczas układach kondycjonowania z jednym (proporcjonalnym do zmian reaktancji czujnika) sygnałem wyjściowym.

Propozycja niezależnego wykorzystania każdej składowej lub odpowiednie ich łączenie (fuzja) pozwala wyekstrahować artefakty związane z konkretnymi elementami konstrukcyjnymi pojazdów, a w konsekwencji określić takie ich parametry jak np. długość pojazdu, liczba i odległości między osiami, występowanie charakterystycznych płaskich powierzchni, identyfikację materiału, z którego zbudowane jest podwozie, np. skrzynia czy felgi kół pojazdu.

Prowadzi to do charakterystycznego dla danego pojazdu zbioru jego cech. Pozwala to w dalszej kolejności na poprawną jego identyfikację w strumieniu pojazdów konkretnego typu lub egzemplarza i ewentualną klasyfikację.

Autorzy: dr inż. Zbigniew Marszałek, E-mail: antic@agh.edu.pl, dr hab. inż. Ryszard Sroka, E-mail: ryszard.sroka@agh.edu.pl, dr inż. Tadeusz Żegleń, E-mail: tezet@agh.edu.pl, dr inż. Marek Stencel, E-mail: masten@agh.edu.pl, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Katedra Metrologii i Elektroniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków.

LITERATURA

- [1] Klein, L. A.: *Sensor Technologies and Data Requirements for ITS*, Artech House, (2001).
- [2] Gajda J., Sroka R., Stencel M., Burnos P., Żegleń T., Piwowar P., Marszałek Z.: *Pomiary parametrów ruchu drogowego*, Wyd. PWN, Warszawa (2015).
- [3] Ali S.S.M., George B., Vanajakshi L.: *An Efficient Multiple-Loop Sensor Configuration Applicable for Undisciplined Traffic*. IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems. vol. 14, no. 3, (2013), pp. 1151-1161.
- [4] Ali S.S.M., George B., Vanajakshi L., Venkatraman J.: *A Multiple Inductive Loop Vehicle Detection System for Heterogeneous and Lane-Less Traffic*, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, vol. 61, no. 5, (2012), pp. 1353-1360.
- [5] Klein L. A., Mills M.K., Gibson D.R.P.: *Traffic Detector Handbook*, Third Edition, vol. 1, Raport no. FHWA-HRT-06-108, (2006)
- [6] Marszałek Z., *Analiza właściwości metrologicznych układów do detekcji osi pojazdów z wykorzystaniem czujników indukcyjnych pętlowych*, Praca doktorska, AGH w Krakowie, (2014).
- [7] Anderson R., Electromagnetic loop vehicle detectors, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 19 (1970), n.1, 23-30.
- [8] Marszałek Z., *Sposób pomiaru składowych impedancji czujnika indukcyjnego i układ pomiarowy składowych impedancji czujnika indukcyjnego*, Patent, PL 218 944 B1, (2010).
- [9] Marszałek Z., Sroka R., Stencel M., A new method of inductive sensor impedance measurement applied to the identification of vehicle parameters, *Metrology and Measurement Systems*, (2011), 69-76.
- [10] Żegleń T., Badania symulacyjne i eksperymentalne układu kondycjonowania sygnału czujnika indukcyjnościowego do detekcji obiektów metalowych, *Materiały XVIII Sympozjum: MiSSP*, (2011), 49-57.
- [11] Oh C., Ritchie S.G., Recognizing vehicle classification information from blade sensor signature, *Pattern Recogn. Lett.*, 28 (2007), n.9, 1041-1049.
- [12] Stanczyk D., *Device to Detect Particularly One or Several Wheels of a Vehicle or of a Wheeled Mobile Engine and Process for Using this Device*, US Patent (1997).
- [13] Lees R. H., *Inductive loop sensor for traffic detection, and traffic monitoring apparatus and method using such a loop sensor*, US Patent (2002).
- [14] Gajda J., Piwowar P., Sroka R., Stencel M., Żegleń T., Application of inductive loops as wheel detectors, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, (2012), 57-66.
- [15] Gajda J., Sroka R., Stencel M., Żegleń T., Piwowar P., Burnos P., *Układ elektryczny do detekcji osi pojazdów samochodowych*, Patent PL387374A1, (2010).
- [16] Marszałek Z., Sroka R., Żegleń T.: Inductive Loop for Vehicle Axle Detection from First Concepts to the System Based on Changes in the Sensor Impedance Components, 20th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), (2015), 765-769.