

Estymacja indywidualnej prędkości pojazdu na podstawie analizy profilu magnetycznego.

Streszczenie. W artykule przedstawiono nowy model estymacji indywidualnej prędkości pojazdów przejeżdżających przez stanowisko pomiarowe wyposażone w pojedynczą pętlę indukcyjną. Proponowany model posiada wiele (nawet 9) wejść, a nie jak dotychczas jedno czy dwa. Zastosowanie zaproponowanego modelu pozwoliło zmniejszyć błąd estymacji prędkości pojazdów.

Abstract. The paper presents a new model for estimating individual vehicle speed passing through the test stand equipped with a single inductive loop detector. The proposed model is a multi-input model (up to 9 inputs), and no longer one or two. The use of such a model has reduced vehicle speed estimation error. (**Individual vehicle speed estimation on the base of magnetic profile analysis**)

Keywords: vehicle speed estimation, inductive loop detector, vehicle magnetic signature.

Słowa kluczowe: estymacja prędkości pojazdu, pętla indukcyjna, profil magnetyczny pojazdu.

Wstęp

Pozyskiwanie możliwie dokładnych informacji drogowych takich jak natężenie ruchu, prędkość pojazdów czy struktura rodzajowa (procentowy udział w potoku ruchu, wyróżnionych klas pojazdów) [1,2] jest podstawą precyzyjnego zarządzania infrastrukturą drogową.

Informacje te mogą być wykorzystane do m.in. przewidywania remontów wybranych odcinków drogowych, czy też planowania rozbudowy fragmentów infrastruktury o największym natężeniu (obwodnice).

Jednym z podstawowych parametrów określających drogowy system komunikacyjny jest prędkość pojazdów na wybranym fragmencie drogi. W połączeniu z klasyfikacją pojazdów umożliwia określenie wyżej wymienionych parametrów.

Od kiedy zaczęto stosować pętle indukcyjne w systemach drogowych, powstało wiele metod wyznaczania indywidualnej prędkości pojazdów przejeżdżających przez stanowiska wyposażone właśnie w te pętle. Metody te pozwalają bezpośrednio lub pośrednio wyznaczyć indywidualną prędkość pojazdu przejeżdżającego przez stanowisko.

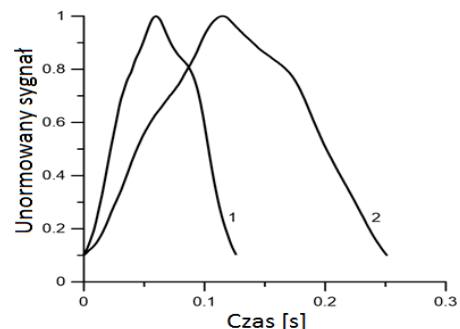
Metoda bezpośrednia wyznaczania prędkości jest możliwa do stosowania na tych stanowiskach pomiarowych, które zostały wyposażone w dwie pętle indukcyjne. Polega ona na pomiarze czasu przejazdu pojazdu pomiędzy dwiema pętlami zainstalowanymi w znanej odległości jedna od drugiej.

Znacznie częściej na drogach można spotkać stanowiska wyposażone w pojedynczą pętlę indukcyjną. Systemy jedнопętlowe służą najczęściej do detekcji pojazdów. Pozwalają one również na estymację prędkości przejeżdżających pojazdów [3,4,5] i właśnie to podejście zostało omówione w niniejszej pracy (metoda pośrednia).

W pracy przedstawiono nowy algorytm estymacji prędkości indywidualnej pojazdów, bazujący na analizie profilu magnetycznego pojazdu przejeżdżającego przez stanowisko pomiarowe. Profile magnetyczne pojazdów zostały zarejestrowane na stanowisku pomiarowym w Gardawicach przy drodze krajowej 81. Wraz z profilami magnetycznymi rejestrowano prędkości pojazdów, wykorzystując do tego układ pomiarowy wyposażony w dwa detektory osi. Ze względu na małą niepewność pomiaru prędkości tą metodą (+/- 1 km/h), traktowano ją jako metodę referencyjną. Eksperymenty przeprowadzone w warunkach ruchu drogowego pozwoliły na wyznaczenie niepewności indywidualnej prędkości pojazdu, estymowanej na podstawie zaproponowanego modelu.

Profil magnetyczny pojazdu.

Pętle indukcyjne montowane w jezdni zasilane są napięciem przemiennym poprzez układy kondycjonujące. Układy te posiadają wyjścia umożliwiające rejestrację zmiany parametrów elektrycznych pętli indukcyjnej podczas przejazdu pojazdu. Najczęściej rejestrowanym parametrem jest zmiana zastępczej reakcji (rozumianej jako parametr X_L , widziany z zacisków detektora-przyjmując model szeregowy $R+jX_L$) pętli w czasie przejazdu pojazdu ponad pętlą indukcyjną. Ta właśnie zmiana zastępczej indukcyjności zwana jest profilem magnetycznym pojazdu.



Rys. 1. Profile magnetyczne pojazdów należących do tej samej klasy (pojazdy osobowe). 1 – pojazd osobowy jadący z prędkością 112 km/h. 2 – pojazd osobowy jadący z prędkością 65 km/h,

Niektóre cechy profilu magnetycznego zależą od prędkości pojazdu (rys. 1). Na przykład nachylenie zbocza narastającego i opadającego profilu magnetycznego, jego czas trwania (przedział czasu, w którym sygnał profilu przekracza przyjętą wartość progową), maksymalna pochodna itd.

Określenie cech lub cech najbardziej wrażliwych na zmiany prędkości jest podstawą estymacji prędkości pojazdu w układzie z pojedynczą pętlą indukcyjną.

Cechy charakterystyczne profili magnetycznych wykorzystywane do estymacji indywidualnej prędkości pojazdu przedstawione zostały w tabeli 1. Cechy oznaczone numerami 1 do 7 znane są z literatury, cechy 8 i 9 zostały zaproponowane przez autora.

Model statystyczny

Model będący podstawą estymacji prędkości pojazdu jest opisany równaniem (1). Jego współczynniki zostały wyznaczone na podstawie zbioru uczącego zawierającego wyniki rejestracji profili magnetycznych oraz wyniki pomiaru prędkości pojazdów metodą referencyjną.

Tabela 1. Cechy charakterystyczne profili magnetycznych. Nazwa i oznaczenie angielskie

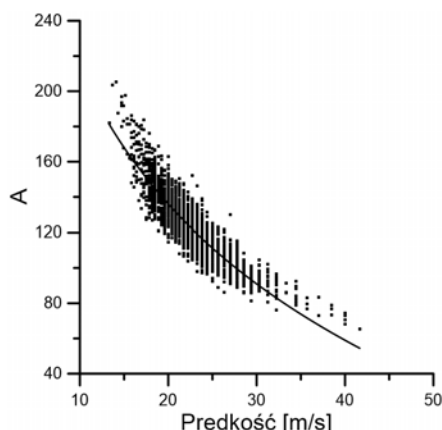
| lp. | Nazwa cechy | Oznaczenie | Opis |
|-----|--------------------------|--------------|--|
| 1 | 2 levels Slew Rate | SR_2 | Nachylenie zbocza narastającego profilu magnetycznego pomiędzy dwoma przyjętymi poziomami 0.1 i 0.6 unormowanej amplitudy [1/ms]. |
| 2 | Slew Rate [3] | SR_local | Nachylenie zbocza narastającego profilu magnetycznego pomiędzy poziomem 0.1 unormowanej amplitudy, a lokalnym maksimum [1/ms]. |
| 3 | Slew Rate | SR_global | Nachylenie zbocza narastającego profilu magnetycznego pomiędzy poziomem 0.1 unormowanej amplitudy, a globalnym maksimum [1/ms]. |
| 4 | Duration [4] | dur | Czas trwania profilu magnetycznego [ms]. |
| 5 | Inverse duration [5] | Inv(dur) | Odwrotność czasu trwania profilu magnetycznego [1/ms]. |
| 6 | Parabolic model | Max(dxdt(p)) | Algorytm aproksymuje część profilu magnetycznego (od jego początku do pierwszego lokalnego minimum) wielomianem stopnia 2, następnie liczy pochodną tego wielomianu, a jako cechę zależną od prędkości pojazdu przyjmuje maksymalną wartość obliczonej pochodnej [1/ms]. |
| 7 | Numerical derivative [6] | Max(NumDiff) | Algorytm numerycznie różniczkuje cały profil magnetyczny pojazdu, następnie jako cechę zależną do prędkości pojazdu podaje maksymalną wartość tej pochodnej [1/ms]. |
| 8 | Profile line length | Len | Długość linii profilu magnetycznego (rozumiana jako suma długości odcinków łączących dwie kolejne próbki profilu). |
| 9 | Area | A | Pole powierzchni pod linią profilu magnetycznego. |

Poszukiwane współczynniki wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów (LS).

$$(1) \quad V_{est} = a + b \cdot cecha1 + c \cdot cecha2 + \dots,$$

gdzie a, b, c, ... - współczynniki modelu

Przykładową zależność wybranej cechy profilu magnetycznego (Area) A od prędkości pojazdu przedstawiono na rysunku 2. Na rysunku widać nieliniową zależność pomiędzy polem powierzchni pod profilem magnetycznym - A, a prędkością pojazdu.



Rys. 2. Zależność cechy A (Area) od prędkości pojazdu dla klasy pojazdów osobowych.

Znajomość współczynników modelu (1) pozwala wykorzystać go do oceny indywidualnej prędkości pojazdu. Zróżnicowanie konstrukcji podwozi występujące nawet wśród pojazdów należących do jednej klasy, powoduje jednak losowy rozrzut wyznaczanych ocen wokół wartości referencyjnej. To zjawisko jest przyczyną niepewności estymacji prędkości proponowaną metodą. Tę niepewność można ograniczyć poprzez uwzględnienie w modelu (1) większej liczby cech, w dużym stopniu wrażliwych na zmiany prędkości pojazdu. W pracach innych autorów wykorzystywane są modele uwzględniające maksymalnie dwie cechy profilu magnetycznego. Przedmiotem badań przeprowadzonych w tej pracy są modele postaci (1) uwzględniające wiele (nawet 9) cech.

Na etapie testowania wyznaczonego modelu pod kątem niepewności oceny prędkości pojazdu wykorzystana została druga część danych eksperymentalnych. Modele przedstawione w [4] i [5] wykorzystujące nachylenie zbocza

oraz czas trwania profilu bądź jego odwrotność, uważane są obecnie za pozwalające na uzyskanie najmniejszej niepewności estymacji prędkości. Dlatego z nimi zostały porównane wyniki badań przeprowadzonych w ramach tej pracy.

Badania eksperymentalne i wyniki.

Na drogowym stanowisku pomiarowym zarejestrowano profile magnetyczne oraz prędkości pojazdów należących do czterech klas: pojazdy osobowe, bus, ciężarowe, TIR. Wszystkie wyniki pomiarów podzielono na dwa zbiory: zbiór uczący i zbiór testowy. Metoda wyboru sygnałów należących do jednej klasy została opisana w [7], a jej opis wykracza poza ramy tej pracy. Liczności wyników pomiarowych w poszczególnych klasach przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Liczności danych pomiarowych w poszczególnych klasach pojazdów.

| l.p. | Klasa | Liczba profili | Zbiór uczący | Zbiór testowy |
|------|-----------|----------------|--------------|---------------|
| 1 | Osobowe | 4998 | 2499 | 2499 |
| 2 | Bus | 5002 | 2501 | 2501 |
| 3 | Ciężarowe | 1827 | 914 | 913 |
| 4 | TIR | 3505 | 1753 | 1752 |

Dla każdej z wyróżnionych klas pojazdów wyznaczono współczynniki modelu postaci (1). Liczba cech profilu uwzględnionych w tym modelu wynosiła od 1 do 9 (tab. 1). Stąd dla każdej klasy pojazdów możliwe było skonstruowanie $2^9 - 1 = 511$ modeli. W tym zbiorze poszukano modelu najlepszego, tj. takiego, dla którego współczynnik determinacji R^2 przyjmuje wartość maksymalną.

W efekcie określono strukturę i współczynniki modelu najlepiej dopasowanego do danych eksperymentalnych uzyskanych dla danej klasy pojazdów. Modele te są opisane równaniami (3) i (4). Ich porównanie z najlepszymi modelami opisanymi w literaturze przedstawiono w tabeli 3.

• klasa pojazdów osobowych, bus oraz ciężarowych (model wykorzystujący 9 cech profilu magnetycznego):

$$(3) \quad V_{est} = a + b \cdot SR_2 + c \cdot SR_{local} + d \cdot SR_{global} + e \cdot \ln(dur) + f \cdot \ln(Inv(dur)) + g \cdot \text{Max}(dxdt(p)) + h \cdot \text{Max}(NumDiff) + i \cdot Len + j \cdot \ln(A)$$

• klasa pojazdów TIR (model wykorzystujący 5 cech profilu magnetycznego):

$$(4) \quad V_{est} = a + b \cdot SR_{local} + c \cdot SR_{global} + d \cdot \ln(dur) + e \cdot \text{Max}(NumDiff) + f \cdot Len$$

oznaczenia jak w tabeli 1.

Wprowadzenie $\ln(\text{dur})$ i $\ln(A)$ pozwala uzyskać liniową zależność pomiędzy V_{est} i prędkością pojazdu.

Dzięki uwzględnieniu większej liczby cech profilu magnetycznego modele zaproponowane w tej pracy są w istotnym stopniu lepiej dopasowane do danych eksperymentalnych, w porównaniu z najlepszymi modelami opisywanymi w literaturze.

Tabela 3. Dopasowanie modeli (3) i (4) do danych uczących.

| Klasa pojazdów. | Model | R ² | Model Oh, Ritchie, Oh [4] | R ² | Model Park, Ritchie [5] | R ² |
|-----------------|-------|----------------|---------------------------|----------------|-------------------------|----------------|
| 1 | (3) | 0,8850 | Vest=a+b*SR+c*ln(dur) | 0,8608 | Vest=a+b*SR+c*lnv(dur) | 0,8723 |
| 2 | (3) | 0,9186 | Vest=a+b*SR+c*ln(dur) | 0,8841 | Vest=a+b*SR+c*lnv(dur) | 0,8963 |
| 3 | (3) | 0,8130 | Vest=a+b*SR+c*ln(dur) | 0,7575 | Vest=a+b*SR+c*lnv(dur) | 0,7588 |
| 4 | (4) | 0,9050 | Vest=a+b*SR+c*ln(dur) | 0,8989 | Vest=a+b*SR+c*lnv(dur) | 0,8834 |

Tabela 4. Oceny błędów estymacji prędkości. Błąd RMS, RMSP, MAPE.

| Klasa pojazdów. | RMS [m/s] | | | RMSP [%] | | | MAPE [%] | | |
|-----------------|-----------|--------|----------|----------|--------|----------|----------|--------|----------|
| | autor | Oh [4] | Park [5] | a. | Oh [4] | Park [5] | a. | Oh [4] | Park [5] |
| 1 | 1,3 | 1,4 | 1,4 | 5,6 | 6,3 | 6,0 | 4,4 | 5,0 | 4,8 |
| 2 | 1,0 | 1,2 | 1,2 | 4,6 | 5,3 | 5,1 | 3,5 | 4,2 | 4,0 |
| 3 | 2,4 | 2,4 | 2,5 | 12,0 | 12,0 | 12,0 | 9,0 | 9,2 | 9,2 |
| 4 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 3,3 | 3,4 | 3,6 | 1,8 | 1,9 | 1,9 |

$$(5) \quad RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_{real_i} - V_{est_i})^2}{N}}$$

$$(6) \quad RMSP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\left(\frac{V_{real_i} - V_{est_i}}{V_{real_i}} \right) \cdot 100 \right)^2}{N}}$$

$$(7) \quad MAPE = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \left(\frac{V_{real_i} - V_{est_i}}{V_{real_i}} \right) \cdot 100 \right|}{N}$$

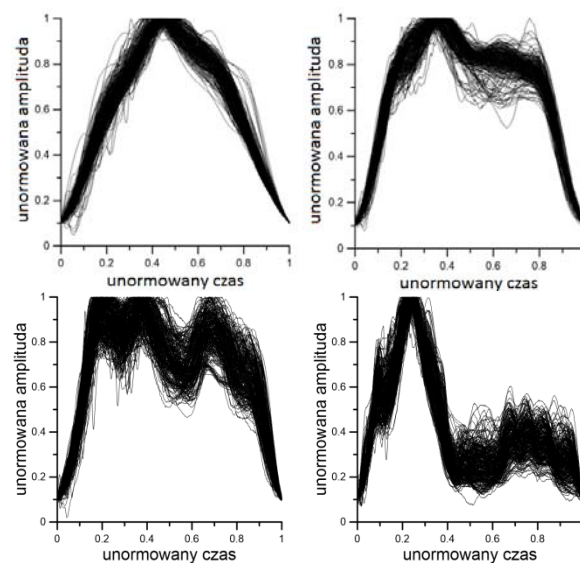
gdzie: V_{real_i} – prędkość referencyjna (wynik pomiaru z czujników referencyjnych piezoelektrycznych),
 V_{est_i} – prędkość kolejnego pojazdu, będąca wynikiem estymacji

Na rysunku 3 przedstawiono unormowane w amplitudzie oraz czasie profile magnetyczne należące do klas pojazdów osobowych, bus, ciężarowych oraz TIR. Klasa pojazdów osobowych wykazuje większą spójność w porównaniu z pozostałymi klasami, co przekłada się na dokładność estymacji prędkości w tych klasach.

Błędy estymacji prędkości pojazdów należących do klas: osobowy i bus są zbliżone i wynoszą odpowiednio 1.3 i 1.0 m/s (RMS). Największy błąd estymacji prędkości 2.5m/s (RMS) uzyskano w klasie pojazdów ciężarowych, a najmniejszy 0.7m/s (RMS) w klasie pojazdów typu TIR.

Podobieństwo kształtów profili magnetycznych pojazdów wewnątrz każdej z klas: osobowe (rys. 3), bus oraz tir jest bardzo duże, stąd najmniejsze błędy estymacji prędkości właśnie w tych klasach (najmniejszy rozrzut cech charakterystycznych profili magnetycznych). Profile magnetyczne należące do klasy pojazdów ciężarowych wykazują największe zróżnicowanie pod względem kształtu (rys. 3), co bezpośrednio wpływa na rozrzut danej cechy, a co za tym idzie negatywnie wpływa na niepewność estymacji prędkości.

Porównanie zaproponowanych modeli z modelami opisanymi w literaturze przedstawiono w tabeli 4. Jakość modeli oceniano za pomocą kryteriów (5)-(7). Wszystkie modele były badane z wykorzystaniem tych samych testowych zbiorów pomiarowych.



Rys. 3. Profile magnetyczne pojazdów należących do klasy osobowe (od góry z lewej), bus (od góry z prawej), ciężarowe (od dołu z lewej), oraz TIR (od dołu z prawej).

Dwunastoprocentowy błąd estymacji prędkości w klasie pojazdów ciężarowych skłania do dalszej analizy sygnałów tej klasy.

Możliwym rozwiązaniem (w celu zmniejszenia błędów estymacji prędkości) jest dalszy podział klasy na podklasy pojazdów podobnych do siebie pod względem kształtu profilu. Takie rozwiązanie sprawia, że w powstałych podklasach profile magnetyczne są do siebie bardziej podobne, a co za tym idzie rozrzut ich cech jest mniejszy. Wadą tego rozwiązania są mniejsze licznosci utworzonych podklas.

W przypadku klas pojazdów: osobowe, bus i ciężarowe, model najlepiej estymujący prędkość (3), wykorzystuje wszystkie 9 cech profilu magnetycznego, co świadczy o

tym, że każda z cech wprowadza użyteczną informację o prędkości pojazdu. Model proponowany dla klasy TIR (4) wykorzystuje tylko 5 cech profilu magnetycznego (w tym długość linii profilu magnetycznego L_{en} – zaproponowaną przez autorów artykułu).

Wnioski.

W pracy zaproponowano nowe modele estymacji indywidualnej prędkości pojazdów przejeżdżających przez stanowisko pomiarowe wyposażone w pojedynczy czujnik pętlowy (pętla indukcyjna).

Wyniki estymacji prędkości za pomocą modeli zaproponowanych przez autorów zestawiono z wynikami modeli znanych z literatury (dotychczas uważane za najlepiej estymujące indywidualną prędkość pojazdów). Porównanie przeprowadzono na zbiorze około 15 000 profili magnetycznych pojazdów należących do różnych klas.

Zaproponowane modele w każdej klasie pojazdów dały lepszy rezultat estymacji prędkości (mniejszy błąd) niż modele znane z literatury.

Znaczne, w odniesieniu do literatury, rozbudowanie modelu (do 9 cech charakterystycznych profilu magnetycznego i do 10 współczynników modelu) nie stanowi problemu implementacyjnego. Współczynniki modelu wyznaczone są raz (przy udziale referencyjnego pomiaru prędkości), a następnie implementowane w formule opisującej estymowaną prędkość.

LITERATURA:

- [1] Suchorzewski W., Tracz M., Gaca S., *Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka*, WKiŁ 2009.
- [2] Datka S., Suchorzewski M., Tracz M., *Inżynieria ruchu*. WKiŁ 1999
- [3] Sun C., Ritchie S. G. *Individual Vehicle Speed Estimation Using Single Loop Inductive Waveforms*, ASCE Journal of Transportation Engineering, Vol. 125, No. 6, 1999, pp. 531 - 538.
- [4] Oh, S., Ritchie, S.G., Oh, C., 2002. *Real-time traffic measurement from single loop inductive signatures*. Transportation Research Record 1804, paper no. 02-4148
- [5] Park S., Ritchie S. G., *Innovative single-loop speed estimation model with advanced loop data*. IET Intelligent Transport Systems. 2010-12, pp.12
- [6] Gajda J., Sroka R., Stencel M., Żegleń T., *Measurement of Road Traffic Parameters Using an Inductive Single-Loop Detector*, 9th International Symposium on Electrical Instruments in Industry, Glasgow 1997.
- [7] Gajda J., Mielczarek M., *Automatic Vehicle Classification in Systems with Single Inductive Loop Detector*, Metrology and Measurement Systems. ISSN:0860-8229. (w druku, grudzień 2014)

Autorzy: mgr inż. Michał Mielczarek, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Metrologii i Elektroniki, Al. Mickiewicza 30, pawilon B-1, 30-059 Kraków, E-mail: mielczarekm@gmail.com
prof. dr hab. inż. Janusz Gajda, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Metrologii i Elektroniki, Al. Mickiewicza 30, pawilon B-1, 30-059 Kraków, E-mail: jgajda@agh.edu.pl