



KRZYSZTOF SEKUŁA¹⁾
ROBERT KONOWROCKI²⁾
TOMASZ DĘBOWSKI³⁾

BADANIA NOWEGO TYPU SYSTEMU WAŻENIA POJAZDÓW DROGOWYCH W RUCHU

STRESZCZENIE. W pracy zaprezentowano wstępną ocenę nowej metodologii stosowanej do identyfikacji obciążeń wywieranych przez przejeżdżające pojazdy na nawierzchnię drogi. Proponowane rozwiązanie opiera się na pomiarze lokalnych odkształceń powstałych na powierzchni detektora nacisku. Celem jest rozwój koncepcji oraz sprawdzenie nowego typu dynamicznej wagi drogowej oraz algorytmu rozwiązania zagadnienia odwrotnego. Przyjętą koncepcję wstępnie sprawdzono wykorzystując metodę elementów skończonych. Przeprowadzono też testy laboratoryjne proponowanego urządzenia. Uzyskano dzięki temu wstępne dane do kalibracji urządzenia. Ważnym zagadnieniem było sprawdzenie czynników wpływających na identyfikację obciążeń. Skuteczność rozwiązania sprawdzono w badaniach doświadczalnych wstępnej wersji urządzenia w warunkach drogowych.

1. WSTĘP

Systemy ważenia pojazdów samochodowych w ruchu zostały zaproponowane w celu pokonania ograniczeń stosowalności wag statycznych. W tego typu urządzeniach pomiar może być wykonywany podczas przejazdu pojazdu samochodowego z prędkością drogową, bez konieczności nakładania ograniczeń administracyjnych. Systemy

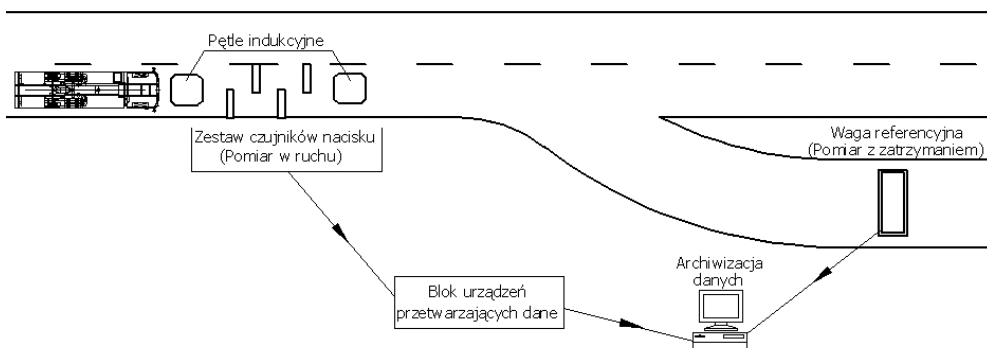
¹⁾ mgr inż. – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie
oraz firma CONTEC w Łomiankach

²⁾ dr inż. – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie

³⁾ mgr inż. – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie

służące do ważenia pojazdów w ruchu są umieszczane w nawierzchni drogi, najczęściej w sposób inwazyjny [1]. Układy do ważenia w ruchu składają się zwykle z czujników nacisku oraz pętli indukcyjnych [2], których zadaniem jest wykrycie obecności pojazdów w strefie pomiaru [3].

Omawiane urządzenia często stosowane są do celów statystycznych, by określać np. natężenie ruchu pojazdów na danym odcinku drogi. Znane są również rozwiązania w których zespół czujników nacisku jest używany jako waga preselekcyjna (rys. 1), do wykrywania samochodów przeciążonych, by móc je następnie kierować na statyczną wagę referencyjną. Pomiar dwustopniowy [4], dynamiczny i następnie statyczny, jest konieczny, gdy rozważane jest działanie prewencyjne, karanie kierowców za przekroczenie limitów nacisków. Tego typu procedura spowodowana jest niewystarczającą dokładnością urządzeń ważenia w ruchu, jak również brakiem stosownych uregulowań prawnych.



Rys. 1. Schemat systemu ważenia w ruchu ze statyczną wagą referencyjną

Fig. 1. Scheme of weight in motion system with the static scale as reference measurement

Systemy ważenia pojazdów można sklasyfikować w zależności od zakresu prędkości poruszających się pojazdów w czasie pomiaru. Można tu wyróżnić wysokoprędkościowe systemy ważenia, przystosowane do wykrywania masy przy prędkościach większych niż 15 km/h oraz niskoprędkościowe systemy [5], ważące przy prędkości poniżej 15 km/h.

Innym kryterium klasyfikacji systemów ważenia jest sposób instalacji czujników. W zależności od przeznaczenia stosowane są urządzenia montowane w sposób stacjonarny lub przenośny. Systemy montowane na stałe mogą być stosowane do pomiarów statystycznych, jak np. zliczanie pojazdów, określanie średniej wartości nacisków lub prędkości jazdy. Urządzenia przenośne stosowane są do badań krótkoterminowych [5], np. jako uzupełnienie punktów statycznej kontroli ciężaru pojazdów.

Systemy ważące w ruchu mogą być również podzielone ze względu na wymiary poprzeczne czujnika nacisku. Jest to o tyle istotne, że związane jest bezpośrednio z zasadą działania urządzenia [6]. Do pierwszej grupy można zaliczyć urządzenia,

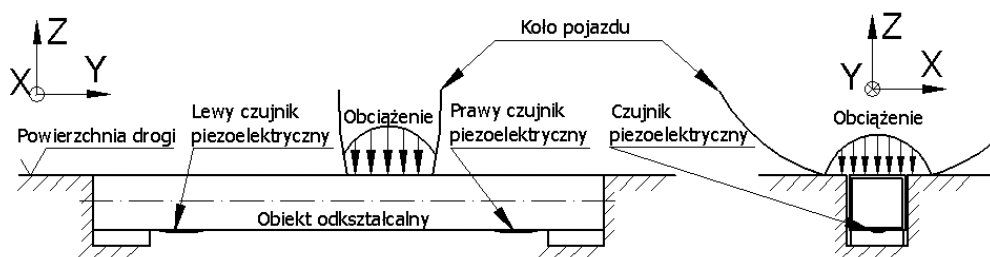
w którym przetwornikiem nacisku są płyty. Są one znacznie szersze niż strefa kontaktu opony z nawierzchnią drogi. W tej grupie urządzeń algorytm oszacowania nacisku przetwarza amplitudę sygnału wygenerowanego z czujnika. Do drugiej grupy należą czujniki, które mają niewielką szerokość, a określanie wartości nacisku odbywa się dzięki operacji całkowania sygnału w pewnym przedziale czasu.

Artykuł poświęcono badaniom nowego typu urządzenia, służącego do ważenia pojazdów będących w ruchu. Biorąc pod uwagę przytoczony uprzednio podział, można je zaliczyć do grupy wysokopiędkościowych, montowanych na stałe przetworników nacisku o niewielkiej szerokości.

Warto wspomnieć, że obecnie oferowane komercyjnie systemy ważące pojazdy w ruchu charakteryzują się generalnie wysoką ceną. Stanowi to dużą barierę w powszechnym ich zastosowaniu. Zbudowanie układu tańszego, o porównywalnych parametrach metrologicznych do oferowanych na rynku systemów, jest jednym z podstawowych powodów podjęcia badań.

2. OGÓLNA KONCEPCJA URZĄDZENIA

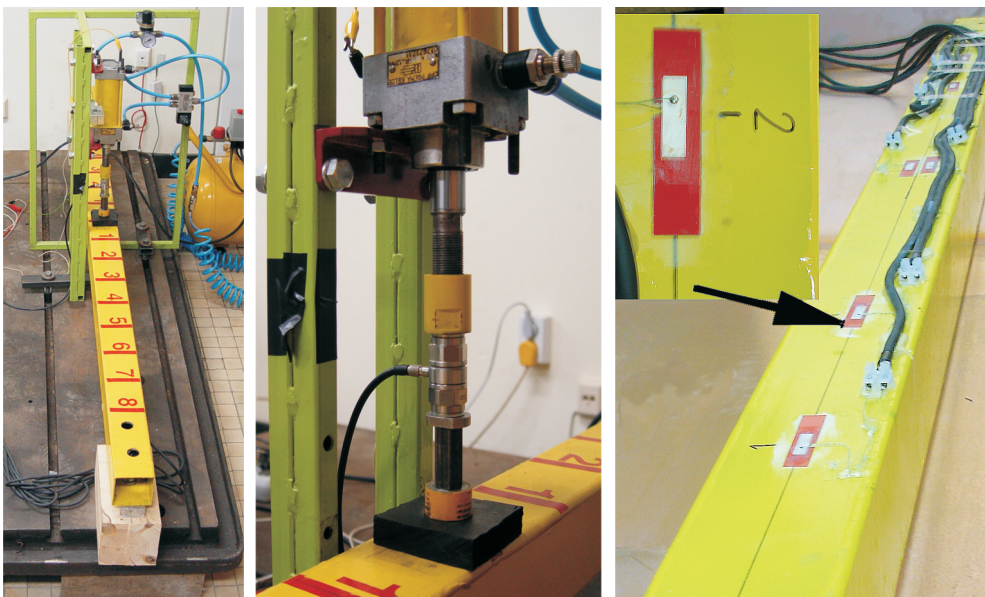
W proponowanym rozwiązaniu wykorzystano identyfikację obciążeń metodą pośrednią. Jako czujnik stosowany do określania obciążenia przypadającego na każdą z osi pojazdu wykorzystuje się stalową belkę, która łącznie z czujnikami stanowi przetwornik nacisku. Element ten jest podparty symetrycznie na końcach i zamontowany w drodze, tak aby górna powierzchnia belki umieszczona była równo z nawierzchnią drogi (rys. 2). Wymiary wzdłużne belki, przy jej lokalizacji w drodze na połowie pasa ruchu, są tak dobrane, aby tylko jedno koło każdej z osi pojazdu obciążało przetwornik. Jako czujniki pomiarowe wykorzystano płytki piezoelektryczne. Zostały one ulokowane symetrycznie na powierzchni belki. Do oszacowania wartości nacisków przypadających na oś pojazdu wykorzystuje się pomiar przebiegów czasowych deformacji w zakresie sprężystym belki pomiarowej.



Rys. 2. Schemat koncepcyjny nowego typu przetwornika nacisku
Fig. 2. General concept of the proposed device

3. PRÓBY URZĄDZENIA W WARUNKACH LABORATORYJNYCH

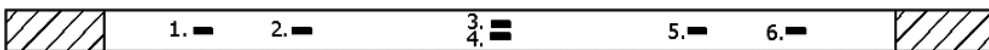
Celem badań laboratoryjnych było przeprowadzenie wstępnej regulacji przetwornika nacisku oraz uzyskanie danych do dopasowania modelu numerycznego belki pomiarowej. Stanowisko pomiarowe przedstawiono na rysunku 3. Jako obiektu odkształcalnego użyto stalowego profilu o długości 2000 mm, przekroju kwadratowym o bokach równych 80 mm i grubości ścianki 4 mm. Profil podparto na końcach w sposób symetryczny względem jego środka, analogicznie jak planowano go zamontować w nawierzchni drogi. Do belki zamontowano sześć czujników piezoelektrycznych na jej dolnej powierzchni, rozmieszczonych symetrycznie względem środka. Ilustruje to rysunek 3c, d.



a)

b)

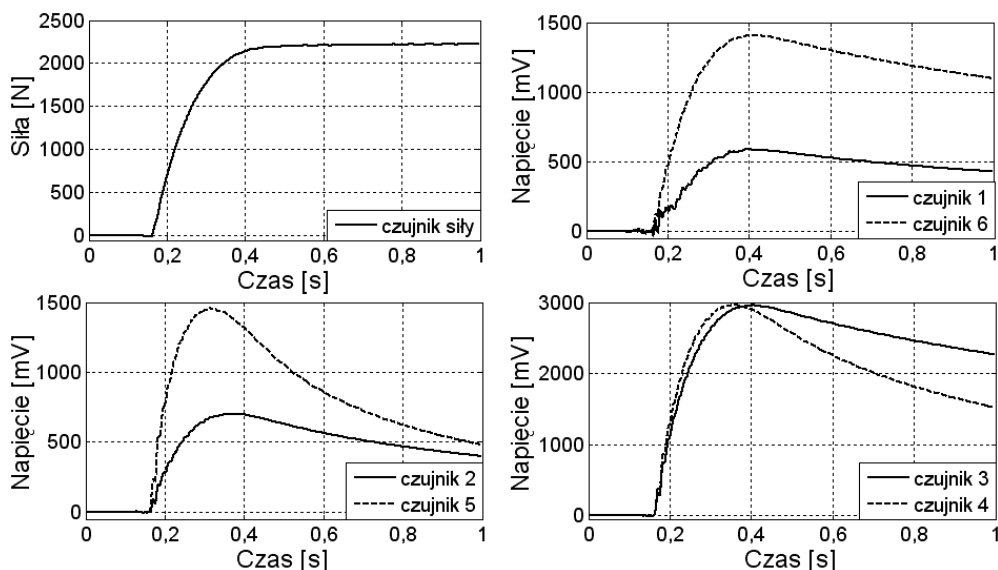
c)



d)

Rys. 3. Laboratoryjne stanowisko badawcze: a) widok ogólny stanowiska, b) siłownik pneumatyczny oraz czujnik siły, c) piezoelektryczne czujniki odkształceń naklejone na dolną powierzchnię profilu (widok czujnika w prawym górnym rogu), d) lokalizacja czujników
 Fig. 3. The laboratory testing stand: a) general view, b) piezoelectric force sensor, c) located on the down surface of the profile (view of the sensor left top corner), d) sensors localization

Do obciążania badanej konstrukcji wykorzystano siłownik pneumatyczny (rys. 3b), wyposażony w czujnik siły zamontowany na tłoczysku. Uwzględniono fakt, iż pojazdy poruszają się z różnymi parametrami ruchu, jak również mają różne parametry konstrukcyjne. Z tego powodu sprawdzono kilka wariantów obciążenia, jak np. różne miejsca przyłożenia siły (13 pozycji co 10 cm), różne jej wartości (1100 N, 1650 N, 2200 N) oraz intensywność narastania obciążenia (0,2 s; 0,4 s; 0,6 s). Przykładowe wyniki pomiarowe uzyskane podczas testów laboratoryjnych przedstawiono na rysunku 4. Oznaczenie oraz lokalizację czujników ilustruje rysunek 3d.



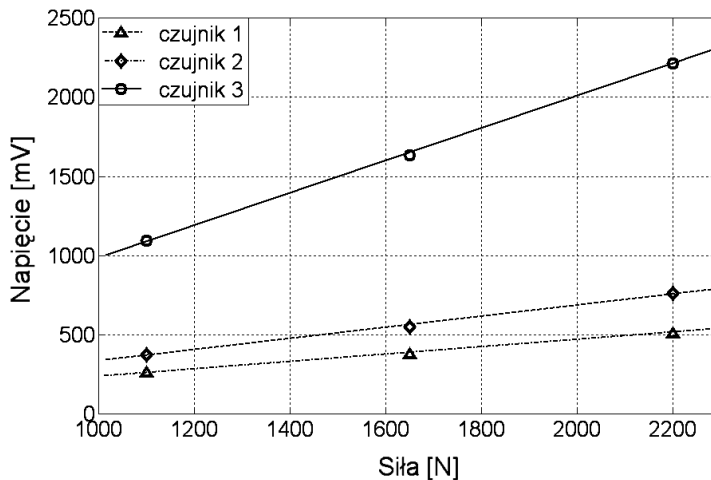
Rys. 4. Przykładowe sygnały pomiarowe otrzymane w czasie badań laboratoryjnych
Fig. 4. Experimental results obtained on the laboratory test stand

Na podstawie badań laboratoryjnych stwierdzono, iż wpływ amplitudy obciążenia na zmierzoną odpowiedź konstrukcji ma charakter liniowy (rys. 5). Można to wytłumaczyć faktem, że badaną belkę odkształcano w zakresie sprężystym w niewielkim stopniu. Tu również zastosowano czujniki wykorzystujące zjawisko piezoelektryczne. W literaturze jest ono określane jako liniowa zależność elektromechaniczna [9, 10].

Wielkością, która została uznana za parametr mający istotny wpływ na mierzony sygnał, było położenie obciążenia. Zaobserwowano, że zarejestrowany sygnał uzyskany z czujnika osiąga wyższą wartość, jeżeli źródło wymuszenia jest zlokalizowane bliżej. Zauważono również wpływ szybkości narastania obciążenia. Jest to wynikiem użytego układu pomiarowego, głównie użytych wzmacniaczy napięciowych.

Warto zwrócić uwagę na charakterystyczną upływność ładunku z czujników piezoelektrycznych, widoczną przy porównaniu sygnału z czujnika siły oraz pozostałych przetworników (rys. 4). Jest to niepożądana zmiana sygnału pomiarowego w czasie.

Nie jest ona funkcją mierzonej wielkości [7]. Efekt ten jest najprawdopodobniej spowodowany zastosowaniem wzmacniaczy napięciowych. W następnych próbach planuje się zastosowanie wzmacniaczy ładunkowych, które są właściwsze do pomiarów wielkości quasi-statycznych [8].



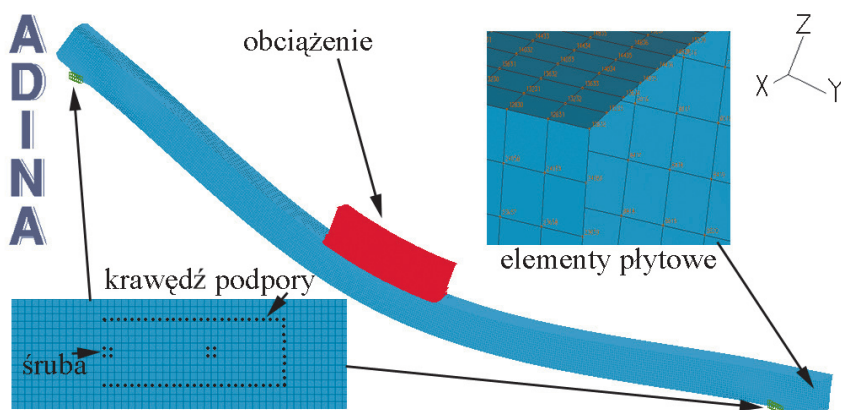
Rys. 5. Zależność napięcia otrzymanego z czujnika piezoelektrycznego od siły działającej na badany profil

Fig. 5. Force-voltage relationship obtained with the laboratory tests

4. NUMERYCZNE BADANIA SYMULACYJNE URZĄDZENIA

4.1. UWAGI OGÓLNE

Stosując program ADINA, wykorzystujący metodę elementów skończonych, zbudowano model profilu równoległe badanego laboratoryjnie (rys. 6). W modelu wykorzystano czterowęzłowe płytowe elementy skończone o wymiarach 5×5 mm, oparte na teorii Reissnera-Mindlina, dotyczącej płyt średniej grubości [15]. Warunki podparcia oraz zadawanego obciążenia w modelu numerycznym były analogiczne jak w przypadku badanej konstrukcji. W modelu numerycznym w węzłach zlokalizowanych na krawędziach podpór oraz śrub odebrano stopień swobody w kierunku pionowym – oś Z (rys. 6). Takie podejście odwzorowywało warunki podparcia stosowane w obiekcie rzeczywistym. Czujniki piezoelektryczne zamodelowano stosując procedurę zastępczą bazującą na metodzie stosowanej przez Preumonta i Pieforta [11]. Polega ona na pomiarze przemieszczeń liniowych oraz kątowych w węzłach elementów skończonych, pokrywających się z krawędziami czujnika. Procedura uwzględnia również grubość modelowanej płytki piezoelektrycznej oraz jej stałe materiałowe.



Rys. 6. Widok modelu numerycznego badanego profilu oraz obciążenia symulującego oddziaływanie koła pojazdu

Fig. 6. Numerical model of the beam under interaction of moving wheel

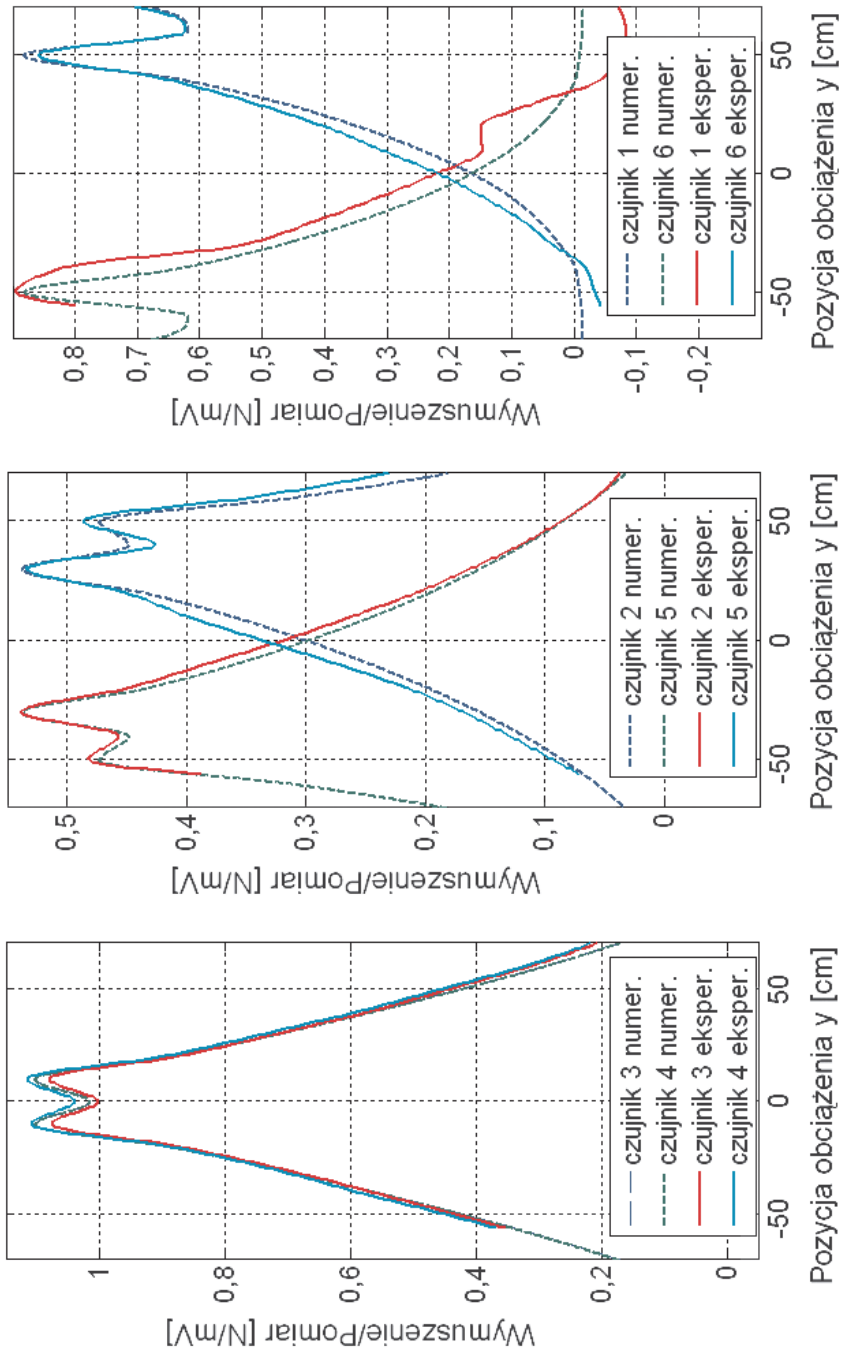
4.2. OCENA MODELU NUMERYCZNEGO

Przedstawiony model numeryczny zweryfikowano na podstawie wyników laboratoryjnych badań eksperymentalnych. Uzyskane rezultaty przedstawiono na rysunku 7. Wykresy ilustrują wartości amplitud sygnałów uzyskanych z sześciu czujników piezoelektrycznych w funkcji położenia obciążenia. Zbieżność wyników jest satysfakcjonująca. Potwierdza to poprawność przyjętych założeń w modelu numerycznym.

4.3. ANALIZA WPŁYWU ROZŁOŻENIA OBCIĄŻENIA POD KOŁEM

Zweryfikowany model numeryczny wykorzystano do przeprowadzenia analizy interakcji między kołem pojazdu a konstrukcją. Siły kontaktowe przedstawiono jako wektory sił, rozłożone na powierzchni strefy kontaktowej przesuwałcej się z każdym krokiem symulacji. Symulacje numeryczne miały na celu przeanalizowanie czynników wpływających na projektowane urządzenie ważące.

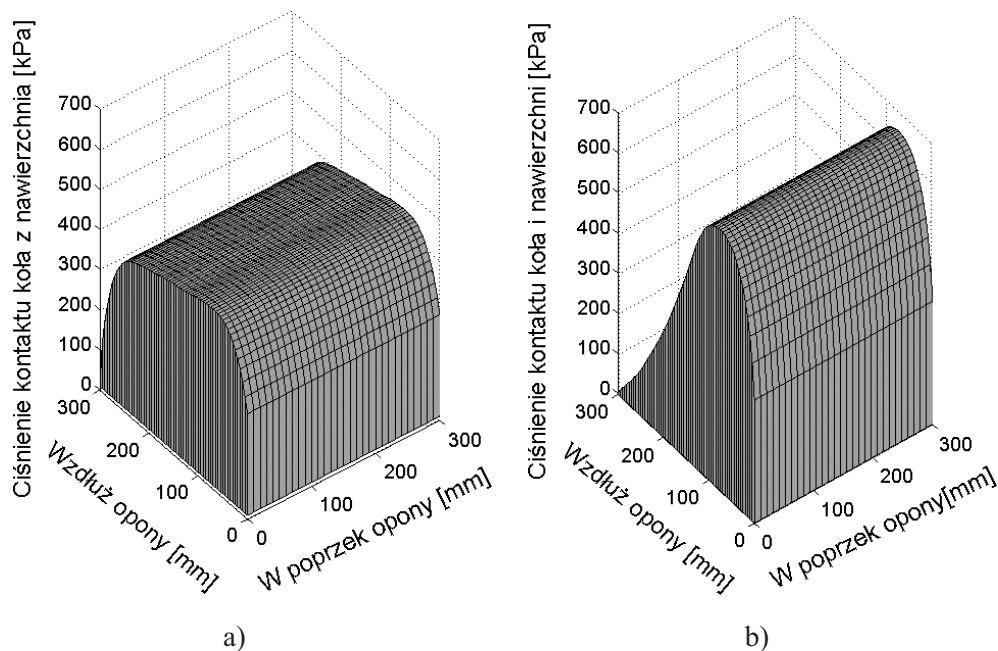
Jednym z czynników rozważanych w czasie testów numerycznych był wpływ rozłożenia obciążenia na odpowiedź konstrukcji. Z literatury [12, 13] wiadomo, że strefa kontaktu opony z nawierzchnią drogi zależy od takich czynników jak np.: wielkość opony, naciśnienia wewnętrznego oraz tego czy koło jest napędzane, czy toczy się swobodnie. W analizie pominięto zjawisko poślizgu, występujące w rzeczywistości.



Rys. 7. Porównanie rezultatów eksperymentalnych badań laboratoryjnych oraz wyników z symulacji komputerowej (na osiach odczytanych zaznaczono pozycję obciążenia wzdłuż badanego profilu)

Fig. 7. The comparison of experimental and numerical results (horizontal axis corresponds to the load position)

W badaniach symulacyjnych przyjęto dwa warianty rozłożenia obciążenia w strefie kontaktu ogumionego koła i nawierzchni (rys. 8). Jeden z nich opisywał rozkład nacisków koła napędzanego, a drugi – nienapędzanego. W obydwu przypadkach przyjęto jednakową wielkość strefy kontaktu o wymiarze 300×300 mm oraz jednakową sumaryczną wartość obciążenia.



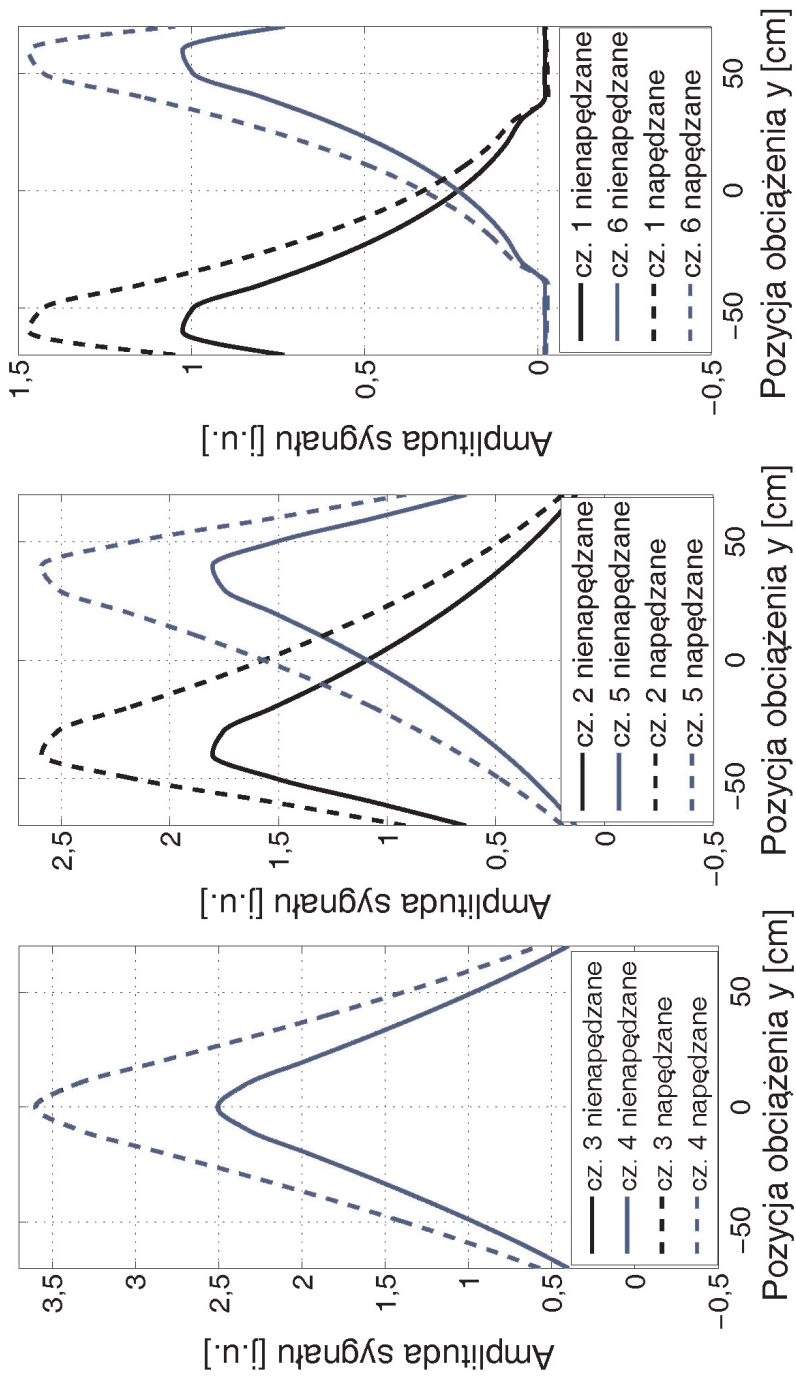
Rys. 8. Rozkład obciążeń zastosowany w modelu numerycznym:

a) koło toczone swobodnie, b) koło napędzane

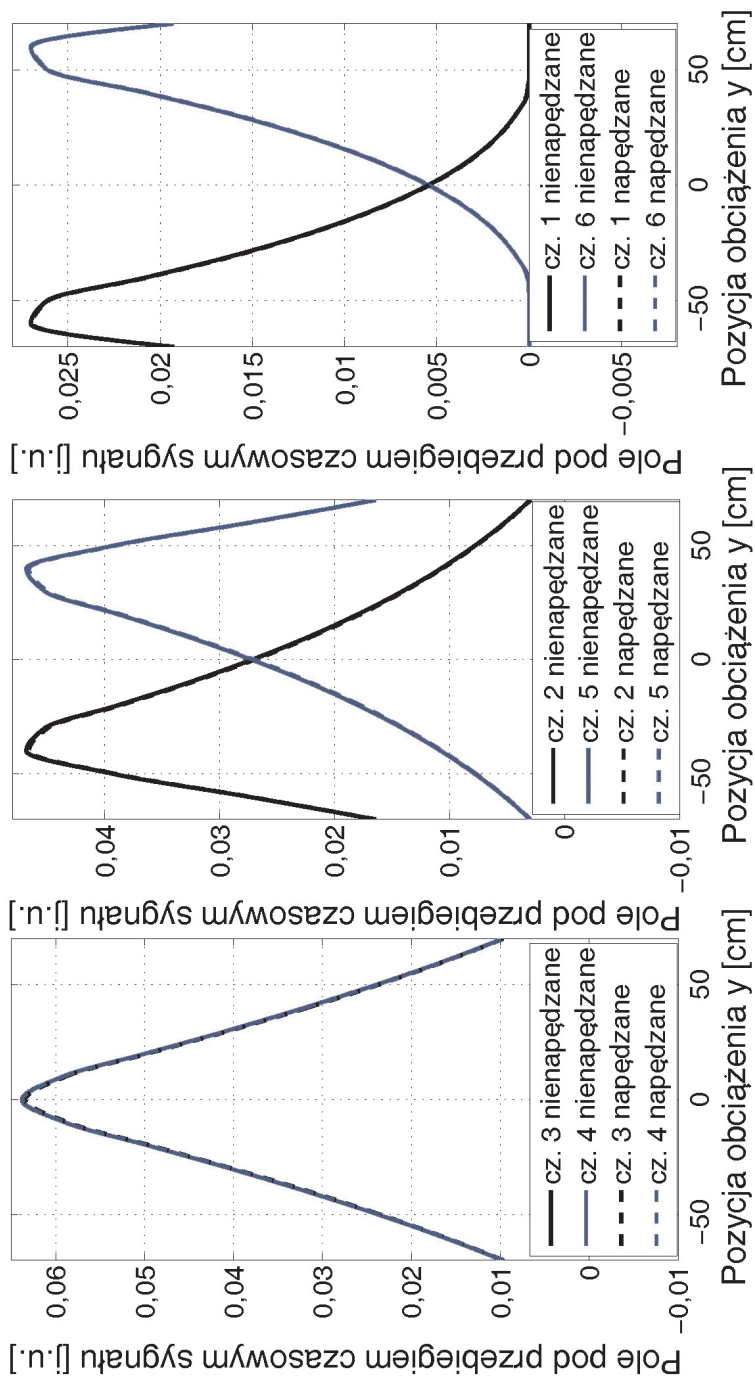
Fig. 8. Distribution of load used with numerical model: a) not driving wheel, b) driving wheel

Rysunek 9 przedstawia wyniki analizy wpływu rozkładu obciążenia na odpowiedź konstrukcji. Czynnikiem ten okazał się być istotny. Rysunek 9a ilustruje wpływ położenia obciążenia na wartość amplitudy sygnałów uzyskanych z modelowanych czujników.

W przypadku rozkładu obciążenia koła napędzanego uzyskano wyższe wartości amplitud sygnałów z czujników. Jest to wywołane wyższą wartością maksymalnej siły pionowej w strefie kontaktu. Z tego powodu identyfikacja obciążenia, opierająca się jedynie na wartości szczytowej zarejestrowanych sygnałów, wywołanych przejazdem kolejnych osi pojazdu byłaby obarczona błędem. Błąd zależałby od czynników związanych ze strefą kontaktu opony z nawierzchnią drogi. W celu zminimalizowania tego efektu do analizy przyjęto wartość pola pod krzywą ilustrującą przebieg sygnału zarejestrowanego podczas przejazdu obciążenia po badanym profilu (rys. 9b).



a)



b)

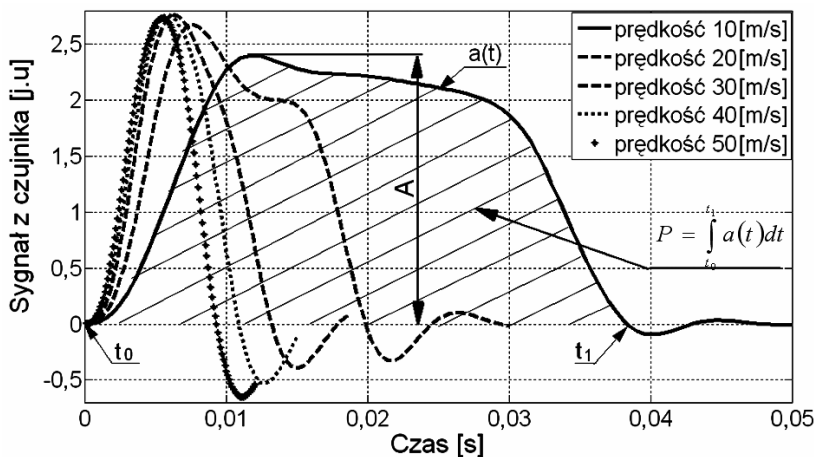
Rys. 9. Wpływ dystrybucji rozkładu obciążenia w funkcji jego pozycji: a) amplituda sygnałów generowanych przez modelowane czujniki, b) pole pod przebiegiem czasowym sygnału generowanego

Fig. 9. Load shape distribution effect: a) amplitude of the signal, b) area under the excitation position

4.4. ANALIZA WPŁYWU PRĘDKOŚCI PORUSZAJĄCEGO SIĘ POJAZDU

Badano wpływ prędkości przesuwanego się obciążenia. Przyjęto pięć różnych prędkości: 10 m/s, 20 m/s, 30 m/s, 40 m/s oraz 50 m/s. W każdym z przypadków wartość, rozkład i położenie obciążenia były jednakowe. Otrzymane wyniki przedstawiono na rysunku 10. Zaobserwowano niewielki wpływ prędkości na wartość szczytową sygnału otrzymanego z modelowanego czujnika. Szczególnie jest to zauważalne przy prędkości powyżej 30 m/s. Wynika stąd, że w przypadku metody ważenia pojazdu opartej na wartości amplitudy A mierzonego sygnału (rys. 10), bardzo precyzyjne określenie prędkości pojazdu nie wpływa istotnie na prawidłowe określenie jego masy.

Odmierna sytuacja występuje w przypadku innego podejścia tzn., gdy pole będące całką P funkcji sygnału w czasie $a(t)$ jest przyjmowane jako odpowiednik zidentyfikowanego obciążenia (rys. 10). Nietrudno bowiem zauważyć, że pole powierzchni pod wykresem sygnału z czujnika jest w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalne do prędkości poruszającego się obciążenia. Wynika to z różnego czasu kontaktu koła pojazdu ważonego z urządzeniem. Z tego powodu przy takiej metodzie identyfikacji masy, prędkość ważonego pojazdu musi być dokładnie określona. Podobne zjawisko zaobserwowali badacze w pracy [14].



Rys. 10. Sygnał z modelowanego czujnika nr 3 przy 5 różnych prędkościach obciążenia
Fig. 10. Measures obtained with sensor no. 3 by 5 different speed passage of load

5. ALGORYTM IDENTYFIKACJI OBCIĄŻENIA

W rzeczywistych warunkach drogowych pojazdy charakteryzują się różnymi parametrami technicznymi. Ich parametry kinematyczne ruchu zmieniają się w dość szerokim zakresie. Dlatego też algorytm identyfikujący obciążenia powinien uwzględniać: pozycję koła pojazdu y przejeżdżającego po belce pomiarowej, prędkość pojazdu v oraz wartość obciążenia działającego na belkę pomiarową AL . Podstawowym założeniem przyjmowanym w algorytmie jest linowa zależność między obciążeniem działającym na konstrukcję a sygnałami pomiarowymi generowanymi przez czujniki. Wynika to z niewielkich odkształceń belki w zakresie sprężystym.

W pierwszym kroku algorytmu wyznaczana jest prędkość ważonego pojazdu przejeżdżającego po urządzeniu pomiarowym. Najprostszą metodą jest użycie dwóch umieszczonych równolegle względem siebie na jednym pasie ruchu czujników nacisku, oddalonych od siebie o znaną odległość. Jest to o tyle zasadne, że nie powoduje dodatkowej komplikacji systemu ważenia i konieczności wyposażania go w czujniki prędkości. Innym rozwiązaniem może być zastosowanie dwóch pętli indukcyjnych określających prędkość.

Na podstawie testów numerycznych i laboratoryjnych stwierdzono istotny wpływ lokalizacji obciążenia działającego na belkę, na odpowiedź otrzymaną z czujników. Dlatego też pozycja obciążenia względem detektora nacisków musi być wyznaczona precyzyjnie. Może to zostać przeprowadzone przy wykorzystaniu zależności:

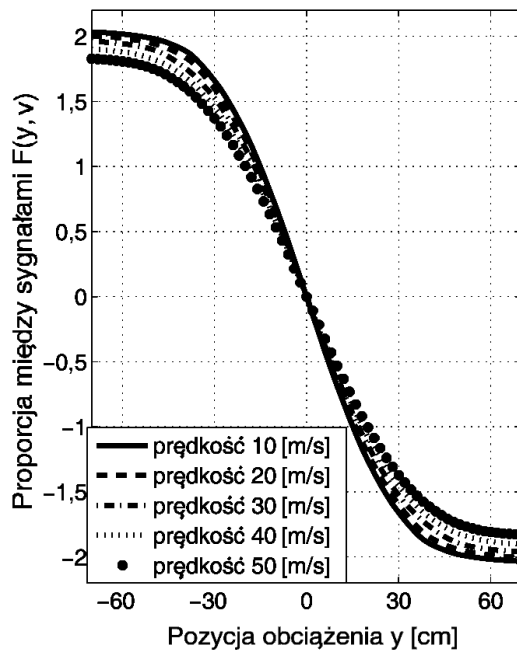
$$F(y, v) = \sum_a^n \frac{L_a - R_a}{L_a + R_a}, \quad (1)$$

gdzie funkcja $F(y, v)$ określa relację proporcji wartości sygnału z czujników (L – z lewej oraz R – prawej części belki) umieszczonych w odległości a względem środka belki, w zależności od pozycji obciążenia y i prędkości v . Korzystamy z faktu, iż użyta jako czujnik nacisku belka jest symetrycznie podparta, a czujniki są umiejscowione w sposób symetryczny względem jej środka. Par czujników może być kilka.

W eksperymencie stosowano dwie pary do lokalizacji obciążenia i dlatego zastosowano operację sumowania. Z analizy odpowiedzi belki, przy kilku wartościach prędkości, relacja $F(y, v)$ przybierała postać funkcji różnowartościowej w zależności od pozycji obciążenia (rys. 11). Oznacza to, że możliwe jest określenie pozycji obciążenia wykorzystując interpolację. Oczywiście jest, że niezbędne jest uprzednie zbudowanie bazy danych proporcji między sygnałami generowanymi przez pary czujników.

Identyfikacja wartości obciążenia wykorzystuje znajomość współczynnika kalibracji urządzenia $K_u(y, v)$, który jest opisany równaniem:

$$K_u(y, v) = \frac{AL_{EX}}{\sum_{i=1}^n P_{S_{EXi}}}. \quad (2)$$



Rys. 11. Proporcja między sygnałami otrzymanymi z symetrycznie umiejscowionych czujników

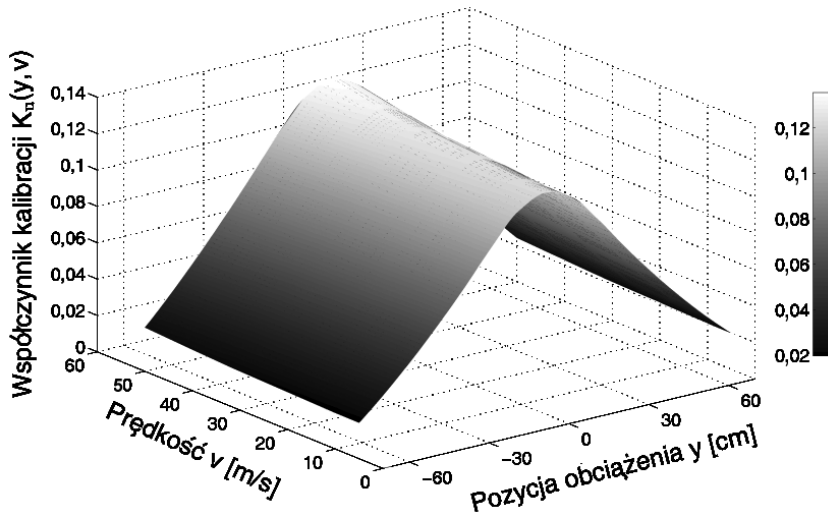
Fig. 11. Proportion of the signals obtained by means of symmetrically located sensors

Zależy on od właściwości elektromechanicznych urządzenia i może być wyrażony w [mV/N]. Na podstawie testów numerycznych zbudowano mapę współczynników kalibracji $K_u(y, v)$, uzależnionych od pozycji y i prędkością v zadanego obciążenia (rys. 12). Korzystano z relacji między obciążeniem przypadającym na oś pojazdu AL_{EX} a sumą pól pod sygnałami Ps_{EX} , wygenerowanymi przez i -te czujniki, zlokalizowane po środku detektora nacisków. Znajomość prędkości i położenia obciążenia umożliwia wyznaczenie aktualnej wartości współczynnika kalibracji $K_u(y, v)$. Wykorzystano w tym celu interpolację dwuwymiarową. W końcowym kroku algorytm identyfikuje obciążenie AL_M korzystając z zależności (3), która uwzględnia aktualnie zmierzone sygnały Ps z i -tych czujników umiejscowionych w środkowej części belki pomiarowej:

$$AL_M = K_u(y, v) \cdot \sum_{i=1}^n Ps_i . \quad (3)$$

Przedstawiony algorytm identyfikacji wykorzystuje technikę rozpoznawania wzorców nazywaną w literaturze anglojęzycznej *patern recognition*. Wymaga ona zbudowania mapy odpowiedzi konstrukcji w zależności od różnych wariantów obciążenia,

która jest pewną bazą danych. Można ją utworzyć dzięki symulacji komputerowej lub uzyskać z badań eksperymentalnych. W pracy wykorzystano kombinację obydwu sposobów.



Rys. 12. Mapa współczynników kalibracji urządzenia $K_u(y, v)$

Fig. 12. Solution map of scaling factors $K_u(y, v)$

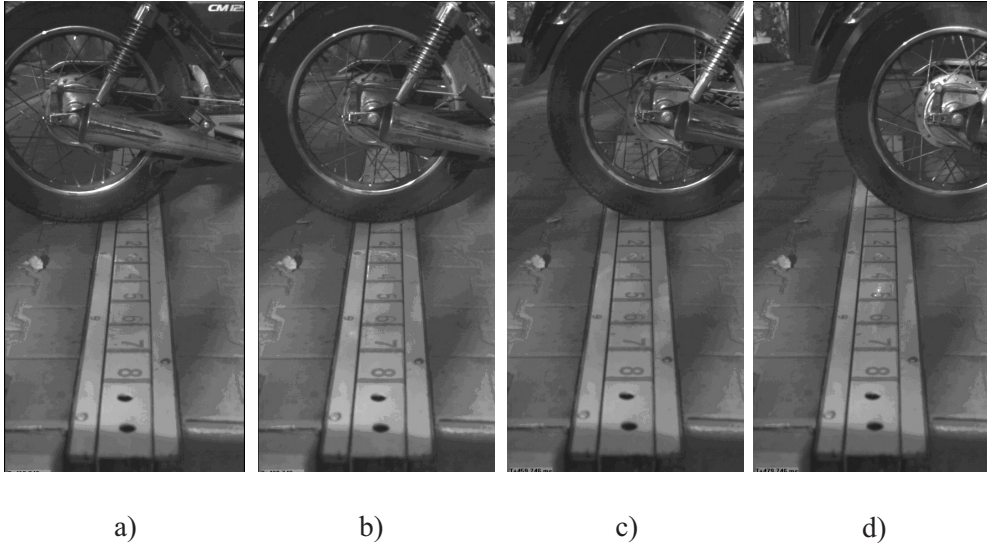
Oszacowanie obciążenia zależy od trzech parametrów: położenia obciążenia, prędkości oraz pola powierzchni pod przebiegiem sygnału. Możliwe jest uwzględnienie większej liczby czynników w przedstawionej procedurze. Wymaga to jednak zbudowania większej bazy danych, uzależniającej współczynniki kalibracji od większej liczby czynników, jak np. wpływu temperatury.

6. BADANIA W WARUNKACH POŁOWYCH

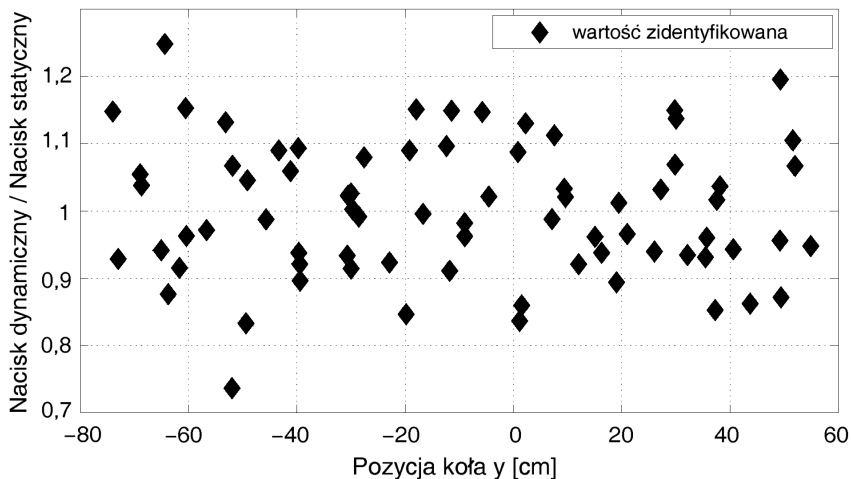
Koncepcję systemu ważenia pojazdów w ruchu i algorytm identyfikacji obciążeń dynamicznych sprawdzono w warunkach polowych. Belkę badaną w laboratorium wykorzystano w dalszym etapie do testów polowych. Przymocowano ją do specjalnie do tego celu przygotowanych podpór, stanowiących bazę. Całość została umieszczona tak, aby górna powierzchnia belki usytuowana była równo z powierzchnią drogi. Podczas badań przeprowadzono wiele prób przejazdów po zainstalowanym profilu. W pierwszej etapie wykorzystano do tego motocykl. Poszczególne fazy przejazdu zarejestrowane szybko kamerą. Sekwencję zdjęć przedstawiono na rysunku 13.

Sprawdzono wpływ położenia obciążenia na zmierzony sygnał, wygenerowany przez sześć czujników piezoelektrycznych. Wyznaczono wartości nacisku przypadającego na oś pojazdu. Zastosowano algorytm przedstawiony w poprzednim rozdziale.

Wykres na rysunku 14 przedstawia dokładność, z jaką określono obciążenia, jako funkcję położenia koła pojazdu przejeżdżającego przez belkę. Za wielkość referencyjną przyjęto nacisk zmierzony wagą statyczną.



Rys. 13. Zdjęcia wykonane szybką kamerą z przejazdu motocykla po badanym urządzeniu:
 a) 0 ms, b) 20 ms, c) 40 ms, d) 60 ms
 Fig. 13. High-speed snapshots of the motorbike cross over the Load Detecting Device:
 a) 0 ms, b) 20 ms, c) 40 ms, d) 60 ms



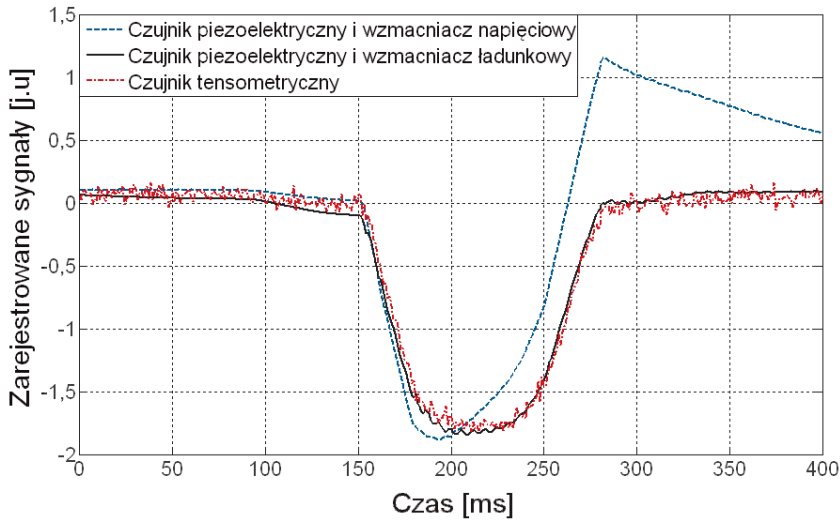
Rys. 14. Dokładność zidentyfikowanego obciążenia przypadającego na oś pojazdu
 Fig. 14. Precision of the axle load identification

W kolejnej fazie eksperymentu przeprowadzono badania z wykorzystaniem nowego profilu ważącego, z zastosowaniem różnych przetworników (rys. 15). Użyto czujników tensometrycznych połączonych w układzie półmostka. Wykorzystywano również czujniki piezoelektryczne. W torze pomiarowym zastosowano wzmacniacz ładunkowy i napięciowy. Czujniki pomiarowe podłączono do wzmacniaczy i umieszczono w niewielkiej odległości względem siebie. Można więc założyć, że mierzyły one bardzo zbliżoną wielkość mechaniczną.



Rys. 15. Widok zainstalowanego urządzenia ważącego na drodze publicznej
Fig. 15. New version of load detecting device mounted on public road

Porównanie zarejestrowanych przebiegów po ich normalizacji przedstawiono na rysunku 16. Prezentowane wyniki odpowiadają bardzo powolnemu przejazdowi (quasi-statycznemu) koła samochodu ciężarowego po belce pomiarowej. Przebiegi czasowe sygnałów zarejestrowanych czujnikiem tensometrycznym oraz czujnikiem piezoelektrycznym ze wzmacniaczem ładunkowym wykazują dużą zbieżność jakościową. Większe różnice widoczne są przy sygnale uzyskanym z czujnika piezoelektrycznego z zastosowaniem wzmacniacza napięciowego. Przebieg ten nie znajduje potwierdzenia w rzeczywistym odkształceniu belki obciążonej przejeżdżającym kołem pojazdu. Różnica w zarejestrowanych sygnałach przy zastosowaniu wzmacniaczy ładunkowych i napięciowych wynika z faktu, że wzmacniacze napięciowe nie przenoszą sygnału o niskiej częstotliwości. Cecha ta powoduje, że sygnał wzmacniany takim wzmacniaczem ma charakter pochodnej sygnału rzeczywistego. Należy zatem stwierdzić, że użycie wzmacniaczy napięciowych w piezoelektrycznych pomiarach wielkości wolnozmiennych nie jest zasadne.



Rys. 16. Porównanie wyników uzyskanych przy zastosowaniu różnych przetworników pomiarowych

Fig. 16. Comparison of results obtained with different measuring converter

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W artykule przedstawiono wstępne wyniki badań nowego typu układu pomiarowego, który może być zastosowany do ważenia pojazdów w ruchu. Omówiono ogólną koncepcję urządzenia oraz algorytm identyfikacji, wstępnie przetestowany w warunkach polowych. Przeanalizowano wpływ wybranych czynników: położenie, prędkość, kształt oraz intensywności narastania obciążenia dynamicznego oraz możliwość jego oszacowania.

Wykazano, że dokładność wymienionych parametrów wyraźnie jest uzależniona od jakości danych pomiarowych. Kluczowym aspektem prawidłowego działania proponowanej procedury jest przygotowanie bazy danych, zawierającej informacje dotyczące wpływu wybranych parametrów obciążenia na sygnał wygenerowany przez czujniki. Wykazano, iż baza danych może być uzyskana dzięki symulacjom komputerowym. Udowodniono, że wartość szczytowa zmierzonego sygnału nie jest dobrą reprezentacją obciążenia, w sytuacji gdy wielkość strefy kontaktu opony jest większa niż szerokość użytego przetwornika nacisku. Wstępne badania urządzenia wykazały, że dokładność identyfikacji nacisku koła na nawierzchnie drogi mieści się w przedziale około $\pm 20\%$. Można ją poprawić stosując kilka przetworników nacisku, ułożonych w szeregu na jednym pasie ruchu, tak by pomiar mógł być powtórzony. Wykazano, że w przypadku pomiaru czujnikami piezoelektrycznymi ważnym elementem wpływającym na określenie obciążenia jest zastosowanie odpowiednich wzmacniaczy sygnału w torze pomiarowym. Stwierdzono, że lepsze rezultaty można uzyskać stosując wzmacniacze ładunkowe.

Dalszym etapem prowadzonych pracy będzie zintegrowanie detektorów nacisku z pętłami indukcyjnymi. Ważne będzie również dostosowanie algorytmu identyfikacji w docelowym układzie pomiarowym i wyposażenie go w przyjazny interfejs użytkownika. Pozwoli to stworzyć gotowy produkt użytkowy.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Martin P.T., Feng Y., Fang X.*: Detector Technology Evaluation. Department of Civil Environmental Engineering, University of Utah, November 2003
- [2] *Gajda J., Sroka R.*: Wieloczujnikowa fuzja danych w systemach ważenia pojazdów w ruchu. PAK, **53**, nr 9 bis/2007, 542 - 545
- [3] *Gajda J., Sroka R., Stencel M., Wajda A., Żegleń T.*: Systemy ważenia pojazdów samochodowych w ruchu. Drogownictwo nr 3/2001
- [4] *Błoński T., Kowa A.*: Systemy ważenia pojazdów samochodowych w ruchu. Drogownictwo nr 3/2001
- [5] *Heidemann J., Silva F., Wang X., Giuliano G., Hu M.*: Sensors for Unplanned Roadway Events-Simulation and Evaluation. SURE-SE Project Final Report, May 2005
- [6] *Calderara R.*: Long-term stable quartz WIM sensors. National Traffic Data Acquisition Conference Albuquerque, New Mexico May 5-9, 1996
- [7] *Rosochowski A.*: Technical feasibility of a three-axis force transducer for measuring pressure and friction on the model die surface - prototype development. Journal of Materials Processing Technology, **115**, 2001, 192 - 204
- [8] *Mack O.*: Investigations of piezoelectric force measuring devices for use in legal weighing metrology. Measurement, **40**, 2007, 778 - 785
- [9] *Gautschi G.*: Piezoelectric Sensorics. Spriger-Verlag, Berlin 2002
- [10] *Ikeda T.*: Fundamentals of Piezoelectricity. Oxford University Press, 1990
- [11] *Preumont A., Piefort V.*: Finite element modeling of smart piezoelectric shell structures. 5th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics-Louvain-la-Neuve, May 2000
- [12] *Wang F., Machemehl R.*: Predicting Truck Tire Pressure Effects Upon Pavement Performance. SWUTC/06/167864-1, April 2006
- [13] *Silka W.*: Teoria ruchu samochodu. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2002
- [14] *Helg C., Pfohl L.*: Signal processing requirements for WIM LINEAS Type 9195. Kistler Instrumente Corp., Amherst, NY 2001
- [15] Theory and Modeling Guide, Vol. I: ADINA Solids & Structures, Report ARD 09-7, May 2009

INFORMACJE DODATKOWE

Praca wykonana przy wsparciu finansowym z projektów: „System monitorowania i diagnostyki konstrukcji o wysokim poziomie ryzyka awarii – SHMCS”, Nr R03 015 02, 2007-2010 oraz „Monitorowanie stanu technicznego konstrukcji i ocena ich żywotności – MONIT”, POIG.0101.02-00-013/08-00.

INVESTIGATION OF THE NEW WEIGHT IN MOTION SYSTEM

Abstract

Validation of a new methodology of loads identification generated by the traveling vehicles on the road surface is presented. The proposed approach is based on the concept of monitoring of strain development in a deformable body (Load Detecting Device, LDD) affected by a moving load. The paper is focused on the feasibility study of the new type of the Weight-In-Motion (WIM) concept. The research was aimed at the validation of the investigated technique, for the inverse problem algorithm which is dedicated for the proposed device. The research includes a computer simulation by means of the Finite Element Method used for the preliminary development of the LDD concept. Moreover, the laboratory tests were carried out for the preliminary experimental verification of the FE model and to obtain the calibration factors. Finally, a full-scale experimental validation of the WIM device has been performed in field tests.