

II Sympozjum

AKTUALNE PROBLEMY W METROLOGII' 2013

Katedra Metrologii i Systemów Informatycznych Politechniki Gdańskiej

DETEKCJA OSI POJAZDÓW Z UŻYCIEM PĘTLI INDUKCYJNEJ

Zbigniew MARSZAŁEK

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Metrologii i Elektroniki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel.: +4812-617-5049, e-mail: antic@agh.edu.pl

Streszczenie: Aktualnie stosowane rozwiązania, umożliwiające detekcję osi pojazdów samochodowych, bazują na mechanicznych czujnikach nacisku, po których przejeżdża pojazd. Powszechnie stosowane są czujniki piezoelektryczne, lub o wiele droższe, kwarcowe, umożliwiające poza detekcją osi, ważenie pojazdów w ruchu (WIM). Tam, gdzie nie jest wymagana informacja o masie pojazdu, a wymagana jest klasyfikacja pojazdów ze względu na liczbę osi, drogie systemy WIM nie są konieczne. Nie zawsze sprawdzają się w stu procentach, ponieważ samochody ciężarowe mogą podnosić przynajmniej jedną oś. Systemy bazujące na pętli indukcyjnej, dzięki innej zasadzie działania, pozwalają na detekcję również podniesionych osi, przez co możliwa jest poprawna klasyfikacja pojazdów ciężarowych. Pętle indukcyjne charakteryzują się bardzo dużą trwałością oraz prostą budową. Czas ich eksploatacji wielokrotnie przekracza czas eksploatacji stosowanych detektorów. Pętle indukcyjne do detekcji osi pojazdów wymagają stosowania bardzo czułych układów kondycjonowania.

Słowa kluczowe: czujnik indukcyjny pętlowy, detekcja osi pojazdów, magnetyczny profil rezystancji, magnetyczny profil reakcji

1. WSTĘP

Badania dotyczące układów i metod pomiarów parametrów pojazdów będących w ruchu prowadzone są w wielu ośrodkach naukowych na świecie, a od kilkunastu lat również i w Katedrze Metrologii i Elektroniki AGH [1]. Jednym z ważniejszych parametrów podlegających wspomnianym pomiarom jest liczba osi, będąca podstawą wielu schematów klasyfikacji pojazdów, np FHWA [2]. Zwykle pomiar liczby osi realizowany jest w oparciu o wbudowane w jezdnię czujniki nacisku [3]. Rozwiązanie to aczkolwiek skuteczne (za wyjątkiem podniesionych osi pojazdów ciężarowych) jest rozwiązaniem droгим i wymagającym dużej ingerencji w nawierzchnię drogi. Podstawową funkcją systemów pomiaru ruchu drogowego jest automatyczna klasyfikacja pojazdów [4].

Dotychczas, rzadko stosuje się metody wykorzystujące pętle indukcyjne do detekcji osi pojazdów, natomiast były prowadzone prace badawcze w tym kierunku [5], powstały też patenty [6], [7], [8].

Opis zgłoszenia patentowego [9] oraz praca [10] przedstawiają nową metodę i układ pomiaru składowych impedancji czujnika indukcyjnego. Układ umożliwia pomiar szybko zmieniających się, w małym zakresie, parametrów

impedancji, na tle ich dużych, nominalnych wartości. Przez to może zostać wykorzystany do współpracy z czujnikami indukcyjnymi pętlowymi do detekcji osi pojazdów.

W artykule [11] przedstawiono opis nowej metody kondycjonowania sygnału czujnika indukcyjnego, który umożliwia niezależny pomiar zmian składowych jego impedancji. Przedstawiono propozycję analogowego układu elektronicznego realizującego metodę oraz wyniki podstawowych badań symulacyjnych uproszczonego modelu tego układu i wyniki badań eksperymentalnych.

Korzyści wynikające z zastosowania pętli indukcyjnej do detekcji osi pojazdów, zasadę działania czujnika, przegląd patentów i osiągnięć innych autorów, zostały obszernie przedstawione w pracy [1]. Natomiast w niniejszej pracy skoncentrowano się na przedstawieniu problemów utrudniających użycie czujników indukcyjnych pętlowych do detekcji osi pojazdów.

2. PROFIL MAGNETYCZNY

Często spotykanym pojęciem w pomiarach parametrów ruchu drogowego jest „profil magnetyczny” nazywany również „podpisem magnetycznym”. Jest on ściśle związany z wykorzystaniem czujników indukcyjnych pętlowych i rejestrowany na wyjściu układu kondycjonowania. Profil magnetyczny w sensie ogólnym jest to sygnał napięciowy przedstawiony w funkcji czasu lub drogi przebytej przez pojazd, obrazujący wynik interakcji pojazdu z polem czujnika. Pojazd przejeżdżając nad pętlą indukcyjną zmienia rozkład pola magnetycznego generowanego przez czujnik. Zmiana rozkładu pola sprawia, że obwodowe parametry zastępcze pętli indukcyjnej zmieniają się. Zmiana tych parametrów powoduje w układzie kondycjonowania pojawienie się sygnału elektrycznego, zależnego od wartości przyrostów wspomnianych parametrów i zasady działania układu kondycjonowania. W przypadku układów kondycjonowania, w których czujnik włączony jest w obwód rezonansowy generatora, profil magnetyczny jest to sygnał wynikający ze zmian jego częstotliwości rezonansowej, natomiast w przypadku układów kondycjonowania z mostkiem zmiennoprądowym profil magnetyczny jest przetworzonym napięciem nierównowagi mostka [10]. Czyli, profilem magnetycznym M , można nazwać sygnał powstający w wyniku działania pewnej funkcji F przetwarzającej sygnały R , i X :

$$M_{\sim} = F(R_{\sim}, X_{\sim}) \quad (1)$$

gdzie: R_{\sim} – magnetyczny profil rezystancji,
 X_{\sim} – magnetyczny profil reaktancji.

Układy kondycjonowania nowej generacji pozwalają uzyskiwać profile R_{\sim} i X_{\sim} [10, 11].

2.1. Magnetyczny profil rezystancji

Magnetyczny profil rezystancji R_{\sim} [10] to sygnał mierzonych zmiennoprądowo (stosuje się częstotliwości od 4 do 100 kHz) przyrostów rezystancji czujnika indukcyjnego pętlowego w czasie obecności pojazdu w jego polu. Profil R_{\sim} może być uzyskany przy użyciu urządzenia do pomiaru składowych impedancji (np. miernika LCR [13]) i wtedy jest przedstawiony w $[\Omega]$, natomiast w ten sposób nazywa się również sygnał napięciowy uzyskany z układu kondycjonowania nowej generacji [10, 11] i wówczas jest przedstawiony w [V]. Gdy znane jest położenie pojazdu względem czujnika lub gdy znana jest prędkość przejeżdżającego pojazdu, profil R_{\sim} może być przedstawiony w funkcji drogi x przebytej przez pojazd, przy założeniu stałej prędkości przejazdu pojazdu w polu czujnika.

Zmiany mierzonej zmiennoprądowo rezystancji (w modelu szeregowym RX) wynikają z dodatkowych strat mocy czynnej podczas przepływu prądów wirowych indukujących się w elementach metalowych pojazdu, które nie występują podczas braku obecności pojazdu w polu pętli indukcyjnej. Dlatego przyrosty wartości w profilu R_{\sim} (od obecności pojazdu) przyjmują wartości dodatnie (np. rys. 3).

2.2. Magnetyczny profil reaktancji

Magnetyczny profil reaktancji X_{\sim} to sygnał mierzonych zmian reaktancji indukcyjnej (lub indukcyjności L_{\sim}) pętli indukcyjnej w czasie obecności pojazdu w jej polu. Profil X_{\sim} uzyskany z udziałem urządzenia do pomiaru impedancji przedstawiony może być w $[\Omega]$, (lub w [H] gdy mierzona jest indukcyjność), natomiast uzyskany z układów kondycjonowania nowej generacji przedstawiany jest w [V] w funkcji czasu lub drogi przebytej w tym czasie przez pojazd w polu czujnika. Na wyjściu układów kondycjonowania, dla braku pojazdu w polu czujnika, napięcie jest bliskie zeru.

3. CZUŁOŚĆ PĘTLI INDUKCYJNYCH

3.1. Przyjęta definicja czułości

Czułość czujników indukcyjnych pętlowych określa się zazwyczaj jedynie dla indukcyjności jako iloraz przyrostu wartości indukcyjności spowodowanego obiektem metalowym i wartości nominalnej indukcyjności czujnika bez obiektu metalowego. Czułość dla rezystancji jest zwykle pomijana przez innych autorów prowadzących podobne badania [12] co wynika z konstrukcji stosowanych przez nich układów kondycjonowania. Natomiast w tej pracy określono czułość osobno dla rezystancji i reaktancji jako:

$$S_R = \frac{\Delta R}{R_N} 100 [\%] \quad (2)$$

$$S_X = \frac{\Delta X}{X_N} 100 [\%] \quad (3)$$

gdzie:

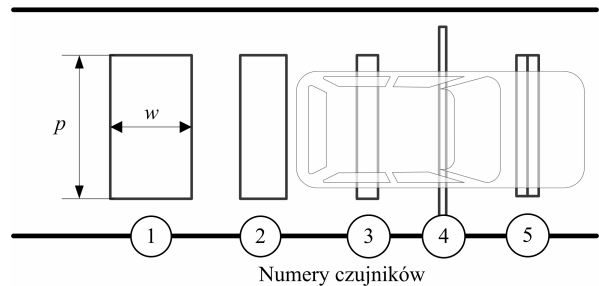
$$\Delta R = \max(R_{\sim}) - \min(R_{\sim}) \quad (4)$$

$$\Delta X = \max(X_{\sim}) - \min(X_{\sim}) \quad (5)$$

Natomiast R_N i X_N to nominalne wartości odpowiednio rezystancji i reaktancji czujnika indukcyjnego pętlowego zmierzone bez pojazdu.

3.2. Stanowisko z pętlami indukcyjnymi

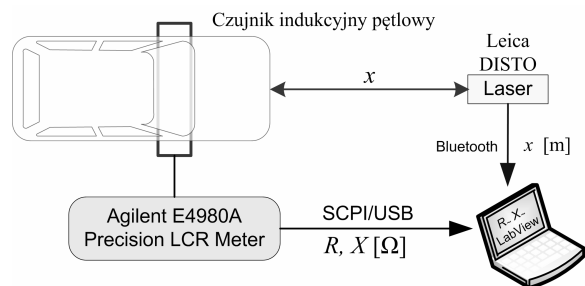
Stanowisko badawcze z zainstalowanymi czujnikami indukcyjnymi pętlowymi, będące w dyspozycji Katedry Metrologii i Elektroniki AGH przedstawiono na rysunku 1. Wymiary czujników zestawiono w tabeli 1, przy czym wymiar w to długość czujnika wzdłuż pasa ruchu, natomiast wymiar p to szerokość czujnika w poprzek jezdni.



Rys. 1. Stanowisko badawcze z pętlami indukcyjnymi

3.3. System pomiarowy

W celu zbadania czułości pętli indukcyjnych (rys. 1), oraz ich zdolności do detekcji osi pojazdów zbudowano system pomiarowy, którego schemat blokowy przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Schemat blokowy systemu pomiarowego

W skład systemu wchodzi: miernik LCR Agilent E4980A [13], dalmierz laserowy Leica DISTO [14] z komunikacją przez Bluetooth oraz komputer. Oprogramowanie sterujące i obsługujące komunikację z urządzeniami napisano w środowisku LabView.

W tak skonstruowanym systemie możliwa jest jednoczesna rejestracja odległości x samochodu od umownego miejsca ustawienia dalmierza laserowego i parametrów impedancji czujnika. Pojazd był pozycjonowany ręcznie przy wyłączonym silniku, a jego prędkość w trakcie pomiarów impedancji była zerowa, ponieważ zastosowany miernik LCR może realizować maksymalnie kilka pomiarów na sekundę. Pomiar parametrów impedancji miernikiem LCR [13] wykonano przy częstotliwości 15,8 kHz. Przyjęta wartość wynikała ze środkowej wartości częstotliwości zastosowanych w układach kondycjonowania nowej generacji [11] podczas rejestracji długoterminowych w warunkach rzeczywistego ruchu drogowego.

Uzyskane z zależności (2) i (3) czułości dla poszczególnych czujników indukcyjnych pętlowych

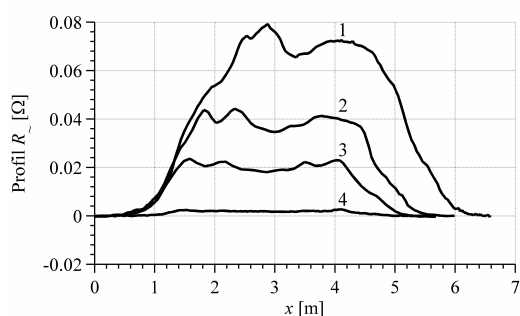
zestawiono w tablicy 1, natomiast profile R_{-} i X_{-} pokazano na rysunkach 3 i 4. Profile zostały przedstawione w funkcji drogi x , mierzonej od przodu pojazdu (rys. 2) i przebytej przez pojazd od umownego punktu początkowego mieszczącego się w odległości poza obszarem działania pola czujnika. W praktyce punkt początkowy znajdował się około 1 metr od przedniej (najazdowej) krawędzi pętli indukcyjnej.

Tablica 1. Wymiary i czułość badanych pętli indukcyjnych

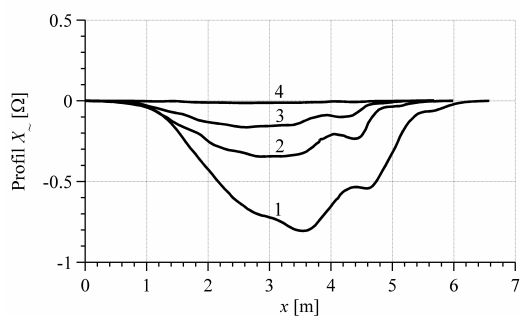
Nr czujnika	w [m]	p [m]	S_R [%]	S_X [%]
1	1	2	7,3	6,36
2	0,5	2	4,3	3,6
3	0,3	2	2,4	1,9
4	0,1	3,2	0,34	0,15
5	0,15×2	2	0,31	0,11

Ze względu na to, że wyznaczone czułości czujników uzyskano dla jednego pojazdu, trzeba traktować je orientacyjnie. Można natomiast porównywać uzyskane czułości między sobą. Czułość pętli indukcyjnej nr 1 dla reaktancji jest 40-krotnie większa od czułości czujnika nr 4.

Zestawienie czułości (tab. 1) pokazuje również skalę trudności budowy układów kondycjonowania mających współpracować z danym czujnikiem. Ze względu na czułość o wiele trudniej zbudować pracujący stabilnie układ współpracujący z czujnikiem nr 4 niż z czujnikiem nr 3.



Rys. 3. Profile R_{-} uzyskane z pętli indukcyjnych nr 1, 2, 3, 4



Rys. 4. Profile X_{-} uzyskane z pętli indukcyjnych nr 1, 2, 3, 4

Czujniki nr 1, 2, 3 nie nadają się do detekcji osi pojazdów, ponieważ nie dostarczają one jednoznacznej informacji o osiach pojazdów (zwłaszcza osobowych).

Na rysunku 5 pokazano profile R_{-} i X_{-} pojazdu osobowego z czujnika prostokątnego nr 4. Jest to, biorąc pod uwagę stosunek wymiarów w i p , wąski czujnik. Uzyskany profil X_{-} charakteryzuje się występowaniem widocznych impulsów pochodzących od kół. Jest to związane z efektem ferromagnetycznym od opasania stalowego w oponie.

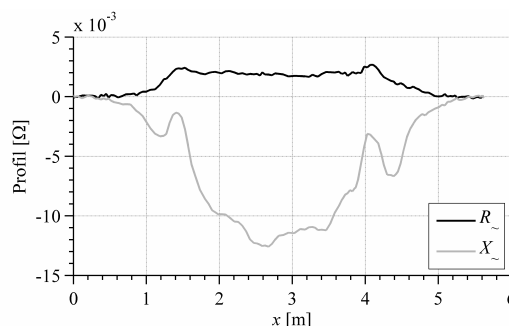
Impulsy te powstają wówczas, gdy koła znajdują się na środku wąskiego czujnika pętlowego.

Ekstrakcja informacji o osiach pojazdu polega na ważonym sumowaniu wartości profili R_{-} i X_{-} wg zależności

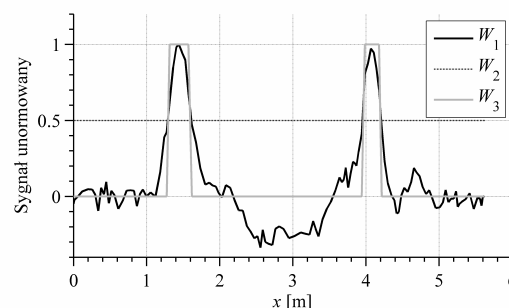
$$W_1 = a R_{-} + X_{-} \quad (6)$$

Współczynnik a dobierany jest tak, aby uzyskać wyraźne, dodatnie impulsy w sygnale W_1 pochodzące od kół, przy jednoczesnym zniesieniu się (zrównoważeniu) informacji od płaskich elementów podwozia pojazdu. Początkowo eksperymentalnie dobierano wartość współczynnika a [11]. Kolejno opracowano algorytm automatycznego doboru tej wartości. Opis tego algorytmu wykracza jednak poza ramy niniejszej pracy. Na rysunku 6 pokazano sygnał W_1 , wyznaczony z zależności (6) (dla $a=5$), który został dodatkowo unormowany do 1 (wszystkie wartości sygnału zostały podzielone przez wcześniej znaną wartość maksymalną). Sygnał ten został poddany działaniu komparatora o poziomie odniesienia W_2 . W tym przypadku uzyskano pozytywny efekt detekcji osi pojazdu (sygnał cyfrowy W_3) dla wartości $W_2 = 0,5$.

Wartość poziomu odniesienia komparatora oraz szerokość jego pętli histerezy ma wpływ na skuteczność detekcji osi pojazdów. Z wykonanych badań, którym poddano 4000 zestawów profili R_{-} i X_{-} pojazdów należących do różnych klas wynika, że w celu uzyskania dużej skuteczności detekcji osi pojazdów, poziom odniesienia W_2 oraz wartość współczynnika a nie mogą być ustawione na stałym poziomie. Należy je dobierać dynamicznie, co jest podstawowym problemem przetwarzania tych sygnałów.



Rys. 5. Profile R_{-} i X_{-} pojazdu osobowego uzyskane z systemu pomiarowego z czujnikiem wąskim nr 4



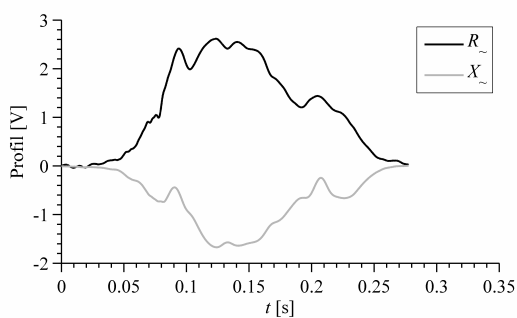
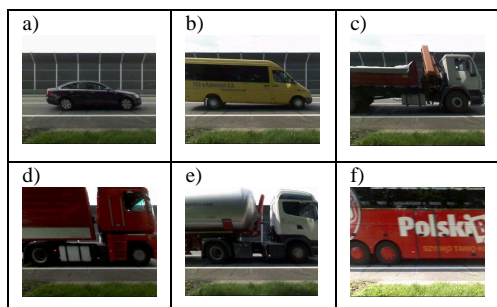
Rys. 6. Wydobyte informacje o osiach pojazdu na podstawie profili R_{-} i X_{-} uzyskanych z wąskiego czujnika nr 4

4.2. Rejestracja profili pojazdów w ruchu drogowym

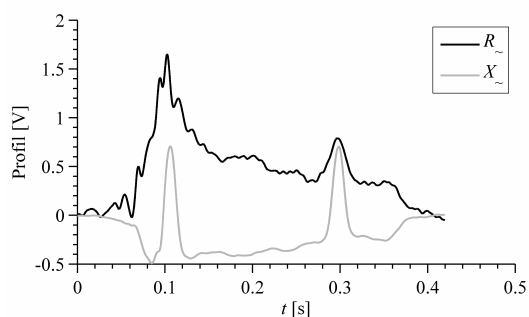
W warunkach rzeczywistego ruchu drogowego, na terenowym stanowisku badawczym, na drodze DK81, przy użyciu układów kondycjonowania nowej generacji wg [11], przeprowadzono długoterminowe rejestracje profili R_{-} i X_{-} .

Wykorzystano system jednocześnie rejestrujący profile i obraz z kamery zawierający przejazd pojazdu przez stanowisko [15]. Dzięki temu zbudowano bazę profili i informacji pozwalających weryfikować liczbę rzeczywiste występujących osi pojazdu. To pozwoliło opracować i sprawdzić skuteczność detekcji osi z użyciem czujników indukcyjnych pętlowych dla szerokiego spektrum pojazdów. W tabelicy 2 pokazano przykładowe zdjęcia pojazdów, natomiast na rysunkach 7-12 ich profile R_{\sim} i X_{\sim} uzyskane z wąskiego czujnika nr 4 (tab. 1). Podczas tych rejestracji, układ kondycjonowania pracował na częstotliwości 20 kHz. Prędkość pojazdów zawierała się w granicy od 40 do 70 km/h.

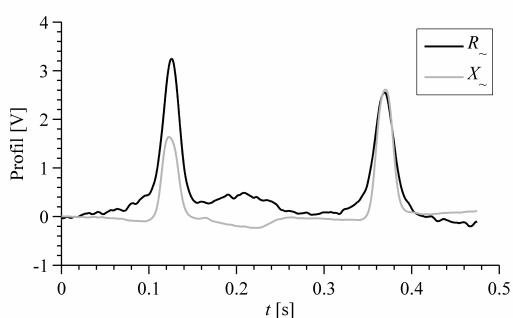
Tabela 2. Zdjęcia pojazdów, dla których rejestrowano profile



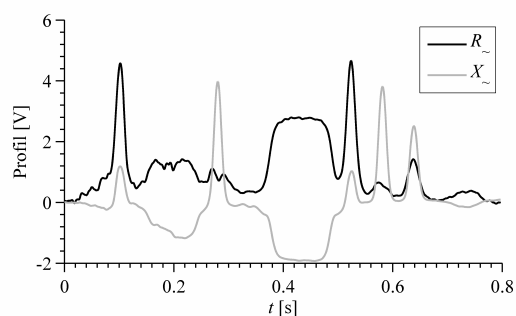
Rys. 7. Profile samochodu osobowego (tab. 2-a)



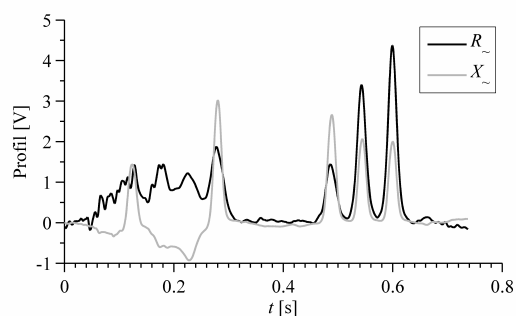
Rys. 8. Profile pojazdu dostawczego (tab. 2-b)



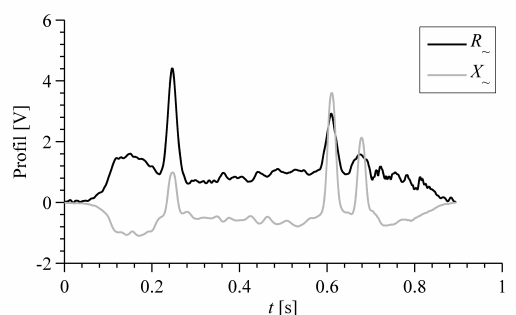
Rys. 9. Profile pojazdu ciężarowego (tab. 2-c)



Rys. 10. Profile pojazdu ciężarowego typu „TIR” (tab. 2-d)



Rys. 11. Profile cysterny (tab. 2-e)



Rys. 12. Profile autobusu 3-osiowego (tab. 2-f)

Czas trwania profili zależy od prędkości pojazdu, natomiast ich kształt jest charakterystyczny dla klasy pojazdów do których należą (osobowe, dostawcze, ciężarowe mają podobne, charakterystyczne kształty). Znając prędkość pojazdu, również profile rejestrowane w ruchu drogowym, można przedstawić w funkcji drogi x , którą przebywa pojazd będąc w zasięgu pola pętli indukcyjnej.

5. PODSUMOWANIE

Profile R_{\sim} i X_{\sim} uzyskiwane z użyciem układów kondycjonowania nowej generacji i wąskich czujników indukcyjnych pętlowych pozwalają na detekcję osi na podstawie widocznych, dodatnich impulsów pochodzących od kół pojazdu (stalowe felgi i stalowe opaski opony). Impulsy w profilu X_{\sim} na ogół nie osiągają wartości dodatnich w przypadku pojazdów o niskim zawieszeniu (pojazdy osobowe - rys. 7). To uniemożliwia poprawną detekcję osi takich pojazdów przy użyciu układów kondycjonowania starej generacji, których konstrukcja opiera się na układzie generatora LC , pozwalającego uzyskiwać tylko jeden profil (X_{\sim}). Odpowiednie łączenie informacji zawartych w profilach R_{\sim} i X_{\sim} pozwala generować sygnał cyfrowy obecności osi (rys. 6). Czułość wąskich pętli indukcyjnych

do detekcji osi jest jednak znacznie mniejsza niż 1 %. To komplikuje projektowanie, budowę oraz strojenie układów kondycjonowania sygnałów z tych czujników. Z drugiej, strony zwiększenie wymiaru w czujnika (rys. 1), prowadzi do zwiększenia jego czułości, jednak w profilach uzyskanych z szerszych czujników, informacje o detalach pojazdu, takich jak osie, są „rozmażane” lub nie występują (por. rys. 3, 4, 5). Dynamiczne wyznaczanie wartości współczynnika a równania (6) i poziomu odniesienia komparatora W_2 , zapewniających maksymalną skuteczność detekcji osi pojazdów, są przedmiotem dalszych badań autora.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Marszałek Z.: Detekcja osi pojazdów przy użyciu czujników indukcyjnych pętlowych, Materiały VI Kongresu Metrologii, 2013, s. 163-170.
2. Carter, Burgess, Best Practices Guidebook: Collecting Short Duration Manual Vehicle Classification Counts on High Volume Urban Facilities, FHWA (Federal Highway Administration), 2005.
3. Klein, L. A.: Sensor Technologies and Data Requirements for ITS, Artech House 2001.
4. Gajda J., Piwowar P., Sroka R., Stencel M., Żegleń T.: Pomiary parametrów ruchu drogowego, Wydawnictwa AGH 2012.
5. Gajda J., Piwowar P., Sroka R., Stencel M., Żegleń T.: Application of inductive loops as wheel detectors, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2012, s. 57-66.
6. Stańczyk 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.
7. Lees R. H.: Inductive loop sensor for traffic detection, and traffic monitoring apparatus and method using such a loop sensor, US Patent 2002.
8. Gajda J., Sroka R., Stencel M., Żegleń T., Piwowar P., Burnos P.: Układ elektryczny do detekcji osi pojazdów samochodowych, Biuletyn Urzędu Patentowego 2010, s. 32-33.
9. Marszałek Z.: Sposób pomiaru składowych impedancji czujnika indukcyjnego i układ pomiarowy składowych impedancji czujnika indukcyjnego, Biuletyn Urzędu Patentowego 2012, s. 35.
10. 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, s. 69-76.
11. Żegleń, T.: Badania symulacyjne i eksperymentalne układu kondycjonowania sygnału czujnika indukcyjnościowego do detekcji obiektów metalowych, Materiały XVIII sympozjum: Modelowanie i symulacja systemów pomiarowych, 2011, s. 49-57.
12. Day C., Brennan T., Harding M., Premachandra H., Jacobs A., Bullock D., Krogmeier J. Sturdevant J.: Three-Dimensional Mapping of Inductive Loop Detector Sensitivity with Field Measurement, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009, s. 35-47.
13. Agilent E4980A Precision LCR Meter 20 Hz to 2 MHz, 2010.
14. Leica: Leica Disto D8 Laser Tape - Bluetooth, 2010.
15. Marszałek Z., Mielczarek M.: Model systemu oraz otwarte technologie internetowe w zdalnym systemie do automatycznej rejestracji profili magnetycznych pojazdów, Materiały XVIII Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych, 2011, s. 175-180.

INDUCTIVE LOOP SENSORS FOR VEHICLE AXLE DETECTION

Currently used solutions for the axle vehicle detection sensors are based on measurements of mechanical stress or pressure generated in the tube or a special mat installed in the road surface on which the vehicle travels. Piezoelectric, or quartz sensors are commonly used in WIM systems (weight in motion) and allow detection and weighting vehicles in motion. If no information is required regarding the values axle (or estimate the weight of the vehicle), and only the classification of vehicles based on the number of axles is required, WIM systems are not popular because of its cost. Furthermore, WIM systems would lose its efficiency if the trucks could pick up and leave at least one axle. Systems based on an inductive loop sensor, with a different mode of operation may also allow the detection of elevated axles, whereby it is possible to correctly classify vehicles. Moreover, inductive loop sensors have very high durability, simple construction and its lifetime many times exceeds the lifetime of the classical axle detectors. However, inductive loops sensors require the design of complex electronic systems and even the use of computer systems equipped with so-called advanced signal analysis of magnetic profiles. This paper presents the design and operation of inductive loop sensors. A new approach is proposed for the detection of vehicle axles. It is based on the new conditioning systems that provides magnetic profile of resistance (R_{ω}) and magnetic profile of reactance (X_{ω}) of the inductive loop sensor. Figure 2 shows the measurement system in which the profiles of R_{ω} and X_{ω} for a passenger vehicle are obtained in a static conditions (zero vehicle speed during the measurement). The details of main parameters of considered inductive loops are shown in Table 1 and in Figure 1. Thanks to the profiles of R_{ω} and X_{ω} and formulas (2) and (3) the sensitivity of sensors, S_R and S_X respectively were determined and these are shown in Table 1. Figures 3 and 4 show profiles respectively R_{ω} and X_{ω} obtained from the inductive loop sensors 1, 2, 3, 4. The Figure 5 shows the profiles R_{ω} and X_{ω} with a narrow sensor No. 4 (according to the Table 1) while the signal W_1 shown in Figure 6 shows the result of the weighted sum $W_1 = a R_{\omega} + X_{\omega}$. Digital signal W_3 is obtained by comparing the signals W_1 and W_2 in the comparator and it provides information regarding the presence of the vehicle axle that can be easily counted by the digital device. Finally profiles R_{ω} and X_{ω} recorded in real traffic by means of a narrow sensor No. 4 (vehicles shown in the pictures a-f in Table 2 were considered) are shown in Figures 7-12.

Keywords: inductive loop sensors, axle detection, magnetic profile of resistance, magnetic profile of reactance

