

Cezary Bartmański*

KLASYFIKACJA POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH W RUCHU NA PODSTAWIE GENEROWANYCH PRZEZ NIE SYGNAŁÓW DRGANIOWYCH

Streszczenie

W artykule omówiono zagadnienie klasyfikacji pojazdów samochodowych, mające znaczenie dla automatyzacji pomiaru struktury i natężenia ruchu drogowego. Są to istotne parametry, które, oprócz parametrów wielkości akustycznych, wyznacza się podczas badań wibroakustycznych czynników obciążenia środowiska.

Podstawę działania algorytmów systemów pomiarowych stanowią pomiary liczby osi, odległości między osiami, rozmiarów liniowych przejeżdżającego pojazdu. Stosowane w badaniach przetworniki pomiarowe są kosztowne, a niejednokrotnie muszą być umieszczone w konstrukcji jezdni. Stanowi to istotne utrudnienie w wykorzystaniu ich w przenośnych systemach pomiarowych, instalowanych doraźnie w wybranych miejscach.

W związku z powyższym, zaproponowano klasyfikowanie pojazdów samochodowych na podstawie pomiarów drgań podłoża, przy wykorzystaniu wysoko czułych przetworników drgań, instalowanych w gruncie poza obszarem drogi. Spodziewanym efektem takiego rozwiązania powinna być mobilność systemu pomiarowego i relatywnie małe jego koszty.

W badaniach zastosowano klasyczny model procesu rozpoznawania obrazów, składający się z ekstraktora cech i klasyfikatora. Przyjęto w nich klasyfikację pojazdów w trzech kategoriach związanych z ich konstrukcją mechaniczną i pośrednio z masą.

Przedmiotem badań były drgania gruntu generowane przez przejeżdżające samochody; prowadzono cyfrową rejestrację sygnałów drganiowych. Utworzona baza danych pomiarowych zawierała 223 rejestracje.

W wyniku tych badań została opracowana metoda ekstrakcji cech charakterystycznych z sygnałów drganiowych. Podstawę tworzenia wektora cech charakterystycznych stanowiło rozwinięcie dyskretnej reprezentacji sygnału drganiowego w szereg funkcyjny z zastosowaniem metody analizy falkowej.

W artykule przedstawiono także wyniki badań związanych z poszczególnymi etapami opracowywania algorytmu ekstrakcji cech dotyczących wyboru rodzaju falki, określania liczby poziomów dekompozycji sygnałów drganiowych, określania sposobu obliczania wartości danej cechy itp.

Wyboru algorytmu klasyfikatora dokonano na drodze eksperymentalnej. Przebadano trzy algorytmy z wykorzystaniem metod minimalnoodległościowych, tj. algorytmów NN, kNN i MN. Algorytmy testowano w trybie *off line*. Porównując ich właściwości, dokonano wyboru najskuteczniejszego w przypadku omawianego zastosowania.

Prace programistyczne zrealizowano, wykorzystując platformę programową MATLAB. Wszystkie analizy i eksperymenty przeprowadzono za pomocą napisanych przez autora skryptów (m-plików).

Classification of automotive vehicles in motion on the basis of vibratory signals generated by them

Abstract

In the article an issue of automotive vehicles classification has been discussed, which is of great importance for the automatization of the measurement process of structure and traffic intensity. These are

* Główny Instytut Górnictwa.

crucial parameters, which apart from acoustic rate-level parameters, are determined during research of pollution burden attributed to vibroacoustic factors.

The basis of functioning of algorithms for measurement systems are measurements of axis number, distance between axes, linear size of moving vehicle. Utilized in research, measuring transducers are expensive but repeatedly have to be placed in the road structure. It is of considerable impediment in utilizing them in portable measurement systems, installed temporarily, in selected places.

In connection with the above, it has been proposed to classify automotive vehicles on the basis of surface vibration measurements, with the use of high-sensitivity vibration transducers, installed in the ground, outside the road area. The expected effect of such solution should be mobility of measurement system and its relatively low cost.

In the research, a classic model of image recognition process was utilized, which consists of feature extractor and classifier. A classification of vehicles in three categories was adopted, which are related to their mechanical construction and indirectly with their mass.

The subject of the research were surface vibrations generated by moving cars; a digital registration of vibratory signals was carried out. The database of measurement data, which was created, included 223 registrations.

As a result of this research, a method of extracting distinguishing features from vibratory signals was developed. The basis of creating a vector of distinguishing features was developing discrete representation of vibratory signal into function series, with the application of wavelet analysis method.

Moreover, the research results connected with respective stages of algorithm compilation for extraction of features related to selection of wavelet type, estimating number of decomposition levels of vibratory signals, determining method of estimating added value of the feature etc., were presented in the article.

The selection of algorithm for classifier development was made in experimental method. Three algorithms were examined with the use of minimum-distance method, i.e. algorithms NN, kNN and MN. Algorithms were tested in off line mode. Comparing their properties, a choice of most efficient algorithm was made, in case of the discussed application.

Programming work was realized with the use of MATLAB programming platform. All of the analyses and experiments were carried out with application of scripts (m-files) written by the author.

WPROWADZENIE I TEZA PRACY

Dynamiczny rozwój motoryzacji i będący jego następstwem zwiększający się udział transportu samochodowego w przewozie towarów jest przyczyną obserwowanego wzrostu natężenia ruchu drogowego. Według raportu Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad średni dobowy ruch pojazdów samochodowych (SDR) w 2005 roku wynosił 8224 poj./dobę i był większy o 18% w porównaniu z ruchem pojazdów w 2000 roku (Raport... 2006). Na drogach zwiększyła się liczba samochodów ciężarowych o dużej ładowności, podczas gdy istniejąca infrastruktura drogowa, projektowana w poprzednich dziesięcioleciach, nie była dostosowana do tak dużych obciążeń. Wzmożony ruch na drogach spowodował, że trasy komunikacyjne stały się dominującym źródłem zagrożenia hałasem o dużym zasięgu na obszarach zamieszkałych oraz źródłem zwiększonej emisji spalin. Jest to przyczyną wielu problemów związanych z utrzymaniem należytego stanu technicznego nawierzchni dróg i infrastruktury drogowej, właściwą organizacją ruchu w węzłach komunikacyjnych, zapewnianą płynność ruchu, planowaniem rozwoju sieci dróg i projektowaniem, powiązanych z nimi, konstrukcji inżynierskich, dostosowanych do wzrastających obciążeń itp.

Inne problemy z zakresu inżynierii środowiska wynikają z konieczności przeciwdziałania degradacji klimatu akustycznego i ochrony środowiska w otoczeniu tras ko-

munikacyjnych. Zgodnie z Dyrektywą Parlamentu Europejskiego z czerwca 2000 roku, kraje członkowskie UE są zobowiązane do podejmowania działań w zakresie unikania, zapobiegania oraz zmniejszania szkodliwych skutków dla zdrowia powodowanych działaniem hałasu w środowisku zewnętrznym. Do problematyki tej odnosi się również, opublikowana w 2002 roku, Dyrektywa 2002/49/WE (Directive of...). Wynika z niej obowiązek opracowywania map akustycznych dla dużych miast oraz zalecenie dotyczące ujednoczenia metod oceny klimatu akustycznego.

W przypadku ustawodawstwa krajowego, podstawą prawną do podejmowania działań umożliwiających walkę z nadmiernym hałasem w środowisku zewnętrznym jest ustawa z kwietnia 2001 roku Prawo ochrony środowiska. Ustawa ta zawiera również znowelizowane przepisy dostosowane do wymagań zawartych w Dyrektywie UE, w zakresie oceny (w tym stosowanych metod pomiarowych) i zarządzania hałasem w środowisku.

Rozwiązywanie powyższych problemów wymaga precyzyjnych danych dotyczących m.in. wielkości charakteryzujących ruch drogowy, tj. obciążenia poszczególnych tras komunikacyjnych, natężenia i struktury ruchu drogowego oraz zmian krótko- i długoterminowych tych parametrów. W badaniach wibroakustycznych czynników obciążenia środowiska, oprócz wyznaczania parametrów akustycznych, obligatoryjnie określa się również natężenie ruchu i strukturę pojazdów samochodowych w badanym rejonie.

Powyższa sytuacja stanowiła impuls do badań nad rozwojem systemów monitoringu ruchu drogowego, które obejmowały:

- klasyfikację pojazdów samochodowych (AVC, *Automatic Vehicle Classification*) (Gajda i in. 2000; Wei i in. 1996; Yuan 1994; Nooralahiyani i in. 1997),
- pomiary masy pojazdu w ruchu (WIM, *Weight-In-Motion*) (Gajda i in. 2001, 2006; Botwinowski, Piotrowski, Sroka 2006; States' Successful Practices... 1999).

W niniejszej publikacji omówiono pierwsze z wymienionych zagadnień.

Zasada działania systemów pomiarowych parametrów ruchu drogowego polega przede wszystkim na pomiarze liczby osi, odległości między osiami lub rozmiarów liniowych przejeżdżającego pojazdu. Wykorzystywane są w tym celu różnego typu przetworniki pomiarowe, jak: kamery, przetworniki laserowe, optoelektroniczne pętle indukcyjne, maty z czujnikami pojemnościowymi i tensometrycznymi, kable piezoelektryczne (European Commission... 2001; Cebon, Winkler 1992; Harlow, Peng 2001; Doupal 2000; Gajda i in. 2002). Wymagają one technicznie zaawansowanej zabudowy, na przykład większość z nich jest umieszczona w nawierzchni jezdni, co wprowadza zakłócenia w ruchu i znacząco wpływa na koszt instalacji systemu. Generalnie, duży koszt takich systemów predestynuje je do zastosowania w stałych miejscach (np. w węzłach komunikacyjnych, przy wjeździe na autostrady, mosty itp.).

Z tych względów, wykorzystanie powyższych rozwiązań w przenośnych systemach monitoringu, instalowanych doraźnie w wybranych miejscach, a także stosowanie ich na większą skalę w systemach wielopunktowych, obejmujących nadzorem większy obszar, jest w istotny sposób utrudnione. W takich przypadkach, w opinii autora, alternatywnym rozwiązaniem mogą być systemy monitoringu z wykorzystaniem wysoko czułych, tzw. sejsmicznych piezoelektrycznych przetworników drgań,

instalowanych w gruncie, poza obszarem jezdni. W systemach takich klasyfikacja pojazdów odbywałaby się na podstawie wyników analizy parametrów drgań gruntu, generowanych przez pojazdy.

Podstawowym mechanizmem generacji drgań w jezdni, w czasie ruchu pojazdów, są zmiany sił kontaktowych między kołami pojazdu i powierzchnią jezdni, spowodowane jej nieregularnością. Towarzyszy temu generowanie fal naprężeniowych, propagujących w otoczeniu (Cebon 1988).

Zakładając losowy stacjonarny charakter nieregularności powierzchni jezdni, można wykażać, że odpowiedź dynamiczna pojazdu, w postaci siły interakcji, oddziałującej na powierzchnię jezdni, jest zależna od jego parametrów konstrukcyjnych (Hunt 1987; Newland 1993). W opinii autora, informacje te można uzyskać w wyniku odpowiednio ukierunkowanej analizy sygnałów, co upoważniło do sformułowania następującej tezy:

TEZA PRACY:

Istnieje możliwość budowy klasyfikatora rodzaju poruszających się pojazdów samochodowych, działającego na podstawie wytwarzanych przez nie drgań podłoża.

Dowód powyższej tezy przeprowadzono przez realizację następującego celu pracy:

CEL PRACY:

Celem pracy było opracowanie metody ekstrakcji cech charakterystycznych z sygnałów generowanych w gruncie przez poruszające się pojazdy samochodowe i na ich podstawie określenie reguł klasyfikacji badanych obiektów.

Arbitralnie założono klasyfikację pojazdów w trzech kategoriach, związanych z ich konstrukcją mechaniczną i pośrednio z masą:

- kategoria I – samochody osobowe i dostawcze (do 3,5 t),
- kategoria II – samochody ciężarowe o dwu- i trzyosiowej konstrukcji podwozia oraz autobusy,
- kategoria III – samochody ciężarowe o konstrukcji podwozia liczącej więcej niż trzy osie.

Wzięto również pod uwagę użyteczność takiego podziału, stwarzającą w przyszłości, możliwość wykorzystania wyników dla wspomagania badań związanych z oceną oddziaływania tras komunikacyjnych na środowisko zgodnie z obowiązującymi aktami prawnymi (Rozporządzenie... 2007).

Przedstawiony problem stanowi zakres tematyki określanej w literaturze jako „rozpoznawanie obrazów” i dotyczy rozpoznawania przynależności rozmaitego typu obiektów (lub zjawisk) do pewnych, wcześniej zdefiniowanych klas.

W badaniach posłużono się klasycznym modelem procesu rozpoznawania obrazów składającym się z ekstraktora cech i klasyfikatora (Duda, Hart 1973). W modelu tym proces rozpoznawania jest dzielony na dwa etapy. W pierwszym etapie, cechy opisujące rozpoznawany obiekt są wydzielane ze zmierzonego sygnału. W drugim etapie, na zbiorze tych cech, dokonuje się obliczeń w celu podjęcia decyzji o przynależności obiektu do określonej klasy.

1. BAZA DANYCH POMIAROWYCH

Przedmiotem badań były drgania gruntu wywołane przez przejeżdżające pojazdy samochodowe. Podstawę badań stanowiły cyfrowe rejestracje sygnałów drganiowych, pochodzące od samochodów należących do wszystkich rozpatrywanych kategorii. Stąd pierwsza część pracy była poświęcona badaniom terenowym i tworzeniu bazy danych pomiarowych.

Zasadnicze pomiary terenowe sygnałów drganiowych zostały poprzedzone badaniami wstępnymi. W ich wyniku została określona konfiguracja stanowiska pomiarowego, tj. liczba i usytuowanie przetworników drgań względem drogi, kierunek mierzonych drgań oraz parametry akwizycji sygnałów zestawu aparatury.

W dalszych badaniach zdecydowano się więc wykonywać pomiary jedynie składowej pionowej drgań dla trzech przetworników, instalowanych w odległości $h_k = 1,5$ m od krawędzi jezdni.

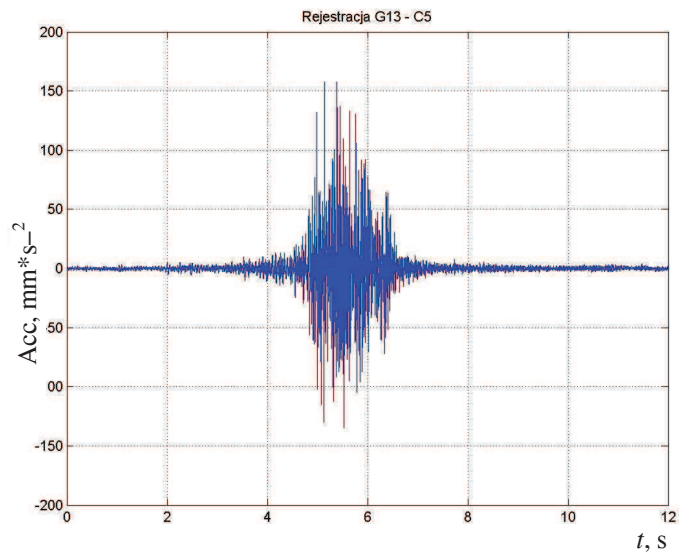
Podczas wszystkich badań przetworniki drgań mocowano do wbitych w grunt stalowych prętów o średnicy 15 mm i długości 250 mm. Pręty były zagłębione w grunt na całej długości. Przetwornik z prętem był łączony za pomocą stalowego wkrętu M5. Przy wyborze sposobu mocowania posiłowano się wynikami badań porównawczych różnych wariantów mocowania przetworników, prowadzonych przy współudziale autora, w ramach wcześniej realizowanego projektu badawczego (Lipowczan i in. 1999).

Obserwując cechy i charakter badanych sygnałów można, zgodnie z systematyką stosowaną w literaturze poświęconej analizie sygnałów (Szabatin 2000; Piersol 1989), zakwalifikować je jako sygnały niestacjonarne o charakterze przejściowym. Mają one postać paczek falowych o czasie trwania zależnym od prędkości pojazdu (rys. 1). Dla prędkości obserwowanej na drogach, czas ten mieścił się w granicach kilku sekund. Maksymalne przyspieszenie drgań wahało się w granicach od kilkunastu do kilkuset milimetrów na sekundę kwadrat (ok. 30 dB) i zależało od wielu czynników, przede wszystkim od masy i prędkości poruszających się pojazdów. W widmach drgań dominowały składowe w zakresie od kilku do kilkudziesięciu herców, a maksymalna częstotliwość obserwowana w widmach praktycznie nie przekraczała 150 Hz (rys. 2).

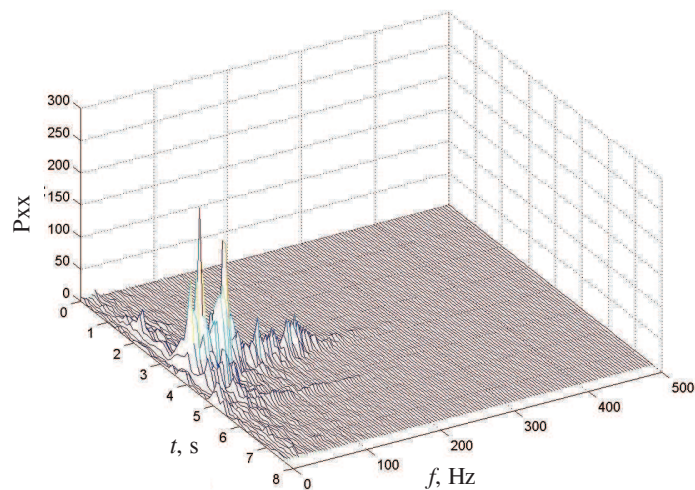
Na podstawie uzyskanych wyników, dla dalszych badań ustalono następujące parametry akwizycji systemu pomiarowego:

- zakres mierzonych przyspieszeń 500 mm/s²,
- górna częstotliwość graniczna pasma pomiarowego 250 Hz,
- częstotliwość próbkowania 1000 Hz.

Zgodnie z zasadami prawidłowego uzyskiwania próbek sygnałów (Sobczak, Malina 1985), zasadnicze pomiary drgań wykonano w trybie eksperymentu biernego, dla pięciu lokalizacji stanowiska badawczego, zapewniających zróżnicowanie warunków badań. Do wykonania badań wytypowano odcinki dróg o nawierzchni bitumicznej, jednojezdniowych z dwoma pasami, o umiarkowanym natężeniu ruchu drogowego. Obserwowane zróżnicowanie prędkości poruszających się pojazdów zawierało się w granicach 40–120 km/h.



Rys. 1. Przebieg czasowy drgań gruntu wywołanych przejazdem samochodu ciężarowego: t – czas
Fig. 1. Time progress of surface vibration caused by movement of a motor truck: t – time



Rys. 2. Spektrogram sygnału wytwarzanego przez samochód ciężarowy
Fig. 2. Spectrogram of a signal triggered by a motor truck

Rejestracje sygnałów drganiowych wykonywano wraz z jednoczesną, wizualną klasyfikacją pojazdów, generujących te sygnały. Każdej rejestracji przypisywano wynik tej klasyfikacji w postaci numeru kategorii i symbolu rodzaju samochodu.

Utworzona, w wyniku realizacji tego etapu badań, baza danych sygnatur drganiowych pojazdów samochodowych, zawierała 223 rejestracje pojazdów należących do wszystkich rozpatrywanych kategorii. Stanowiła ona punkt wyjścia do kolejnego etapu badań, polegającego na wyznaczeniu zbioru cech charakterystycznych, na pod-

stawie których prowadzono rozpoznawanie pojazdów oraz opracowaniu metody ich ekstrakcji.

2. EKSTRAKCJA CECH

Cechami są mierzalne właściwości obiektu. Uporządkowany zbiór cech, przyna-
leżny danemu obiektowi, stanowi wektor cech charakterystycznych.

Wybór cech warunkuje skuteczność procesu rozpoznania. Niestety nie ma efek-
tywnych metod wyboru takich cech i w związku z tym właściwy kierunek poszukiwań
może dać przede wszystkim znajomość zagadnień związanych z zadaniem rozpozna-
wania. Struktura przestrzeni cech jest więc ustalana arbitralnie.

Jako podstawowy sposób tworzenia wektora cech charakterystycznych wybrano
rozwińnięcie dyskretnej reprezentacji sygnału drganiowego w szereg funkcyjny.

Zgodnie z postawioną tezą, sygnał drganiowy jest przetwarzany w celu uzyskania
informacji o jego indywidualnych cechach, zawartych w jego widmie. Rozpatrywano
zatem możliwość wykorzystania takich szeregów funkcyjnych, których funkcje skła-
dowe (analizujące) odwołują się do różnych zakresów częstotliwościowych analizo-
wanego pasma sygnałów. W konsekwencji, współczynniki ich rozwinięć zawierały
pożądane informacje z różnych zakresów częstotliwościowych widma (Batko i in.
2005). Zważywszy na postać czasową badanych sygnałów, drugą ważną cechą
branych pod uwagę szeregów funkcyjnych, była możliwość analizy lokalnych właści-
wości tych sygnałów. Analizę sygnałów o powyższych właściwościach zapewniało
rozwińnięcie sygnału w szereg funkcyjny, względem zbioru funkcji dobrze zlokalizo-
wanych w dziedzinie czasu i częstotliwości (Białasiewicz 2004).

Do przetwarzania sygnałów niestacjonarnych, w celu uzyskania informacji o ich
lokalnych widmach częstotliwościowych, wykorzystano metodę analizy falkowej.
Podstawą tej analizy jest dekompozycja sygnału na podstawie zbioru ortogonalnych
funkcji bazowych, nazywanych falkami. Zbiór funkcji bazowych generowany jest
drogą operacji skalowania i przesuwania, w dziedzinie czasu, falki podstawowej (tzw.
falki matki). Dekompozycja umożliwia przedstawienie sygnału w postaci superpozycji
falek. Współczynniki tej superpozycji, zwane współczynnikami falkowymi, są okre-
ślane przez transformatę falkową sygnału (Białasiewicz 2004). Wartości współczyn-
ników falkowych są miarą stopnia korelacji między sygnałem i falką. Optymalny
dobór falki umożliwia odwzorowanie sygnału za pomocą niewielkiej liczby współ-
czynników falkowych.

W badaniach wykorzystano dyskretną transformatę falkową, zdefiniowaną dla
dyskretnych wartości parametrów skali i przesunięcia. Do jej wyznaczenia zastosowa-
no iteracyjny algorytm Mallata z wykorzystaniem zestawu cyfrowych filtrów kwadra-
turowych: dolnoprzepustowego i górnoprzepustowego (Białasiewicz 2004; Mallat
1999). Proces filtracji był realizowany w dziedzinie czasu jako operacja splotu sygna-
łu i odpowiedzi impulsowej filtru.

Sprecyzowanie algorytmu ekstrakcji cech wymagało rozwiązania kilku proble-
mów dotyczących wyboru rodzaju falki, określenia liczby poziomów dekompozycji,
określenia sposobu obliczania wartości danej cechy itp.

Wybór rodzaju falki jest uwarunkowany kształtem przebiegu czasowego badanych sygnałów w celu uzyskania możliwie silnej korelacji sygnału z małą liczbą falek bazowych. Wyboru falki dokonano eksperymentalnie na podstawie trzech rejestracji reprezentujących trzy kategorie pojazdów. Zbadano wpływ rodzaju falki na wartości maksymalne uzyskiwanych współczynników falkowych. Przebadano wszystkie falki ortogonalne, dostępne w przyborniku Wavelet Toolbox programu Matlab – łącznie 25 falek.

Żadna z falek nie wyróżniła się zdecydowanie od pozostałych tak, aby umożliwić w sposób jednoznaczny wybór „najlepszej” dla procesu ekstrakcji cech. Falki, które generowały duże wartości współczynników dla jednego typu sygnału, nie zawsze zachowywały tę właściwość w przypadku pozostałych typów sygnałów.

Aby ocenić ilościowo uzyskane wyniki, dla każdej falki obliczono parametr będący sumą wartości współczynników dla trzech sygnałów testujących. Umożliwiło to jednoznaczne uszeregowanie falek według wartości tego parametru. W takim ujęciu, dla czterech falek, tj. db11, sym7, dmey i coif4, uzyskano największe i jednocześnie bardzo zbliżone wartości. W wyniku tych badań nie stwierdzono, aby dla badanej klasy sygnałów określony rodzaj falki, dostępnej w programie Matlab, był szczególnie przydatny w procesie ekstrakcji cech. Niemniej kilka falek wyróżniało się pod tym względem korzystnie, co pozwoliło na ograniczenie zestawu falek do wymienionych czterech w dalszych badaniach.

Istotną sprawą w procesie ekstrakcji cech charakterystycznych było określenie liczby poziomów dekompozycji sygnałów, gdyż decyduje ona o wymiarze wektora cech. Sekwencja pobieranych do analizy próbek $N = 8192$ dawała możliwość uzyskania 14 poziomów dekompozycji. Analiza sygnałów zrekonstruowanych na podstawie współczynników falkowych poszczególnych poziomów dekompozycji wskazuje na duże zróżnicowanie energii tych sygnałów.

Jako kryterium wyboru liczby poziomów analizy zastosowano arbitralnie określone kryterium energetyczne, zgodnie z którym w dalszym przetwarzaniu były uwzględniane jedynie składniki dekompozycji, koncentrujące w sumie nie mniej niż 97% energii sygnału.

Na podstawie analizy sygnałów, przeprowadzonej w celu określenia procentu energii sygnału pozostałego na wybranych poziomach dekompozycji, po usunięciu poziomów nieistotnych, można było stwierdzić, że ograniczenie dekompozycji sygnału do pięciu poziomów w satysfakcjonujący sposób spełniało kryterium wyboru.

Kolejna seria badań została wykonana w celu określenia minimalnej długości okna pomiarowego, co wiązało się ze zmniejszeniem wymaganej liczby próbek dla prawidłowego przebiegu procesu rozpoznania. Uzyskane wyniki wykazały, że okno pomiarowe może być zawężone do 512 próbek, bez istotnych zmian wartości maksymalnych współczynników falkowych, dla wybranych poziomów analizy. Odpowiadało to skróceniu czasu wymaganego do analizy rejestracji do około 0,5 s.

Składowe wektora cech charakterystycznych były obliczane na podstawie ciągu współczynników dekompozycji wybranych poziomów. Wartość składowej została zdefiniowana jako wartość elementu ciągu współczynników danego poziomu dekompozycji o największej wartości bezwzględnej.

Wynik obliczeń zespołu cech dla danego obiektu, w postaci wektora cech, był zapisywany w pamięci komputera jako element ciągu uczącego dla dalszych badań związanych z opracowaniem algorytmu klasyfikacji pojazdów.

3. OCENA JAKOŚCI WEKTORÓW CECH

Ocenę jakości wektorów cech przeprowadzono w celu zarówno oceny wyboru struktury przestrzeni cech (liczby klas i ich składu), jak i wartościowania własności dyskryminacyjnych wektorów uzyskanych metodą dekompozycji falkowej sygnałów drganiowych, dla różnego rodzaju falek.

Ocena wyboru struktury przestrzeni cech stanowiła weryfikację arbitralnie przyjętego założenia podziału pojazdów samochodowych na trzy kategorie i przynależności do nich różnych grup pojazdów.

W związku z powyższym, dla różnych wariantów podziału samochodów na kategorie, wykonano badania w celu stwierdzenia, czy obrazy pojazdów należących do tej samej kategorii wykazują tendencję do grupowania się z jednoczesną separacją od obiektów innych kategorii. Na podstawie wyników grupowania określono najkorzystniejszy podział samochodów na kategorie, z uwagi na skuteczność procesu klasyfikacji.

Podstawę przyjętego kryterium oceny stanowiło określenie stopnia wzajemnej separacji obrazów poszczególnych kategorii pojazdów w przestrzeni cech (Duda, Hart 1973; Sobczak, Malina 1985; Basztura 1996; Fukunaga 1990). W świetle tego kryterium, dla ustalonej liczby klas, za optymalny należy uznać taki sposób grupowania, który daje maksymalną wartość parametru G_1 , zdefiniowanego wzorem

$$G_1 = \frac{\det(\mathbf{S}_T)}{\det(\mathbf{S}_w)}$$

gdzie:

\mathbf{S}_T – macierz rozproszenia globalnego,

\mathbf{S}_w – macierz całkowitego rozproszenia wewnętrznego.

Przebadano dziesięć wariantów podziału samochodów na kategorie. Uzyskane wyniki wykazały, że obrazy poszczególnych rodzajów pojazdów mają tendencję do grupowania się. Oznacza to, że wektory cech charakterystycznych, uzyskane opisaną metodą dekompozycji falkowej sygnałów drganiowych, mają właściwości dyskryminacyjne.

Największą wartość parametru G_1 uzyskano dla wariantu grupującego w jednej kategorii samochody osobowe i dostawcze oraz duże samochody ciężarowe z autobusami. Drugi co do wartości, niemniej gorszy wynik, uzyskano dla wariantu zgodnego z arbitralnie przyjętym założeniem klasyfikacji. Wskazywał on na większe podobieństwo sygnałów drganiowych generowanych przez autobusy do sygnałów drganiowych generowanych przez duże samochody ciężarowe w porównaniu z sygnałami generowanymi przez ciężarówki dwu- i trójosiowe. Zmiana zaszeregowania autobusów z kategorii II do kategorii III powinna prowadzić do większej skuteczności całego procesu klasyfikacji.

W drugim etapie badań porównano i oceniono własności dyskryminacyjnych wektorów cech uzyskanych za pomocą różnych falek, a następnie wybrano falki dające najlepszy wynik, pozwalający w konsekwencji zapewnić największą skuteczność klasyfikacji. Badania wykonano dla czterech falek, wytypowanych w wyniku omówionej już wstępnej selekcji, tj. db11, sym7, dmey, coif4. Tak jak poprzednio, kryterium oceny bazowało na określeniu stopnia wzajemnej separacji obrazów poszczególnych kategorii pojazdów w przestrzeni cech. Ilościową ocenę zbiorów wektorów cech, generowanych przez różne falki, zgodnie z przedstawioną ideą, przeprowadzono, wykorzystując miarę, którą można interpretować jako iloraz średniej odległości między kategoriami do średniego odchylenia wektorów poszczególnych kategorii od ich wektora średniego. W świetle tego kryterium oceny, większa wartość miary odpowiada korzystniejszym właściwościom dyskryminacyjnym.

Najlepszy wynik uzyskano w przypadku wektorów cech generowanych za pomocą falki 'sym7' oraz nieco gorszy dla wektorów generowanych za pomocą falek coif4 i db11. Z tego względu dalsze badania skuteczności różnych algorytmów klasyfikatora zdecydowano się prowadzić dla tych trzech wymienionych falek.

4. ALGORYTMY KLASYFIKATORA

Ostatni etap badań był związany z wyborem klasyfikatora. Znanych jest wiele algorytmów klasyfikacji, brak jednak przesłanek do wybrania najefektywniejszego algorytmu do danego zastosowania. W tej sytuacji zdecydowano się, dla określonego zbioru wektorów cech charakterystycznych, przeanalizować kilka algorytmów klasyfikacji i, na podstawie porównania skuteczności ich działania, wskazać najlepsze rozwiązanie zagadnienia, jakim jest klasyfikacja pojazdów samochodowych.

Z uwagi na brak danych odnośnie do rozkładów funkcji gęstości prawdopodobieństwa wektorów cech poszczególnych kategorii dla powyższego zadania, klasyfikację pojazdów zdecydowano się przeprowadzić metodami nieparametrycznymi, zgodnie z którymi proces rozpoznawania odbywa się na podstawie informacji zawartych w ciągu uczącym, tj. w zbiorze wektorów cech pojazdów, dla których jest znana prawidłowa klasyfikacja.

Do badań wybrano trzy algorytmy, tj. NN (najbliższego sąsiada), kNN (k najbliższych sąsiadów) i NM (najbliższej mody) (Tadeusiewicz, Flasiński 1991). W przypadku algorytmu kNN, testowano pięć jego wariantów, dla wartości parametru $k = 2-6$ z zamiarem wybrania wariantu zapewniającego największą skuteczność rozpoznawania. We wszystkich tych przypadkach testowano również wpływ wyboru metryki przestrzeni cech na skuteczność klasyfikacji. Rozpatrywano cztery metryki: Manhattan, Manhattan uogólnioną, Euklidesa i Euklidesa uogólnioną (Tadeusiewicz, Flasiński 1991; Cholewa 1981).

Cały powyższy program badań realizowano dla trzech, wyselekcjonowanych wcześniej, rodzajów falek, tj. db11, sym7 i coif4.

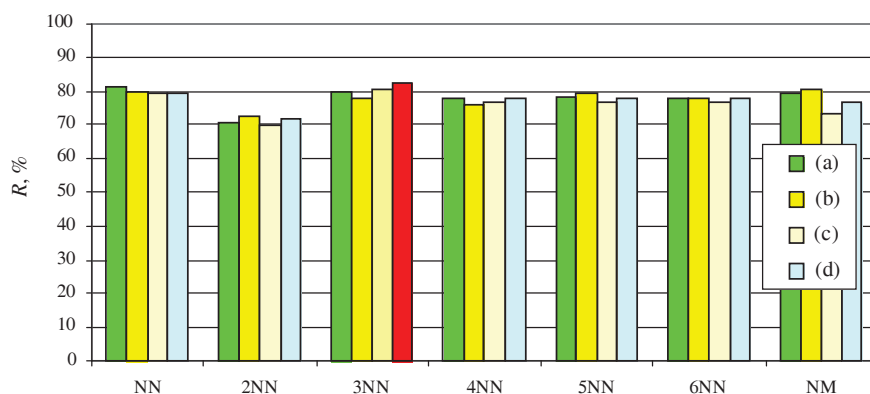
Badania skuteczności działania algorytmów prowadzono w trybie *off line* dla zestawu rejestracji testujących zarchiwizowanego w bazie danych pomiarowych. Skuteczność działania algorytmu została zdefiniowana jako stosunek liczby prawidłowych

rozpoznań do liczby rejestracji testujących. W badaniach wykorzystano trzy metody testowania, określane w literaturze jako (Sobczak, Malina 1985; Couvreur 1997):

- H (*hold-out*) – metoda bazująca na dwóch rozłącznych ciągach: ciągu uczącym i ciągu testującym,
- R (*resubstytucji*) – metoda z wykorzystaniem ciągu uczącego również jako ciągu testującego,
- U (*leave-one-out*) – ze zbioru rejestracji jest wybierana jedna, traktowana jako rejestracja testująca; pozostała część zbioru jest traktowana jako zbiór uczący; ten sposób postępowania był powtarzany w stosunku do każdej rejestracji.

Metoda H jest oceniana jako metoda dająca zbyt pesymistyczne wyniki klasyfikacji. Metoda R, w przeciwieństwie do poprzedniej, jest oceniana jako metoda testowania dająca zbyt optymistyczną ocenę skuteczności klasyfikacji. Metoda U stanowi wariant pośredni między wymienionymi wcześniej metodami.

Jako ilościowy wynik osiągniętej skuteczności klasyfikacji samochodów, w opinii autora, najbezpieczniej jest przyjmować wartość uzyskaną dla najlepiej ocenionego algorytmu, testowanego metodą H. Można wówczas stwierdzić, z dużą dozą prawdopodobieństwa, że skuteczność klasyfikacji pojazdów samochodowych nie jest gorsza niż wynik uzyskany w tym wariancie badań. Zestawienie skuteczności klasyfikacji badanych algorytmów, testowanych metodą H, dla „najskuteczniejszej” falki, przedstawiono na rysunku 3. Na rysunku tym kolorem czerwonym wyróżniono najkorzystniejszy wariant – uzyskana dla niego wartość skuteczności klasyfikacji R wynosiła 82,6%.



Rys. 3. Porównanie skuteczności R algorytmów klasyfikatora, testowanych metodą H – falka 'sym7': a – metryka Manhattan, b – metryka Euklidesa, c – metryka Manhattan uogólniona, d – metryka Euklidesa uogólniona

Fig. 3. Comparison of efficiency R of algorithms for classifier, tested with a method H – wavelet 'sym7': a – Manhattan metric, b – Euclidean metric space, c – generalized Manhattan metric, d – generalized Euclidean metric

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

1. W wyniku realizacji celu badań z wykorzystaniem klasycznego modelu procesu rozpoznawania obrazów, opracowano metodę klasyfikacji pojazdów samochodowych, na podstawie generowanych przez nie drgań gruntu. Podstawę metody stanowi ekstrakcja cech drogą dekompozycji falkowej sygnałów drganiowych i algorytm klasyfikatora kNN z eksperymentalnie dobraną wartością parametru k .
2. Zastosowano metodę badawczą polegającą na: obserwacji i opisie zjawiska, sformułowaniu hipotezy wyjaśniającej obserwację, prognostycznym wykorzystaniu hipotezy oraz jej eksperymentalnej weryfikacji.
3. Stwierdzono, że wektory cech, generowane metodą z wykorzystaniem dekompozycji falkowej sygnałów drganiowych, charakteryzują się właściwościami dyskryminacyjnymi, dla poszczególnych kategorii pojazdów samochodowych. Umożliwiło to prowadzenie procesu rozpoznawania i klasyfikacji tych obiektów.
4. Nie stwierdzono, aby dla badanej klasy sygnałów określony rodzaj falki był szczególnie przydatny w procesie ekstrakcji cech, jakkolwiek kilka falek wyróżniało się pod tym względem korzystnie. Najlepsze właściwości dyskryminacyjne wykazywały wektory cech generowane przy wykorzystaniu falki 'sym7'.
5. Algorytm klasyfikacji został wybrany eksperymentalnie spośród algorytmów, tzw. minimalnoodległościowych, z zastosowaniem jednej z czterech metryk: Manhattan, Euklidesa, Manhattan uogólniona i Euklidesa uogólniona. Do testowania algorytmów zastosowano trzy metody testowania określone w literaturze jako metody: H, R, U. Najlepsze wyniki klasyfikacji uzyskano w przypadku algorytmu kNN, z parametrem $k = 3$, z wykorzystaniem wektorów cech generowanych za pomocą falki 'sym7', stosując uogólnioną metrykę Euklidesa. Dla metody testowania H, dającej ostrożne wyniki oceny, skuteczność ta wynosiła około 82%.

Powyższe wnioski dowodzą prawdziwości tezy, sformułowanej na początku rozprawy doktorskiej.

Uzyskane wyniki umożliwiają podjęcie próby implementacji metody klasyfikacji pojazdów samochodowych w systemie automatycznego pomiaru natężenia i struktury ruchu drogowego, pracującego w czasie rzeczywistym.

Nie w pełni satysfakcjonujące wyniki, w porównaniu z oczekiwaniami, skłoniły autora do określenia tematyki dalszych badań. Badania powinny obejmować następujące zagadnienia:

- Zwiększenie liczby cech drogą dekompozycji dominujących składowych wektora cech z zastosowaniem pakietów falkowych (*wavelet packed*). Jest to równoważne zwiększeniu rozdzielczości analizy częstotliwościowej określonego fragmentu widma sygnałów drganiowych.
- Podjęcie próby zdefiniowania własnej falki, lepiej reprezentującej charakterystyczne komponenty badanej klasy sygnałów drganiowych.
- Włączenie do zbioru cech charakterystycznych, dodatkowych cech, uwzględniających parametry określone na podstawie postaci czasowej sygnałów drganiowych.

Literatura

1. Basztura C. (1996): Komputerowe systemy diagnostyki akustycznej. Warszawa, PWN.
2. Batko W., Dąbrowski Z., Engel Z., Kiciński J., Weyna S. (2005): Nowoczesne metody badania procesów wibroakustycznych. Biblioteka Problemów Eksploatacji, Radom.
3. Białasiewicz J. (2004): Falki i aproksymacje. Warszawa, WNT.
4. Botwinowski T., Piotrowski R., Sroka R. (2006): Zastosowanie sieci neuronowych w procesie estymacji nacisku statycznego osi poruszających się pojazdów. PAK nr 10 bis (wydanie specjalne dodatkowe).
5. Cebon D. (1988): Theoretical road damage due to dynamic tyre forces of heavy vehicles. Part 1: Dynamic analysis of vehicles and road surface. Proc. Inst. Mech. Engrs Vol. 202, No. C2.
6. Cebon D., Winkler B. (1992): Multiple-Sensor Weigh-in-Motion: Theory and Experiments. Technical Report. University of Cambridge, Transportation Research Group.
7. Cholewa W. (1981): Ocena stanu maszyn metodami wibroakustycznymi. Praca Naukowo-Badawcza. Gliwice, Politechnika Śląska.
8. Couvreur C. (1997): Environmental Sound Recognition: A Statistical Approach. Thesis.
9. Directive of European Parliament and of the Council relating to the assessment and management of environmental noise, 2002/49/EC.
10. Doupal E. (2000): Practical Application of Weigh-in-Motion Systems with Quartz Crystal Sensors. 24th Int. Baltic Road Conference, 21–23 Aug, Riga, Latvia.
11. Duda R., Hart P. (1973): Pattern Classification and Scene Analysis. John Wiley & Sons, Inc.
12. European Commission DG VII – Transport, 4th Framework Programme Transport. Weigh-in-Motion of Axles and Vehicles for Europe (WAVE). General Report, 2001.
13. Fukunaga K. (1990): Introduction to Statistical Pattern Recognition. Academic Press Inc.
14. Gajda J., Sroka R., Stencel M., Żegleń T. (2000): Metody klasyfikacji pojazdów samochodowych w ruchu. PAK nr 4.
15. Gajda J., Sroka R., Stencel M., Żegleń T. (2001): Systemy ważenia pojazdów samochodowych w ruchu. Drogownictwo nr 3.
16. Gajda J., Sroka R., Stencel M., Żegleń T. (2002): Pomiary parametrów ruchu drogowego. PAK nr 5/6.
17. Gajda J., Sroka R., Stencel M., Żegleń T. (2006): Analiza dokładności systemów MS-WIM kalibrowanych metodą pojazdu wstępnie ważonego. PAK nr 10bis (wydanie specjalne dodatkowe).
18. Harlow Ch., Peng S. (2001): Vehicle Identification and Classification System with Range Sensors. Transportation Research, Part C: Emerging Technologies, Vol. 9, issue 4, Aug 2001, s. 231-247.
19. Hunt H. E. M. (1987): Measuring and Modelling of Traffic Induced Ground Vibration. Ph. D. Thesis. University of Englad.
20. Lipowczan A. i inni (1999): Aparatura wraz z procedurami metrologicznymi nowej generacji do pomiaru parametrów drgań mechanicznych emitowanych do środowiska przez pojazdy drogowe. Projekt badawczy własny nr 7 T07G 032 12.
21. Mallat S. (1999): A Wavelet Tour of Signal Processing. Academic Press.
22. Newland D. E. (1993): An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis. Longman Scientific & Technical, 3rd edition.
23. Nooralahiyan A.Y. i in. (1997): A Field Trial of Acoustic Signature Analysis for Vehicle Classification. Transportation Research-C. Vol. 5, No. 3/4.
24. Piersol J. S. (1989): Random Data. John Wiley & Sons.
25. Prawo ochrony środowiska. Dz. U. Nr 62 poz. 627 z dnia 27 kwietnia 2001 r.

26. Raport (2006): Generalny pomiar ruchu 2005 – synteza wyników. Raport wykonany na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad. Biuro Projektowo-Badawcze Dróg i Mostów, TRANSPROJEKT-WARSZAWA.
27. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 2 października 2007 roku w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów poziomów w środowisku substancji lub energii przez zarządzającego drogą, linią kolejową, linią tramwajową, lotniskiem, portem. Dz. U. Nr 192, poz. 1392.
28. Sobczak W., Malina W. (1985): Metody selekcji i redukcji informacji. Warszawa, WNT.
29. States' Successful Practices Weight-in-Motion Handbook (1999) US Department of Transportation. Federal Highway Administration.
30. Szabatin J. (2000): Podstawy teorii sygnałów. Warszawa, WKŁ.
31. Tadeusiewicz R., Flasiński M. (1991): Rozpoznawanie obrazów. Warszawa, PWN.
32. Wei C. i in. (1996): Vehicle Classification Using Advanced Technologies. Transportation Research Record 1551.
33. Yuan X. i in. (1994): Computer Vision System for Automatic Vehicle Classification. ASCE Journal of Transportation Engineering Vol. 120, No. 6

Recenzent: prof. dr hab. inż. Adam Lipowczan