
AKADEMIA GÓRNICZO - HUTNICZA

IM. STANISŁAWA STASZICA w KRAKOWIE

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI i ELEKTRONIKI

KATEDRA METROLOGII



ROZPRAWA DOKTORSKA

Piotr Burnos

Autokalibracja systemów ważących pojazdy
samochodowe w ruchu oraz analiza i korekcja
wpływu temperatury na wynik ważenia

Promotor: Prof. dr hab. inż. Janusz Gajda

Na ręce Pana Profesora Janusza Gajdy składam serdeczne podziękowania za opiekę naukową, cenne uwagi podczas pisania pracy oraz życzliwość i cierpliwość. Za wskazanie właściwego kierunku na mej "drodze naukowej".

Dziękuję również całemu zespołowi Katedry Metrologii AGH za wsparcie i życzliwość.

Spis treści

1. Wstęp	5
2. Ważenie pojazdów samochodowych w ruchu	9
2.1 Rozwój systemów ważących pojazdy samochodowe	17
2.2 Dokładność systemów ważących	21
2.3 Rodzaje czujników nacisku stosowanych w systemach WIM	25
2.4 Struktura systemów WIM	31
2.5 Przyczyny błędów pomiarowych w systemach WIM z czujnikami polimerowymi	36
2.6 Kalibracja systemów WIM	40
2.6.1 Metoda pojazdu wstępnie zważonego	41
2.6.2 Metoda pojazdu oprzyrządowanego	42
2.6.3 Metoda pojazdu odniesienia	43
2.7 Podsumowanie	50
3. Modelowanie systemu WIM z czujnikami polimerowymi	51
3.1 Opis właściwości systemów WIM wyposażonych w taśmowe czujniki polimerowe	51
3.2. Model matematyczny i symulacyjny procesu identyfikacji niestacjonarności systemu WIM	55
3.2.1 Model odniesienia	57
3.2.2 Model nacisku osi pojazdów odniesienia	59
3.2.3 Model zmienności czynników atmosferycznych	64
3.2.4 Model algorytmu estymacji nacisku statycznego	65
3.2.5 Model wyznaczany	66
3.3 Identyfikacja parametryczna systemu WIM z czujnikami polimerowymi	66
3.3.1 Weryfikacja modelu odniesienia	67
3.3.2 Badanie wpływu parametrów algorytmu na błędy identyfikacji współczynników modelu wyznaczanego	68
3.3.3 Eksperymentalne wyznaczenie modelu systemu WIM	71
3.4 Podsumowanie	72
4. Autokalibracja i korekcja temperaturowa wyników ważenia	74
4.1 Autokalibracja	74
4.1.1 Modyfikacja algorytmu	78
4.2. Korekcja temperaturowa wyników ważenia	80
4.3 Badania symulacyjne	82

4.3.1 Wybór funkcji wagi	84
4.3.2 Autokalibracja i korekcja temperaturowa wyników ważenia - ocena właściwości metod.....	88
4.3.3 Autokalibracja i korekcja temperaturowa – charakterystyki wielowymiarowe i analiza korelacyjna przebiegów czasowych	94
4.4 Podsumowanie.....	101
5. Badania eksperymentalne.....	103
5.1 Analiza korelacyjna przebiegów czasowych.....	103
5.2 Ocena dokładności systemu WIM.....	105
5.2.1 Wyniki ważenia statycznego.....	106
5.2.2 Ocena dokładności systemu WIM metodą pojazdów wstępnie zważonych.....	108
5.3 Podsumowanie.....	119
6. Zakończenie	120
DODATEK A – Automatyczna Klasyfikacja Pojazdów ALT.....	122
Bibliografia	134

1. Wstęp

Wszyscy jesteśmy użytkownikami dróg publicznych. Jako kierowca, pasażer, klient firmy kurierskiej, czy zwykły konsument, każdy z nas korzysta z dobrodziejstw transportu samochodowego. Sieć dróg swym zasięgiem obejmuje obecnie niemal cały glob, a XXI wiek oferuje możliwość odbycia podróży samochodowej z Gibraltaru aż po Pekin we wschodnich Chinach. Infrastruktura drogowa przejęła funkcje dawnych szlaków handlowych łącząc miasta siecią nowoczesnych dróg i autostrad. Funkcjonowanie i rozwój współczesnych społeczeństw opiera się o ich zdolność do szybkiej i bezpiecznej migracji jak również o transport towarów drogą lądową. Rozbudowa i utrzymanie sieci dróg jest niewątpliwie dużym wyzwaniem w erze intensywnego rozwoju motoryzacji. Drogi w coraz większym stopniu narażone są na zniszczenie w skutek nadmiernej eksploatacji, głównie przez samochody ciężarowe, a pojazdy przeciążone są głównym czynnikiem pogarszającym stan dróg i mostów.

W tym świetle ochrona infrastruktury drogowej nabiera szczególnego znaczenia, gdyż ogranicza niszczący wpływ pojazdów najcięższych na stan nawierzchni i zapewnia znamionowe warunki eksploatacji drogi. Jednym z podstawowych narzędzi takiej ochrony jest kontrola wagi pojazdów najcięższych, która polega na pomiarze nacisków poszczególnych osi oraz masy całkowitej pojazdu. Do tego celu stosuje się dwa rodzaje wag samochodowych. Pierwszą grupę stanowią wagi statyczne, najczęściej są to przenośne wagi do pomiaru nacisków osi lub stacjonarne wagi platformowe umożliwiające pomiar masy całkowitej pojazdu. Użycie takich wag wymaga skierowania pojazdu na specjalnie przygotowane stanowisko kontrolne i zatrzymania go, co uzasadnia nazwę „wagi statyczne”. Efektywność takich kontroli jest bardzo mała, ale istotną zaletą jest duża dokładność uzyskiwanych wyników ważenia, dzięki czemu na podstawie pomiaru możliwe jest wyeliminowanie pojazdu przeciążonego z ruchu drogowego i nałożenie kary pieniężnej na właściciela pojazdu. Druga grupa wag samochodowych to tak zwane systemy WIM (Weigh In Motion - Ważenie w Ruchu), których czujniki pomiarowe montowane są na stałe pod nawierzchnią jezdni, w głównym przekroju drogi. W najprostszym przypadku jeden lub dwa czujniki nacisku umieszcza się w nawierzchni w taki sposób, że osie ważonego pojazdu przetaczają się kolejno przez te czujniki. Taka konfiguracja systemu umożliwia kontrolę wagi podczas ruchu pojazdu z prędkością drogową, często bez świadomego udziału kierującego. Ważeniu poddawany jest każdy pojazd poruszający się pasem ruchu, na którym zainstalowany jest system, co znacznie zwiększa efektywność kontroli. Podstawową wadą systemów WIM jest ograniczona dokładność ważenia, co uniemożliwia wykorzystanie tych systemów jako wag administracyjnych. Ograniczenie to wynika głównie z dwóch przyczyn. Po pierwsze nacisk, jaki wywiera koło jadącego pojazdu na nawierzchnię nie jest stały, a składowa zmienna wywołana pionowymi wahaniami pojazdu może sięgać 40% wartości składowej stałej nacisku. W chwili pomiaru, który trwa pojedyncze milisekundy, nacisk osi na czujnik może więc znacznie odbiegać od nacisku wyznaczonego w warunkach statycznych. Problem ten można częściowo rozwiązać poprzez zastosowanie większej liczby czujników na ścieżce ruchu pojazdu, zebranie większej liczby próbek nacisku i ich

uśrednienie. Ta koncepcja ewoluowała w kierunku tak zwanych systemów MS-WIM (Multi Sensor - WIM), które są rozwinięciem idei systemów jedno-, lub dwuczujnikowych. Niezależnie jednak od liczby zainstalowanych w asfalcie czujników nacisku, dokładność ważenia jest ograniczona przez jeszcze jeden czynnik. Niestacjonarność systemu, rozumiana jako zmiany jego parametrów w czasie, może w ciągu zaledwie 24 godzin wywołać zmiany wyników ważenia sięgające 50%. Zjawisko to jest ściśle powiązane z rodzajem użytych do budowy systemu czujników nacisku i największego znaczenia nabiera w przypadku zastosowania piezoelektrycznych czujników polimerowych montowanych pod nawierzchnią jezdni. Pośredniczenie asfaltu w przenoszeniu sygnału pomiarowego na czujnik powoduje, że wyniki ważenia są wrażliwe na zmiany właściwości nawierzchni. Asfalt jest materiałem, którego cechy fizyczne takie jak lepkość czy sprężystość zależą od czasu obciążenia i temperatury. Wraz z nagrzewaniem (lub schładzaniem) materiał ten zmienia konsystencję, co ma wpływ na sygnał pomiarowy docierający do czujnika nacisku i co w konsekwencji wywołuje niestacjonarność systemu WIM. Pomimo, że konstruktorzy systemów ważących mają świadomość występującego problemu, to zjawisko to nie zostało dotychczas dokładnie zbadane. W dostępnych na rynku rozwiązaniach komercyjnych można spotkać algorytmy, które mają ograniczyć wpływ zmian temperatury asfaltu na wyniki ważenia, są to jednak metody proste, niejednokrotnie nie poparte żadnymi badaniami naukowymi.

Skuteczne ograniczenie wpływu niestacjonarności na właściwości systemu ważącego, a tym samym poprawa dokładności wyników ważenia, jest założeniem leżącym u podstaw prowadzonych przez autora badań. Celem pracy jest opisanie właściwości systemów WIM wyposażonych w polimerowe (piezoelektryczne) czujniki nacisku pod kątem ich niestacjonarności oraz opracowanie metod eliminacji wpływu niestacjonarności systemu na dokładność wyników ważenia. W pracy przedstawiono dwie nowe metody realizujące to założenie: autokalibrację systemów WIM oraz korekcję temperaturową wyników ważenia. Przystępując do realizacji wymienionego celu sformułowano dwie tezy:

1. Autokalibracja systemów ważących pojazdy samochodowe w ruchu pozwala na skuteczną korekcję błędów ważenia spowodowanych zmiennością parametrów systemu.

2. Znajomość modelu opisującego wpływ temperatury na właściwości systemów ważących pojazdy w ruchu, wyposażonych w taśmowe czujniki piezoelektryczne pozwala na skuteczną, bieżącą korekcję błędów ważenia.

W pracy przedstawiono spojrzenie na problem niestacjonarności systemów WIM z punktu widzenia metrologii, a więc z perspektywy prac badawczych prowadzonych w celu zwiększenia dokładności uzyskiwanych wyników pomiaru. W tym świetle niniejsza rozprawa stanowi kompletny opis działań podjętych przez autora w kierunku poprawy dokładności ważenia pojazdów w ruchu z wykorzystaniem systemów WIM wyposażonych w polimerowe

czujniki nacisku. W celu udowodnienia powyższych tez oraz słuszności drogi jaką przebył autor w trakcie badań nad systemami WIM w pracy przedstawiono:

- opis właściwości systemów WIM wyposażonych w polimerowe czujniki nacisku, ze szczególnym uwzględnieniem niestacjonarności systemu,
- metodę identyfikacji czynników wywołujących niestacjonarność systemu WIM, oraz model niestacjonarności rzeczywistego systemu ważącego,
- ideę metody autokalibracji systemów WIM oraz korekcji temperaturowej wyników ważenia,
- wyniki badań symulacyjnych, których celem było określenie wrażliwości zaproponowanych metod na zmiany parametrów systemu WIM,
- wyniki badań eksperymentalnych rzeczywistego systemu WIM, których celem było określenie dokładności wyników ważenia w systemie z autokalibracją i korekcją temperaturową.

Praca składa się z 6 rozdziałów, dodatku A, który jest poświęcony autorskiej metodzie klasyfikacji pojazdów samochodowych, oraz spisu literatury. Tematyka kolejnych rozdziałów jest dobrana tak, aby w logiczny i nie wywołujący irytacji u czytelnika sposób, wprowadzić go w problematykę ważenia pojazdów samochodowych w ruchu oraz przedstawić wyniki badań dotyczących metody autokalibracji i korekcji temperaturowej wyników ważenia. Rozdział pierwszy, bieżący, zawiera krótkie wprowadzenie w tematykę pracy, tezy pracy oraz jej krótki opis. Rozdział drugi, najobszerniejszy, oparty jest o przegląd literatury i stanowi wprowadzenie w szeroko rozumianą problematykę kontroli wagi pojazdów ciężarowych. Zawartość tego rozdziału jest wynikiem przekonania autora o tym, że „przejście od ogółu do szczegółu” jest dobrą drogą do pełnego zrozumienia każdego problemu. Z tego powodu w pierwszej kolejności opisano zjawisko oddziaływania pojazdów najcięższych na nawierzchnię oraz konsekwencje ruchu takich pojazdów na polskich drogach. Następnie przedstawiono rozwój, budowę oraz schematy klasyfikacji systemów WIM ze względu na ich dokładność. Zwieńczeniem rozdziału drugiego jest opis przyczyn wywołujących błędy pomiarowe w systemach WIM z czujnikami polimerowymi oraz charakterystyka klasycznych metod kalibracji takich systemów. W rozdziale trzecim opisano właściwości systemów WIM wyposażonych w polimerowe czujniki nacisku oraz przedstawiono metodę identyfikacji niestacjonarności takiego systemu. Zbadano wrażliwość zaproponowanej metody identyfikacji na zmiany parametrów algorytmu i na tej podstawie określono wartości parametrów minimalizujące błędy identyfikacji. W końcowej części rozdziału trzeciego, przedstawiono wynik identyfikacji niestacjonarności rzeczywistego systemu WIM. Wyznaczony w ten sposób model posłużył jako podstawa opisanych w rozdziale czwartym badań symulacyjnych metody autokalibracji i korekcji temperaturowej. Celem badań symulacyjnych było określenie wpływu zmiany siedmiu parametrów systemu ważącego na błędy wyników ważenia. Wyznaczony model systemu WIM oraz wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych pozwoliły na świadome zastosowanie obydwu metod w praktyce. Rozdział piąty zawiera wyniki badań eksperymentalnych, które przeprowadzono na stanowisku WIM zainstalowanym w miejscowości Gardawice. Głównym celem

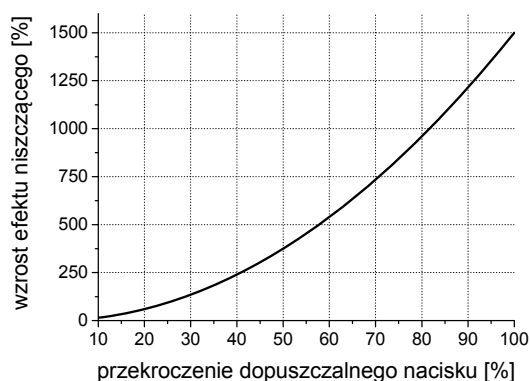
eksperymentów było określenie dokładności wyników ważenia w sytuacji, gdy w systemie zastosowano klasyczną metodę kalibracji (metodą pojazdu wstępnie zważonego) i opracowane przez autora metody alternatywne. Przedstawione w rozdziale piątym wyniki oraz wnioski są podstawą wykazania prawdziwości tez tej rozprawy. Ostatni, szósty rozdział zawiera podsumowanie.

2. Wążenie pojazdów samochodowych w ruchu

Do negatywnych zjawisk występujących w szeroko rozumianym transporcie drogowym należy zaliczyć (GDDKiA 2009):

- zły stan techniczny pojazdów,
- łamanie przepisów dotyczących okresów prowadzenia pojazdów oraz obowiązkowego czasu odpoczynku kierowcy,
- łamanie zasad regulujących transport zwierząt, materiałów niebezpiecznych czy szybko psujących się,
- świadome przeciążanie pojazdów.

Wszystkie te zjawiska mają charakter patologii i jako takie powinny być eliminowane. Istotne zagrożenie dla bezpieczeństwa ruchu niesie świadome przeciążanie pojazdów przez firmy przewozowe. Eksperci zgodnie przyznają, że pojazdy takie są głównym czynnikiem mającym wpływ na pogarszanie stanu dróg i mostów (Chatti, Lysmer i Monismith 1994), (Kulakowski 1994), (Gillespie i Karamihas 1994), (Bhatti, Molinas-Vega i Stoner 1996), (Błażejowski 1998), (Minnesota 1999), (Giergowicz, i inni 2000), (COST 347 2003), (Mechowski, Sybilski i Harasim 2006), (Raab, Partl i Partl 2005), (Van Boxel i Van Saan 2008), (Peters, Timm i Turochy 2008), (Pavements - FHWA 2009). Nawet nieznacznie przeciążone pojazdy tj. te, których masa całkowita lub nacisk pojedynczej osi w niewielkim stopniu przekraczają dopuszczalne normy (Dz.U. RP Nr 103 2004), (Dz.U. RP. Nr 169 2004), powodują istotną degradację nawierzchni jezdni. Zjawisko ma charakter nieliniowy i wzrasta z czwartą potęgą nacisku osi na nawierzchnię (Bergan, i inni 1998), (F. Van Loo 2001). Oznacza to, że przekroczenie dopuszczalnych norm o 10% powoduje 45% wzrost efektu niszczącego.



Rys. 2.1 Zależność wzrostu efektu niszczącego nawierzchnię drogi od stopnia przeciążenia pojazdu

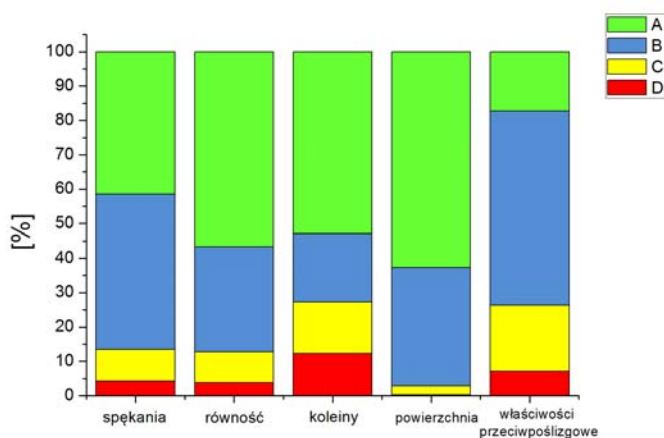
W konsekwencji destrukcyjnych oddziaływań pojazdów przeciążonych zdolność do przenoszenia obciążeń przez nawierzchnię maleje, następuje tzw. stopniowa utrata nośności, a w momencie osiągnięcia przez nawierzchnię stanu granicznego nośności powstają uszkodzenia strukturalne lub spękania zmęczeniowe (IBDiM 1997), (Wardęga 2006), (Chatti, Manik i Brake 2008), (Morgan, i inni 2008), (WSDOT 2009).

Deformacje trwałe takie jak koleiny, odkształcenia podłoża pod konstrukcją nawierzchni, spękania czy ubytki warstwy ścieralnej są pośrednim lecz poważnym zagrożeniem dla bezpieczeństwa ruchu. Skalę tego zjawiska w Polsce obrazuje coroczny raport Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad na temat stanu technicznego nawierzchni sieci dróg krajowych (GDDKiA 2009). Zawarte w tym dokumencie dane zbierane są dzięki prowadzonym pomiarom cech eksploatacyjnych nawierzchni i obejmują drogi krajowe o łącznej długości ponad 17 tys. kilometrów. Przy ocenie stanu nawierzchni brane są pod uwagę następujące cechy: stan spękań, równość podłużna, głębokość kolein, stan powierzchni oraz właściwości przeciwpślizgowe. Poszczególne cechy nawierzchni odnoszone są do skali czterostopniowej (klasy A, B, C, D), której interpretację przedstawia tabela 2.1.

Tabela 2.1 Klasyfikacja stanu nawierzchni wg GDDKiA

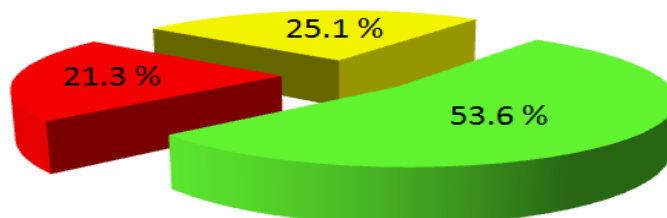
Klasa A - stan dobry	Nawierzchnie nowe i odnowione nie wymagające remontów
Klasa B - stan zadowalający	
Klasa C - stan niezadowalający	Nawierzchnie z uszkodzeniami wymagające zaplanowania remontów
Klasa D - stan zły	Nawierzchnie z uszkodzeniami wymagające natychmiastowych remontów

Natychmiastowej interwencji służb utrzymania wymagają odcinki dróg zakwalifikowane do kategorii D, a drogi z oceną w klasie C objęte są stałym nadzorem i w horyzoncie kilku lat wymagają zabiegów remontowych. Zasadniczym zestawieniem informującym o stanie nawierzchni dróg krajowych jest rozkład ocen w powyższej skali, dla poszczególnych cech eksploatacyjnych. Na koniec 2008 roku rozkład ten wyglądał następująco:



Rys. 2.2. Ocena stanu cech eksploatacyjnych nawierzchni sieci dróg krajowych.

Po uogólnieniu stanu technicznego poszczególnych parametrów w ocenę globalną, stan sieci dróg krajowych można przedstawić jak w tabeli 2.2:



Stan nawierzchni:	[km]	[%]
Dobry	9511,5	53,6
Niezadawalający	4456,7	25,1
Zły	3769,9	21,3
Razem:	17738,1	100

Tabela 2.2. Ogólna ocena stanu technicznego nawierzchni sieci dróg krajowych na koniec 2008 roku

Z tabeli 2.2 wynika, że niemal 50% sieci dróg krajowych wymaga różnego rodzaju remontów, z czego 21.3% wymaga interwencji natychmiastowej (3769 km). Oszacowane na tej podstawie potrzeby finansowe na modernizację i utrzymanie dróg sukcesywnie się zwiększają i w 2009 roku wyniosły 8 miliardów złotych, a kwota ta nie uwzględnia takich zabiegów jak budowa utwardzonych poboczy, drugich jezdni czy modernizacji obiektów inżynierskich. Skala problemu jest więc ogromna i stanowi duże obciążenie dla budżetu państwa.



Rys. 2.3. Spękania zmęczeniowe nawierzchni drogi

Wpływ pojazdów przeciążonych nie ogranicza się jedynie do negatywnych oddziaływań na nawierzchnię dróg. Inne zagrożenia wynikające z przeciążania dotyczą samego pojazdu. Zwiększona bezwładność, ograniczona sterowność oraz wydłużona droga hamowania to cechy szczególnie niebezpieczne w sytuacji awaryjnej. W 2008 roku w Polsce miało miejsce 49 054 wypadków drogowych z czego w 76.9% sprawcami byli kierujący pojazdami osobowymi, a w 7.5% samochodami ciężarowymi (Komenda Główna Policji 2009). Choć brak dokładnych statystyk na temat udziału w tych wypadkach pojazdów przeciążonych, specjaliści są zgodni co do tego, że skutki zdarzeń z udziałem takich pojazdów są znacznie większe niż w przypadku pojazdów obciążonych normatywnie (Krusper i Thomson 2008), (Turner, Nicholson i Agent 2008). Z przytoczonych przykładów wynika, że konsekwencje przeciążania pojazdów należy rozpatrywać w skali makro, gdyż zjawisko to swym zasięgiem obejmuje całą społeczność kierowców korzystających z dróg publicznych i ma wpływ na:

- przyspieszenie degradacji dróg i mostów,
- zmniejszenie bezpieczeństwa w ruchu drogowym,
- nieuczciwą konkurencję w transporcie drogowym.

Powyższe zagrożenia dodatkowo potęguje monotoniczny wzrost natężenia ruchu drogowego, a w szczególności transportu dalekobieżnego. Przystąpienie Polski do Unii Europejskiej, a następnie do strefy Schengen spowodowało eskalację migracji przejawiającą się zwiększeniem ruchu tranzytowego. Jak wynika z najnowszego raportu GDDKiA (GDDKiA 2006) w latach 1995 – 2005 średni ruch na drogach krajowych w Polsce wzrósł o ponad 50%, przy czym udział pojazdów ciężarowych z przyczepami w tym okresie zwiększył się ponad 2.5 krotnie (o 68% w latach 1995 – 2000 i o 49% w okresie 2000 – 2005). Dla porównania wzrost udziału pojazdów osobowych w kolejnych okresach pięcioletnich wyniósł: 29% i 17% co w sumie daje wzrost o 50% w okresie dziesięciu lat. Tak dynamiczny rozwój ruchu drogowego, a w szczególności transportu jest z punktu widzenia utrzymania infrastruktury drogowej zjawiskiem niesprzyjającym i ma decydujący wpływ na złe warunki ruchu na drogach oraz proces niszczenia nawierzchni.

Wymieniając czynniki mające negatywny wpływ na stan dróg i mostów należy również wspomnieć o zmianach zachodzących w konstrukcji samych pojazdów ciężarowych. Na przestrzeni kilku ostatnich lat wraz z rozwojem technologii pojawiły się nowe rodzaje ogumienia. Coraz częściej klasyczne opony bliźniacze, które przenoszą największe obciążenia, są wypierane przez opony typu „Super Single” (opona pojedyncza), gdyż te posiadają mniejszą wagę i opory toczenia, co z kolei zmniejsza zużycie paliwa nawet o 3% (Penant 2008), (Michelin 2009).



Rys. 2.4. Opona podwójna (bliźniacza) i „Super Single Drive”

Oprócz opon tego typu, stosowanych powszechnie w naczepach pojazdów członowych, coraz większą popularność zdobywają opony typu „Super Single Drive” przeznaczone na oś napędową ciągników siodłowych. Z punktu widzenia utrzymania dróg, zalety nowej generacji ogumienia deprecjonuje fakt, iż powierzchnia styku opon pojedynczych z nawierzchnią jezdni jest mniejsza niż opon podwójnych, co jest przyczyną bardziej szkodliwego oddziaływania na nawierzchnie jezdni (COST 334 2001), (Soares 2005), (Daehyeon, Salgado i Altschaeffl 2005) .

Wpływ na szybkie niszczenie nawierzchni dróg mają również warunki środowiskowe (pogoda, zanieczyszczenia) oraz technologia wykonania drogi i jakość materiałów użytych do jej budowy. Znajduje to szczególne odzwierciedlenie w warunkach polskich. Znaczna część aktualnie eksploatowanych szlaków komunikacyjnych została zaprojektowana i zbudowana lub zmodernizowana w latach siedemdziesiątych i nie była przewidziana do przenoszenia obciążeń z jakimi mamy obecnie do czynienia (GDDKiA 2009). Okres ich użytkowania przewidziany na 20 lat zbliża się do końca. Dodatkowo wiele dróg w Polsce o nawierzchniach bitumicznych powstało w skutek spontanicznego, stopniowego polepszania jakości. Działanie to polegało np. na przykrywaniu zniszczonej nawierzchni kolejnymi warstwami asfaltu, bez odpowiedniego przygotowania podbudowy drogi (Bukowski 2005). Z tego powodu wiele dróg w Polsce jest bardziej podatnych na uszkodzenia, gdyż drogi źle wykonane, lub te, które już są zniszczone są bardziej wrażliwe na oddziaływanie pojazdów najcięższych.

Wybiegając w przyszłość, odrębny problem stanowi niedostosowanie infrastruktury drogowej w Polsce do wymogów stawianych przez Unię Europejską (Tabor 2005). Przed przystąpieniem do Wspólnoty dopuszczalny nacisk na oś napędową w Polsce wynosił 10 ton. W 2004 roku na drodze nowelizacji zmieniono te przepisy. Aktualnie obowiązujące rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia (Dz.U. RP Nr 103 2004) (Dz.U. RP. Nr 169 2004), wdraża postanowienia dyrektyw Wspólnot Europejskich dotyczących mas i wymiarów pojazdów silnikowych (Dyrektywa 92/21/EWG 1992), (Dyrektywa 93/93/EWG 1993), (Dyrektywa 96/53/WE 1996). W konsekwencji od dnia 1 maja 2004 roku dopuszczalny nacisk pojedynczej osi napędowej pojazdu ustalono na 11.5 tony. Jednocześnie odrębnym

rozporządzeniem (Dz.U. RP. Nr 102 2005), ustalono wykaz fragmentów sześciu dróg krajowych po których mogą się poruszać pojazdy o maksymalnym dopuszczalnym nacisku na oś. Oznacza to, że w chwili obecnej (rok 2009) jedynie 1/5 nawierzchni w Polsce jest dostosowana do wymogów przepisów UE. Co więcej, nowelizując w 2004 roku rozporządzenie Ministra Infrastruktury nie zmieniono Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej (Dz.U. RP. Nr 43 1999) w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać drogi publiczne. Rozporządzenie to do dzisiaj nie zawiera przepisów, z których jednoznacznie wynika potrzeba dostosowania konstrukcji dróg do przenoszenia dopuszczalnych nacisków 11.5 tony na oś. Przy obecnym i spodziewanym natężeniu ruchu pojazdów ciężarowych, skutki tego stanu rzeczy mogą prowadzić do sytuacji, w której rzeczywista trwałość nowej nawierzchni drogowej będzie wynosić 1/3 zakładanej trwałości czyli około 6 lat. Na dostosowanie infrastruktury sieci dróg Polska ma jeszcze półtora roku. Okres przejściowy obowiązuje do 31 grudnia 2010 roku, co oznacza że od 2011 roku po wszystkich drogach krajowych będą mogły jeździć pojazdy ciężarowe o maksymalnym dopuszczalnym nacisku na oś.

Scharakteryzowane powyżej problemy związane z ruchem pojazdów najcięższych, nabierają szczególnego znaczenia w świetle stojących przed Polską wyzwań, związanych z organizacją Mistrzostw Europy w Piłce Nożnej w 2012 roku. Rozbudowa, dostosowanie, a szczególnie ochrona infrastruktury drogowej są zadaniami priorytetowymi. Jednym z podstawowych elementów systemu ochronnego dróg jest kontrola wagi pojazdów.

Kontrola wagi pojazdów najcięższych, polega na pomiarze nacisków poszczególnych osi oraz masy całkowitej pojazdu. Jeżeli w wyniku kontroli zostanie stwierdzone przekroczenie dopuszczalnych norm, pojazd jest eliminowany z ruchu drogowego, a na właściciela firmy przewozowej nakładana jest kara pieniężna oraz obowiązek rozładowania pojazdu. Punkty kontroli masy pojazdów mogą działać okresowo lub w sposób ciągły (Gajda, Sroka, i inni, Systemy Ważenia Pojazdów Samochodowych w Ruchu 2001), (Gajda, Sroka, i inni 2001). Do pierwszej grupy zaliczają się systemy ważące wymagające nadzoru ze strony człowieka. Najczęściej są to przenośne wagi statyczne lub stacjonarne wagi platformowe. Zastosowanie systemów tego typu wymaga zatrzymania pojazdu i skierowania go na specjalny tor jazdy, na którym umieszczona jest waga co uzasadnia nazwę tych wag „statyczne” lub „stacjonarne”. W odróżnieniu od wag tego typu systemy, które nie nakładają istotnego ograniczenia na prędkość pojazdu podczas pomiaru określane są akronimem WIM (ang. Weigh In Motion – Ważenie w Ruchu). Czujniki pomiarowe takich systemów (od jednego do kilkunastu) umieszczone są na stałe na lub pod nawierzchnią jezdni w sposób dla kierowców prawie niedostrzegalny. Obydwa rodzaje systemów ważących różnią się między sobą budową, przeznaczeniem i procedurą pomiaru oraz błędami pomiarowymi co będzie szczegółowo omówione w dalszej części pracy. Wagi statyczne są przeznaczone do dokładnego pomiaru masy pojazdu lub statycznego nacisku osi na nawierzchnię, z błędem określonym w stosownych przepisach i w związku z tym muszą posiadać świadectwo legalizacji. Systemy WIM, ze względu na dużą niepewność pomiaru oraz problemy natury legislacyjnej mogą być wykorzystywane jedynie do wstępnej selekcji z potoku pojazdów tych, wobec których istnieje uzasadnione podejrzenie o przeciążenie, i które następnie są kierowane do kontroli statycznej

(Stanczyk, Geroudet, i inni 2008). Systemy ważące w ruchu są więc na ogół uzupełnieniem statycznych punktów kontroli wagi pojazdów, a zastosowanie takiej preselekcji pozwala na zwiększenie efektywności kontroli. Systemy WIM, ze względu na ciągły, nie wymagający nadzoru tryb pracy, umożliwiają ponadto statystyczną ocenę udziału pojazdów przeciążonych w strumieniu wszystkich pojazdów, co pozwala ocenić rangę problemu wywołanego przez pojazdy przeciążone na danym obszarze.

Problem niszczenia nawierzchni oraz efektywnego ważenia pojazdów ma wymiar globalny i jest przedmiotem badań wielu ośrodków naukowych na świecie. Dotychczas prowadzone działania w tym kierunku były skupione wokół kilku międzynarodowych projektów badawczych. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć (Jacob i O'Brien, Weigh-in-Motion: Recent Developments in Europe 2005), (Jacob i Van Loo 2008):

- COST 323 (1993 - 1999) – „Weigh-in-Motion of Road Vehicles” – projekt paneuropejski, ukierunkowany na wykorzystanie nowych (ówcześnie) technologii i ich wdrożenia w opracowanie systemów WIM, oraz na wypracowanie szeroko rozumianych standardów dotyczących ważenia pojazdów w ruchu. Raport z tego działania (COST 323 1999) do dziś jest nieoficjalnym „podręcznikiem” w środowisku związanym z tematyką systemów WIM.

- WAVE (1996 - 1999) – Pełna nazwa projektu brzmi “Weighing In Motion of Axles and Vehicles for Europe” (Jacob 2001). W projekcie tym, finansowanym przez Komisję Europejską, kontynuowano prace rozpoczęte w działaniu COST323. Kierunki prowadzonych badań były różnorakie, jednak głównie skupiono się na: opracowaniu nowych algorytmów estymacji nacisku w systemach wieloczujnikowych, zwiększeniu dokładności ważenia w systemach mostowych (Bridge - WIM), testach systemów WIM w niskich temperaturach, badaniu systemów z czujnikami światłowodowymi oraz na opracowaniu procedury kalibracji.

- TOP TRIAL (2000 - 2002) – kolejny projekt finansowany ze środków UE ukierunkowany na projektowanie, budowę i testy wieloczujnikowych systemów WIM (CORDIS 2009). W ramach projektu zaproponowano między innymi metody symulacyjne umożliwiające projektowanie wieloczujnikowych systemów WIM, zbadano niezawodność i dokładność stosowanych czujników nacisku, oraz wykonano testy wieloczujnikowego systemu ważącego.

- REMOVE (2004 - 2006) – Requirements for EnforceMent of Overloaded Vehicles In Europe (Van Loo i Henny 2005) – projekt zainicjowany przez Unię Europejską mający na celu harmonizację działań poszczególnych państw w sferze szeroko pojętej tematyki ważenia pojazdów w ruchu. W szczególności celem projektu było wypracowanie wspólnego stanowiska państw członkowskich co do specyfikacji systemów WIM oraz ujednolicenie przepisów dotyczących ważenia na terenie UE.

- FiWi – (2007 - 2009) – FEHRL Institutes WIM Initiative (FEHRL 2009) – głównym celem projektu jest aktualizacja specyfikacji zawartej w dziesięcioletnim już sprawozdaniu z projektu COST323. Ponadto badania są kierowane w stronę systemów mostowych (Bridge WIM), administracyjnych systemów WIM oraz wykorzystania systemów ważących jako części Inteligentnych Systemów Transportowych (Intelligent Transportation Systems – ITS).

Obecnie niemal wszystkie kraje wspólnoty korzystają z technologii ważenia pojazdów w ruchu. We Francji pracują 153 systemy WIM, które zbierają dane do celów statystycznych w ramach systemu SIREDO (Rembeau, Follin i Stanczyk 1998). W 2005 roku francuskie Ministerstwo Transportu (DGMT - The General Directorate of Sea and Transport) bazując na rekomendacji technicznej Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC 2009), oraz Infrastructure Technical Research Institute, East Laboratory (CETE Est), rozpisało przetarg na budowę kolejnych 10 do 40 systemów WIM na drogach krajowych (Marchadour i Jacob 2008). W roku 2007 nowe systemy zostały uruchomione i pracują w konfiguracji ze statycznymi stanowiskami kontrolnymi. Dodatkowo dzięki wyposażeniu systemów w kamery odczytujące numery rejestracyjne pojazdów podejrzanych o przeciążenie, możliwe jest tworzenie czarnej listy nieuczciwych firm przewozowych co pozwala nasilić kontrolę wobec takich przewoźników. Na podobnej zasadzie działa sieć systemów ważących w Holandii (Jacob i Van Loo 2008). W wyniku inicjatywy podjętej w 2000 roku przez holenderskie Ministerstwo Transportu i Robót Publicznych, rozpoczęto projekt „Overloading” (ang. przeciążenie). Celem skoordynowanych działań różnych agencji rządowych oraz policji było ograniczenie udziału pojazdów przeciążonych w ruchu drogowym. W tym celu zbudowano sieć ośmiu systemów WIM uzupełnionych o punkty kontroli statycznej, które rozmieszczono w newralgicznych punktach sieci drogowej.

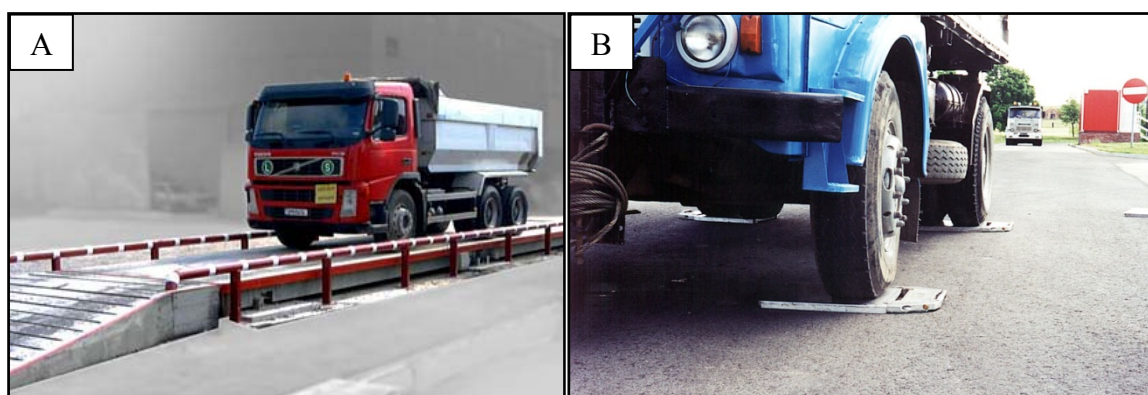
Wysoce skoordynowanymi i przemyślanymi działaniami mającymi na celu ochronę infrastruktury drogowej mogą poszczycić się również takie kraje jak Słowenia (30 systemów WIM), Węgry (ponad 20 systemów działających i kolejne 20-30 w budowie) czy Wielka Brytania. Działania na dużą skalę zostały podjęte również w Hiszpanii i na Słowacji (Leal 2008), (Urgela i Janotka 2008). W Stanach Zjednoczonych ważenie pojazdów znajduje się w kompetencji władz poszczególnych stanów, a rządowa agencja Federal Highway Administration (FHWA 2009) zajmuje się koordynacją tych działań na szczeblu międzystanowym. Brazylia może poszczycić się jedną z najdłuższej działających sieci systemów ważących na świecie. Rozpoczęte w 1975 roku działania, przyniosły zmniejszenie średniego poziomu przekroczeń dopuszczalnych nacisków na oś o ponad 4 tony, na przestrzeni 10 lat (Goltsman, i inni 2008). Systemy WIM są w użyciu na Bliskim i Dalekim Wschodzie, a nawet w Afryce.

Na tym tle działania ochronne podjęte w Polsce wypadają bardzo źle. Historia kontroli wagi pojazdów w naszym kraju sięga roku 1993. Zawirowania legislacyjne spowodowały, że w latach 90-tych nie był to proces ciągły i o regularnym ważeniu pojazdów możemy mówić zaledwie od kilku ostatnich lat (Kul 2000). Dodatkowo nie są to działania skoordynowane, a wykorzystanie technologii WIM w porównaniu z innymi krajami jest bardzo skąpe. W Katedrze Metrologii AGH, powstało kilka systemów WIM (Gajda, Sroka, i inni 2002), (Sroka 2006), (Gajda 2009). Najnowsze 16 czujnikowe stanowisko ważące zostało skonstruowane w 2005 roku w miejscowości Gardawice i działa do dziś. Technologia budowy systemów ważących i ich świadomego wykorzystania została więc w kraju opanowana i czeka na wdrożenie. Zastosowanie tej technologii na dużą skalę jest jedyną drogą efektywnej kontroli wagi pojazdów i ochrony infrastruktury drogowej. Do tego celu można wykorzystać różne rodzaje systemów ważących, które dzieli się na cztery główne kategorie: stacjonarne wagi

platformowe, przenośne wagi statyczne, systemy WIM wymagające ograniczenia prędkości pojazdu oraz systemy WIM nie stawiające takich ograniczeń. W następnym punkcie w sposób chronologiczny zostanie przedstawiony rozwój systemów ważących pojazdy samochodowe.

2.1 Rozwój systemów ważących pojazdy samochodowe

Z historycznego punktu widzenia najdłużej w użyciu znajdują się stacjonarne wagi platformowe, przeznaczone do pomiaru masy całkowitej pojazdu. Pomosty sięgające 24 metrów długości, na które wjeżdża pojazd montowane są nad lub pod nawierzchnią jezdni. W pierwszym przypadku wjazd odbywa się po rampie, w drugim platforma ważąca znajduje się na poziomie jezdni, osadzona na specjalnie przygotowanym fundamencie (Philro Industrial 2009), (Weighbridges 2009). Wagi tego typu są często wykorzystywane w zakładach przemysłowych, do pomiaru masy załadowanego na pojazd ładunku (samochód jest ważony przed i po załadunku), rzadziej do kontroli drogowych. W tym celu powszechnie używa się przenośnych wag statycznych. Ważenie z ich wykorzystaniem polega na skierowaniu wytypowanego pojazdu na specjalnie przygotowane stanowisko kontrolne, zatrzymania go i statycznego zważenia każdej osi z osobna. Dodatkowe czynności kontrolne, takie jak sprawdzenie zapisu tachografu czy stanu technicznego i wymiarów geometrycznych pojazdu, wydłużają czas postoju do kilkudziesięciu minut (Dijk 1999).



Rys. 2.5. Kontrola wagi pojazdu z wykorzystaniem **A)** wagi platformowej **B)** przenośnych wag statycznych

Taka forma kontroli jest skrajnie nieefektywna dla obydwu stron tej czynności. Z jednej strony organ kontrolujący musi zaangażować znaczne środki ludzkie i finansowe, a liczba kontroli w ciągu godziny rzadko przekracza kilka losowo wybranych pojazdów w związku z czym efektywność takiej kontroli jest bardzo niska. Na Dolnym Śląsku, gdzie panuje największy ruch pojazdów najcięższych w 2006 roku dokonano zaledwie 809 kontroli, z czego tylko w 71 przypadkach nałożono kary administracyjne (GITD 2009). Z drugiej strony dla firm przewozowych wyłączenie pojazdu z ruchu generuje istotne straty finansowe. Analiza ekonomiczna wykonana w 1998 roku w USA (Bergan, i inni 1998) wykazała, że trzykrotna kontrola każdego pojazdu ciężarowego w roku, pociąga za sobą straty finansowe

dla firm przewozowych sięgające 10 miliardów dolarów w skali całego kraju. Konfrontując wymienione powyżej problemy dotyczące ważenia statycznego z monotonicznym wzrostem natężenia transportu drogowego koniecznością było opracowanie nowych, efektywnych metod kontroli wagi pojazdów. Tak w latach 70-tych ubiegłego stulecia zrodziła się idea systemów Weigh-in-Motion, których podstawowym założeniem było ważyć bez konieczności zatrzymywania pojazdu. Pierwszą alternatywą dla nieefektywnego ważenia statycznego były (i nadal są) tak zwane systemy LS-WIM (Low Speed - WIM), umożliwiające pomiar przy ograniczonej prędkości pojazdu (ok. 10km/h).



Rys. 2.6. Punkt kontrolny z systemem LS-WIM

Systemy tego typu są na stałe montowane w nawierzchni specjalnie przygotowanego punktu kontrolnego (płaski, poziomy, odpowiednio utwardzony odcinek), który znajduje się poza głównym przekrojem drogi. Procedura pomiaru jest więc analogiczna jak w przypadku ważenia statycznego i posiada podobne wady, z tym wyjątkiem, że pomiar jest wykonywany automatycznie. Ważenie w ściśle kontrolowanych warunkach umożliwia uzyskanie wysokiej dokładności, dzięki czemu na podstawie wyników ważenia pochodzących z systemów LS-WIM, możliwe jest nakładanie kar administracyjnych. Pierwsze wagi tego typu uruchomiono w 1978 roku w Anglii, a w latach kolejnych w kilku krajach Europy Zachodniej, gdzie pracują do dziś (Dolcemasclo i Jacob 1999). Lawinowy wzrost natężenia transportu drogowego w latach 80-tych i 90-tych przy ograniczonej przepustowości i wytrzymałości infrastruktury drogowej, wymusił poszukiwania jeszcze bardziej efektywnych metod ważenia pojazdów. W latach 80-tych rozpoczęto prace nad systemami umożliwiającymi całkowicie automatyczne ważenie pojazdów bezpośrednio na drodze, bez istotnego ograniczania ich prędkości - tak zrodziła się idea systemów HS-WIM (High Speed – WIM).



Rys. 2.7. System HS-WIM z czujnikami piezoelektrycznymi

Podstawowym elementem systemu HS-WIM są czujniki nacisku montowane w nawierzchni jezdni, prostopadle do kierunku ruchu. Każda oś przejeżdżającego przez stanowisko wążące pojazdu wywiera nacisk na te czujniki, co powoduje generację zmiennych w czasie sygnałów pomiarowych będących podstawą oceny dwóch parametrów charakteryzujących ważony pojazd:

- nacisku statycznego każdej osi pojazdu oraz masy całkowitej (suma nacisków osi),
- chwilowej wartości nacisku danej osi na podłoże – pomiar tej wielkości jest istotny z punktu widzenia oceny wpływu pojazdów najcięższych na stan nawierzchni. Dowiedziono, że to dynamiczne oddziaływanie przeciążonej osi na nawierzchnię drogi jest głównym czynnikiem przyspieszającym jej niszczenie.

W systemach HS-WIM ważenie odbywa się bez świadomego udziału użytkownika drogi i jest pozbawione konsekwencji związanych z postojem pojazdu. Podstawową wadą tych systemów, z reguły wyposażonych tylko w dwa czujniki nacisku, jest ograniczona dokładność ważenia. Ograniczenie to wynika głównie ze zmienności nacisku jakie wywiera koło jadącego pojazdu na nawierzchnie oraz z niestacjonarności systemu. Zmienność nacisku osi wynika z faktu, że wokół składowej stałej wywołanej grawitacją obserwuje się występowanie składowej zmiennej wywołanej pionowymi wahaniami ważonego pojazdu, której amplituda może sięgać 40% wartości składowej stałej (Gajda, Sroka, i inni, Systemy Ważenia Pojazdów Samochodowych w Ruchu 2001). Zwiększenie dokładności estymacji nacisku statycznego można uzyskać jedynie poprzez zastosowanie większej liczby czujników w systemie (a tym samym zebranie większej liczby próbek nacisku dla każdej osi).



Rys. 2.8. System MS-WIM z czujnikami polimerowymi

Koncepcja systemów wieloczujnikowych MS-WIM (Multi Sensor - WIM) zrodziła się równolegle w Wielkiej Brytanii i Francji u progu lat 90-tych (Glover 1988), (Glover i Newton 1991), (Cebon, Design of multiple-sensor weigh-in-motion systems 1990) i do dziś jest intensywnie rozwijana. Niezależnie jednak od liczby zainstalowanych w asfalcie czujników nacisku odrębny problem stanowi niestacjonarność systemu, wywołana zmianą warunków środowiskowych, głównie zmianą temperatury asfaltu. Efekt ten, dokładnie opisany w kolejnych rozdziałach pracy, może powodować zmianę dokładności wyników ważenia o kilkadziesiąt procent w ciągu doby. Algorytmy opracowane przez autora, a będące głównym tematem niniejszej rozprawy tj. autokalibracja systemów WIM i korekcja temperaturowa wyników ważenia, w założeniu mają eliminować niekorzystny wpływ niestacjonarności na działanie systemu. Priorytetem jest uzyskanie dużej dokładności wyników ważenia, co zbliżyłoby systemy MS-WIM do pracy w formie samodzielnych stanowisk kontrolnych. Prace w tym kierunku prowadzone są w kilku ośrodkach naukowych na świecie, między innymi w Holandii i Polsce w Katedrze Metrologii AGH, gdzie zbudowano 16-czujnikowe stanowisko ważące w miejscowości Gardawice (droga numer 81, między Katowicami a Cieszyнем). Klasyfikacja systemów ważących ze względu na dokładność uzyskiwanych wyników ważenia jest przedstawiona w następnym punkcie.

2.2 Dokładność systemów ważących

Wyznaczenie dokładności systemu WIM wymaga wykonania serii eksperymentów polegających na pomiarze nacisków osi oraz masy całkowitej pojazdów wstępnie zważonych (tj. takich, dla których wielkości te zostały wyznaczone na statycznym stanowisku ważącym). Porównanie wyników ważenia z badanego systemu z wyznaczonymi w warunkach statycznych wartościami jest podstawą oceny dokładności wagi. Dotychczas opracowano kilka metod wyznaczania dokładności systemów WIM, różniących się między sobą kryterium oceny dokładności.

Najpopularniejsza metoda została opracowana w projekcie COST323 i polega na obliczeniu poziomu ufności (prawdopodobieństwa) π , dla którego błąd względny pomiaru znajduje się w założonym przedziale ufności $[-\delta; +\delta]$. Jest to procedura korzeniami sięgająca metod weryfikacji hipotez statystycznych, choć w wielu miejscach od nich różna (Bendat i Piersol 1976). W tabeli 2.3 zestawiono klasy dokładności systemów WIM w odniesieniu do szerokości przedziałów ufności.

Tabela 2.3. Klasy dokładności i odpowiadające im szerokości przedziałów ufności wg COST323

Kryterium	Wartość minimalna	Klasa dokładności						
		Szerokość przedziału ufności δ (%)						
		A (5)	B+ (7)	B(10)	C(15)	D+(20)	D(25)	E
Masa całkowita	>3.5 t	5	7	10	15	20	25	> 25
Oś wielokrotna	>1 t	7	10	13	18	23	28	> 28
Oś pojedyncza	>1 t	8	11	15	20	25	30	> 30
Oś składowa	>1 t	10	14	20	25	30	35	> 35

System jest kwalifikowany do danej klasy jeżeli spełniony jest warunek:

$$\pi \geq \pi_0 \quad (2.1)$$

gdzie π_0 – jest minimalną, określoną a priori wartością poziomu ufności, ustaloną dla danych warunków środowiskowych, w których był przeprowadzany pomiar oraz dla danej liczby i konfiguracji użytych pojazdów wstępnie zważonych. To założenie jest najsłabszym punktem metody, gdyż warunki środowiskowe trudno jest określić w sposób jednoznaczny. Wartości π_0 są stabelaryzowane i można je znaleźć w pracy (COST 323 1999).

Alternatywny sposób wyznaczania dokładności systemów WIM zaproponowano w rekomendacji OIML R 134-1 z 2006 roku (OIML 2006), gdzie ustalono 6 klas dokładności dla wag przeznaczonych do pomiaru masy całkowitej pojazdu: 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10 i 6 klas dokładności dla wag przeznaczonych do pomiaru nacisków osi: A, B, C, D, E, F.

W przypadku, gdy waga umożliwia wyznaczenie masy całkowitej pojazdu na podstawie pomiaru nacisków osi ustalono, że musi zachodzić odpowiednia relacja między dokładnością ważenia osi, a dokładnością wyznaczenia na tej podstawie masy całkowitej. Związki te zawarte są w tabeli 2.4.

Tabela 2.4. Relacje między klasami dokładności wg OIML

Klasy dokładności – pomiar nacisku osi lub grupy osi	Klasa dokładności – pomiar masy całkowitej					
	0.2	0.5	1	2	5	10
A	X	X				
B	X	X	X			
C		X	X	X		
D			X	X	X	
E				X	X	X
F						X

Z tabeli 2.4 wynika, że waga klasy 0.2 umożliwiająca pomiar masy całkowitej pojazdu powinna należeć co najmniej do klasy B ze względu na pomiar nacisków osi. Maksymalne wartości względnego błędu pomiaru, dla wszystkich klas prezentują tabele 2.5 i 2.6.

Tabela 2.5. Maksymalne wartości błędu względnego - pomiar masy całkowitej pojazdu

Klasa dokładności – pomiar masy całkowitej	Maksymalny błąd względny pomiaru	
	Zatwierdzenie typu i legalizacja	Okresowe badania dokładności
0.2	$\pm 0.10\%$	$\pm 0.20\%$
0.5	$\pm 0.25\%$	$\pm 0.50\%$
1	$\pm 0.50\%$	$\pm 1.00\%$
2	$\pm 1.00\%$	$\pm 2.00\%$
5	$\pm 2.50\%$	$\pm 5.00\%$
10	$\pm 5.00\%$	$\pm 10.00\%$

Tabela 2.6. Maksymalne wartości błędu względnego - pomiar nacisku osi

Klasa dokładności – pomiar nacisku osi	Maksymalny błąd względny pomiaru	
	Zatwierdzenie typu i legalizacja	Okresowe badania dokładności
A	$\pm 0.50\%$	$\pm 1.00\%$
B	$\pm 1.00\%$	$\pm 2.00\%$
C	$\pm 1.50\%$	$\pm 3.00\%$
D	$\pm 2.00\%$	$\pm 4.00\%$
E	$\pm 4.00\%$	$\pm 8.00\%$
F	$\pm 8.00\%$	$\pm 16.00\%$

Podobnie jak w przypadku specyfikacji COST323, zalecenie OIML określa warunki w jakich powinien być wykonywany pomiar oraz rodzaj i liczbę pojazdów wstępnie zważonych biorących udział w weryfikacji dokładności systemu WIM.

Obowiązujące na terenie Rzeczypospolitej Polskiej rozporządzenie w sprawie wymagań metrologicznych, którym powinny odpowiadać stacjonarne i przenośne wagi samochodowe (Dz.U. RP. Nr 188 2007), wdraża rekomendacje opracowane przez OIML. Ustawodawca przyjął po cztery klasy dokładności dla pomiaru nacisków osi (A, B, C, D) i masy całkowitej (0.2, 0.5 1, 2). Choć teoretycznie przepisy dotyczą wszystkich systemów ważących, począwszy od wag statycznych, a na systemach HS-WIM kończąc, to w praktyce przepisy ujęte w rozporządzeniu ograniczają się do wag statycznych i systemów LS-WIM. Wynika to z faktu, iż wymagania tam zawarte w zakresie konstrukcji i wykonania wag, a szczególności powierzchni jezdni w strefie ważenia są nie do spełnienia w przypadku instalacji systemów WIM w głównym przekroju drogi. Poza tym w chwili obecnej brak wzorca miary (nacisku osi) dla systemów WIM uniemożliwia przeprowadzenie procedury legalizacji (F. Van Loo 2004). Jest to poważny problem, który powstał w związku z próbą odpowiedzi na pytanie, co tak naprawdę mierzy system WIM? Choć odpowiedź wydaje się prosta: „system WIM mierzy naciski osi poruszających się pojazdów”, to pociąga za sobą kolejne, bardziej fundamentalne pytanie: „co to jest nacisk osi poruszającego się pojazdu?”. Tu odpowiedź nie jest już tak jednoznaczna. Z jednej strony zgodnie z układem SI jednostką masy jest kilogram, siły Newton, a nacisk osi jest wielkością niezdefiniowaną. Z drugiej strony w powszechnej praktyce pod pojęciem nacisk osi rozumie się sumę sił, z jaką wszystkie koła danej osi naciskają na podłoże i przypisuje się jej jednostkę masy tj. kg lub tonę. Stoi to w sprzeczności z powyższymi rozważaniami, gdyż wynika stąd, że nacisk osi jest siłą wyrażaną w jednostkach masy. Istnieje więc potrzeba stworzenia definicji nacisku osi, zgodnej z obowiązującymi regulacjami prawnymi, poprawnej z fizycznego punktu widzenia, a jednocześnie zgodnej z codzienną praktyką. Dodatkowo system do pomiaru nacisków osi nie jest w świetle obowiązującego w UE prawa systemem ważącym i wyniki ważenia z systemów WIM nie mogą być wykorzystywane do wyznaczenia masy całkowitej pojazdu, a w konsekwencji do eliminacji z ruchu pojazdów przeciążonych z punktu widzenia dopuszczalnej masy całkowitej.

Mając na uwadze powyższe rozważania, wagi pojazdów ze względu na dokładność dzielimy na: administracyjne oraz preselekcyjne. Do pierwszej grupy zaliczamy systemy, które posiadają świadectwo legalizacji, a więc dokument zaświadczający, że waga spełnia wymagania metrologiczne określone we właściwych przepisach (Okręgowy Urząd Miar 2009). Wagami takimi posługują się uprawnione do kontroli masy pojazdów organy administracji państwowej (np. ITD, Policja), a stwierdzenie przekroczenia dopuszczalnych norm przez pojazd skutkuje nałożeniem kary pieniężnej na jego właściciela.

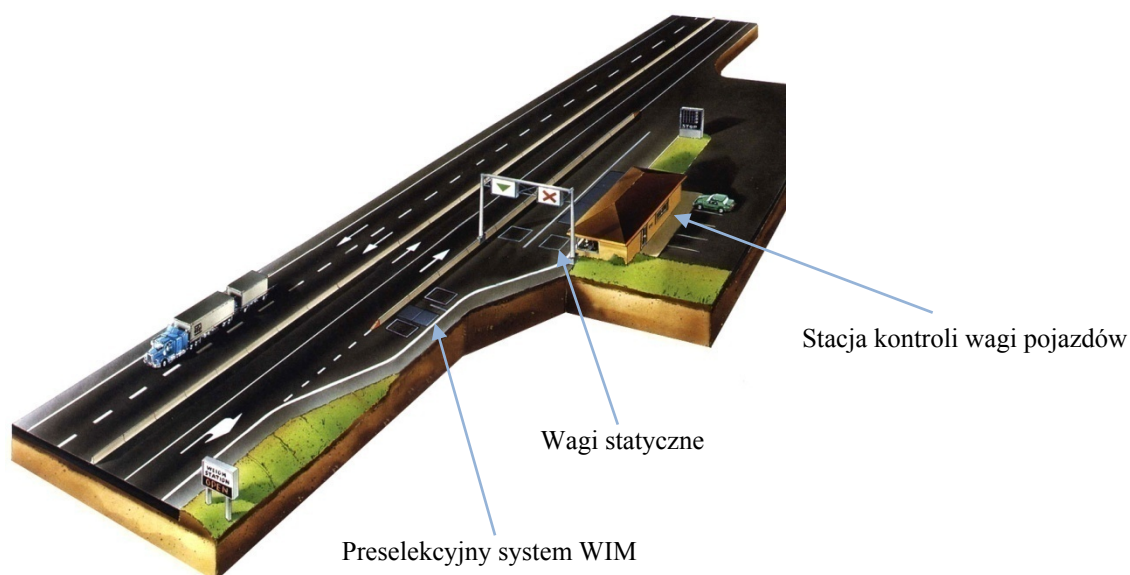
Do najpopularniejszych wag administracyjnych zalicza się:

- przenośne wagi statyczne umożliwiające pomiar nacisku osi, a w konsekwencji wyliczenie masy całkowitej pojazdu,
- wagi platformowe umożliwiające pomiar masy całkowitej,
- wolno przejazdowe stanowiska ważące (LS-WIM), umożliwiające pomiar nacisku osi oraz wyliczenie masy całkowitej pojazdu.

Do grupy tej nie można zaliczyć systemów WIM, które mierzą naciski osi (i na tej podstawie obliczają masę całkowitą pojazdu) bez istotnego ograniczenia jego prędkości (HS- oraz MS-WIM). Tym samym w chwili obecnej systemy:

- HS-WIM,
- MS-WIM,

zaliczamy do grupy systemów preselekcyjnych. Ich rola ogranicza się do selekcji z potoku tych pojazdów, wobec których istnieje uzasadnione podejrzenie o przeciążenie. Pojazdy takie są następnie kierowane na stanowisko wyposażone w wagę ze świadectwem legalizacji i poddawane dokładnemu ważeniu (np. waga statyczna lub wolno przejazdowa).



Rys. 2.9. Widok poglądowy stanowiska kontrolnego (HS-WIM oraz wagi statyczne)

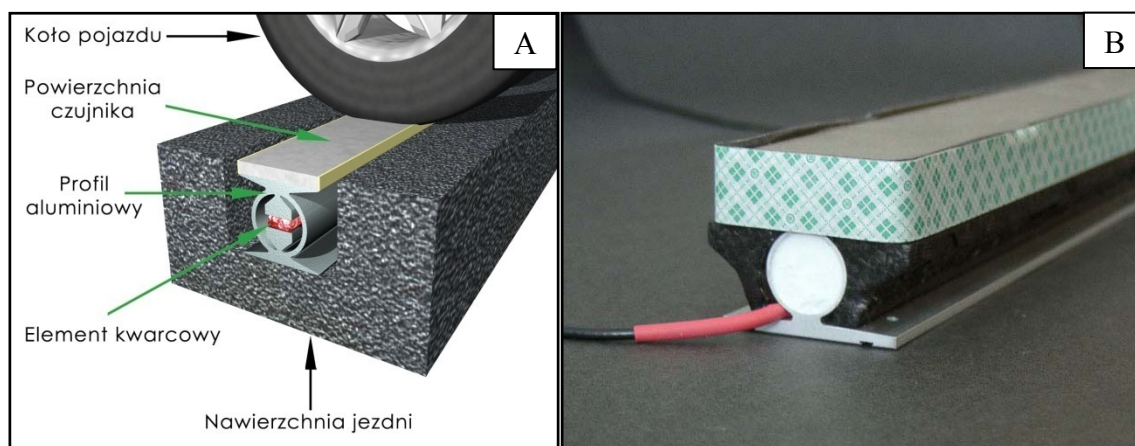
Niezależnie od prowadzonych prac legislacyjnych, intensywne działania kierowane są w stronę polepszenia właściwości metrologicznych systemów WIM. Duże nadzieje pokładane są w systemach MS-WIM, a celem prowadzonych prac jest budowa systemu o jak największej dokładności uzyskiwanych wyników ważenia – np. klasa A(5). „Walka” o zwiększenie dokładności toczy się na wielu frontach - jednym z nich jest eliminacja wpływu niestacjonarności systemu na wyniki ważenia. Ograniczenie wpływu niestacjonarności leży u podstaw opracowanych metod autokalibracji i korekcji temperaturowej. W przekonaniu autora zastosowanie tych metod w nowoczesnych systemach wieloczujnikowych, może przynieść pożądany efekt istotnego zwiększenia dokładności wyników ważenia. Stopień niestacjonarności oraz dokładność systemu WIM w dużej mierze zależy od zastosowanych czujników nacisku. W następnym punkcie opisano właściwości metrologiczne najpopularniejszych czujników nacisku wykorzystywanych w systemach Weigh In Motion.

2.3 Rodzaje czujników nacisku stosowanych w systemach WIM

Podstawowym elementem systemów HS- i MS-WIM są czujniki nacisku, montowane w nawierzchni lub pod nawierzchnią jezdni prostopadle do kierunku ruchu, w taki sposób, że osie ważonego pojazdu przetaczają się kolejno przez te czujniki. Takie położenie czujników względem drogi umożliwia pomiar chwilowej wartości nacisku wywieranego na nawierzchnię przez koła ważonego pojazdu. Współcześnie wykorzystuje się różne rodzaje czujników nacisku, jednak do najpopularniejszych należy zaliczyć: kwarcowe, pojemnościowe oraz polimerowe (nazywane również piezoelektrycznymi) (Gajda, Sroka, i inni, Systemy Ważenia Pojazdów Samochodowych w Ruchu 2001), (Klein 2001), (Sroka 2002), (Mimbela i Klein 2007), (Burnos 2009).

• Czujniki kwarcowe

Największą grupę stanowią czujniki wykorzystujące zjawisko piezoelektryczne proste. Odkryte w 1880 roku przez Piotra i Jakuba Curie, zjawisko polega na indukowaniu ładunków elektrycznych na powierzchni dielektryka pod działaniem naprężeń mechanicznych (istnieje też zjawisko odwrotne – odkształcenie mechaniczne materiału pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego). Efekt ten jest obserwowany w materiałach o strukturze krystalicznej, nie posiadających środka symetrii, które dzieli się na piezoelektryki ceramiczne i polimerowe. Najpopularniejszym materiałem piezoelektrycznym z grupy ceramików jest kwarc, używany do budowy kwarcowych czujników nacisku, posiadających najlepsze właściwości z punktu widzenia ich zastosowania w systemach WIM. Konstrukcja i montaż czujnika kwarcowego w nawierzchni pokazane są na rysunku 2.10. Dzięki umieszczeniu wrażliwego na nacisk elementu kwarcowego w profilu aluminiowym o specjalnym kształcie, uzyskano minimalizację czułości na oddziaływanie sił poprzecznych na korzyść czułości w kierunku prostopadłym do powierzchni czujnika. Problem wynikał stąd, że jadący pojazd generuje nie tylko pionowe siły nacisku, ale również poprzeczne naprężenia w podłożu. Oddziaływanie sił poprzecznych na czujnik powoduje zniekształcenie sygnałów pomiarowych będących podstawą estymacji nacisku na oś (porównaj rys. 2.13).



Rys. 2.10. A) Przekrój poprzeczny profilu jezdni z zamontowanym czujnikiem kwarcowym,
B) zdjęcie czujnika

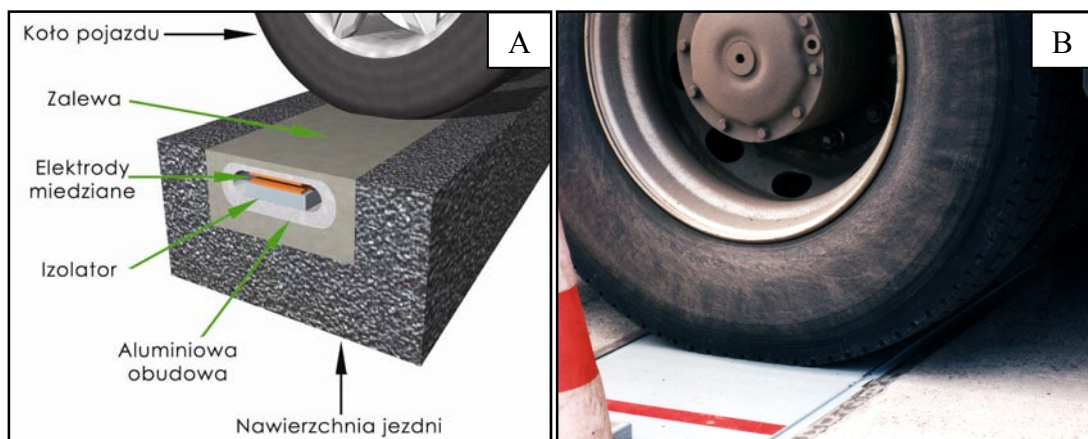
Czujnik montuje się w wyciętej w nawierzchni jezdni szczelinie, która powinna być sucha i wolna od zanieczyszczeń (resztki nawierzchni, ciała obce). Po odpowiednim wypoziomowaniu czujnika, szczelinę wypełnia się zalewą o właściwościach zbliżonych do nawierzchni jezdni. Po stężeniu zalewy, jej nadmiar, który może znajdować się na powierzchni drogi usuwa się szlifierką, tak aby uzyskać płaski profil jezdni – powierzchnia czujnika. Taka konstrukcja i instalacja czujników kwarcowych umożliwia bezpośredni kontakt opony pojazdu z przetwornikiem, co eliminuje potrzebę stosowania dodatkowych elementów pośredniczących w przenoszeniu nacisku. Podstawowe właściwości metrologiczne czujników kwarcowych przedstawiają się następująco (Kistler 2009):

- minimalna czułość poprzeczna,
- mała wrażliwość temperaturowa ($0.02\%/^{\circ}\text{C}$) oraz szeroki zakres temperatur pracy (od -50°C do 80°C),
- pomiar w szerokim zakresie prędkości pojazdu (2 – 120 km/h),
- mała zmienność czułości czujnika w funkcji jego długości ($\pm 2\%$),
- dobra liniowość charakterystyki statycznej czujnika,
- długoterminowa stabilność czułości czujnika ($\pm 2\%$ w okresie 30 miesięcy),
- trwałość sięgająca 10 lat.

Wymienione powyżej właściwości czujników kwarcowych należy uznać za ich zdecydowane zalety. Bezpośredni kontakt opony z powierzchnią czujnika zmniejsza wrażliwość systemu na zmiany temperatury asfaltu, a tym samym niestacjonarność systemu jest znacznie ograniczona. Za podstawową wadę czujników kwarcowych należy uznać wysoką cenę sięgającą 10 tysięcy złotych za metr czujnika.

- **Czujniki pojemnościowe**

Zbliżone do czujników kwarcowych parametry użytkowe posiadają czujniki pojemnościowe, których podstawowym elementem jest układ dwóch elektrod wykonanych z materiału przewodzącego, odizolowanych od siebie dielektrykiem (Cebon i Cole 1989), (Cebon i Cole 1992). Elementem konstrukcyjnym jest profil aluminiowy, który jednocześnie przenosi nacisk osi na czujnik. W pewnym uproszczeniu taki układ elektrod i dielektryka można porównać do kondensatora płaskiego.



Rys. 2.11. A) Przekrój poprzeczny profilu jezdni z zamontowanym czujnikiem pojemnościowym,
B) zdjęcie czujnika

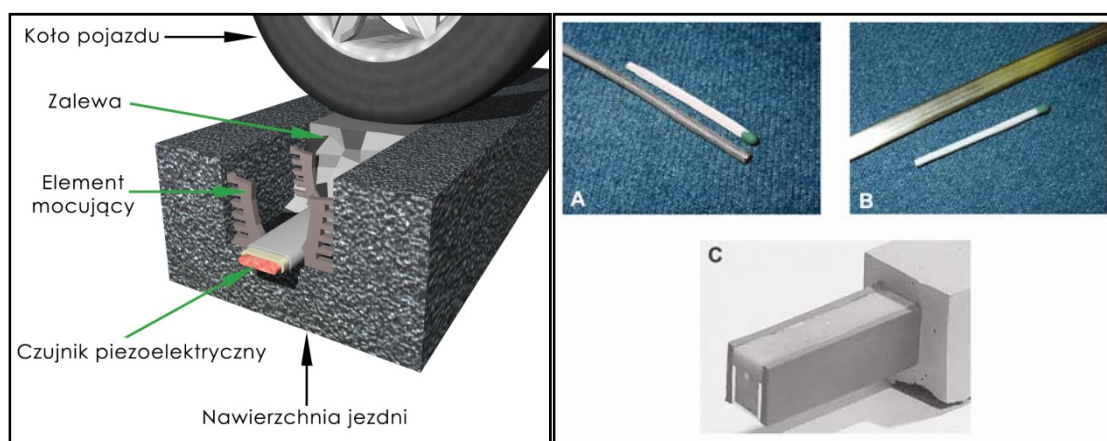
Nacisk wywierany przez oponę pojazdu na jedną ze ścianek profilu aluminiowego powoduje zmianę odległości między okładzinami kondensatora, a tym samym zmianę jego pojemności. Od strony elektrycznej czujnik jest podpięty do obwodu generatora, którego częstotliwość zależy od pojemności czujnika, więc to pomiar zmian częstotliwości jest podstawą estymacji nacisku osi na nawierzchnię. Czujniki pojemnościowe budowane są w postaci platform o szerokości od 10 do 50 cm montowanych w nawierzchni jezdni lub jako przenośne „maty”, które układa się na nawierzchni. Zaletą tych czujników jest, spowodowana względnie dużą szerokością, zdolność do tłumienia (uśredniania) zakłócającego wpływu składowej zmiennej sygnału nacisku, wywołanej podskakiwaniem kół. Ponadto czujniki te charakteryzuje:

- brak reakcji na oddziaływanie sił bocznych,
- mała wrażliwość temperaturowa, nie stwierdzono zależności wyniku ważenia od temperatury w zakresie od 15 do 40°C,
- pomiar nacisków stałych jak i zmiennych w czasie (możliwe pomiary statyczne),
- mała zmienność czułości czujnika w funkcji jego długości ($\pm 2\%$),
- dobra liniowość charakterystyki statycznej czujnika.

Czujniki pojemnościowe posiadają jednak małą wytrzymałością mechaniczną i szybko ulegają uszkodzeniom co jest ich podstawową wadą.

- **Czujniki polimerowe (piezoelektryczne)**

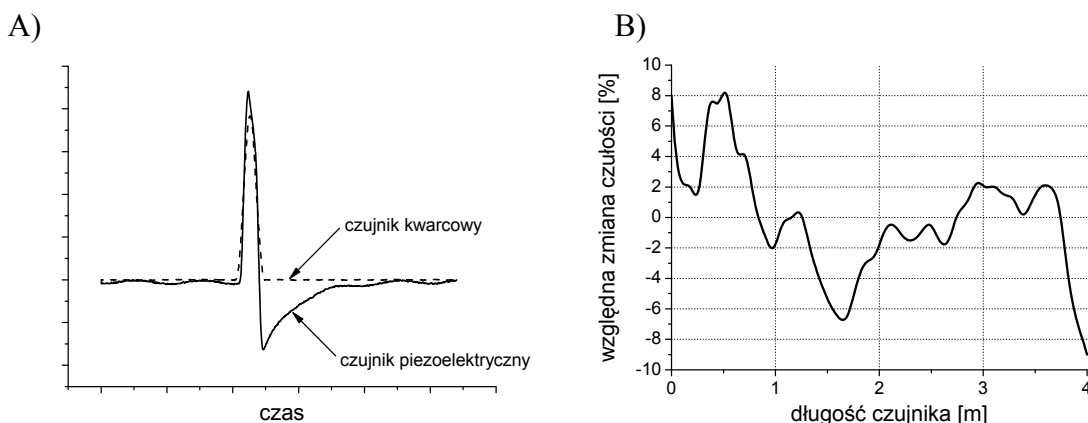
Alternatywą dla drogich czujników kwarcowych i podatnych na uszkodzenia czujników pojemnościowych są piezoelektryczne czujniki polimerowe, w skrócie nazywane piezoelektrycznymi. Polimer znajdujący tu szczególne zastosowanie to odkryty pod koniec lat 60-tych materiał o nazwie polifluorek winylidenu (PVDF) (Materiały inteligentne 2009). Zasada działania tych czujników jest podobna jak ceramicznych czujników kwarcowych, jednak odróżnia je inna konstrukcja i właściwości. Czujniki polimerowe mogą mieć postać płaskich taśm, czujnika zabudowanego w metalowym profilu, które montuje się pod nawierzchnią jezdni lub elastycznego koncentrycznego kabla przewidzianego do naklejania na nawierzchnię drogi. Popularne czujniki taśmowe montuje się pod nawierzchnią jezdni w szczelinach o głębokości kilku centymetrów, które następnie wypełnia się specjalną zalewą. Koło pojazdu nie ma bezpośredniego kontaktu z czujnikiem, a sygnał pomiarowy przenoszony jest na czujnik przez nawierzchnię jezdni. To powoduje, że wyniki ważenia są bardzo wrażliwe na zmiany właściwości samej nawierzchni, co wywołuje niestacjonarność systemu i poza pionowymi wahaniami pojazdu jest główną przyczyną niedokładności uzyskiwanych wyników ważenia. Efekt ten będzie szczegółowo omówiony w rozdziale 3.



Rys. 2.12. Przekrój poprzeczny profilu jezdni z zamontowanym czujnikiem piezoelektrycznym, oraz zdjęcia czujników: **A)** kablowego, **B)** taśmowego, **C)** zabudowanego metalową rynną

Niekorzystną cechą czujników tego typu jest również to, że wykazują pewną wrażliwość na oddziaływanie sił poprzecznych, co prowadzi do zniekształceń w obserwowanych sygnałach wyjściowych z czujników. Dodatkowo czujniki polimerowe charakteryzuje duża niejednorodność czułości w funkcji długości sięgająca 8%.

Porównanie sygnałów generowanych przez czujnik piezoelektryczny i kwarcowy, oraz przykładowa zmienność czułości czujnika piezoelektrycznego pokazane są na rysunku 2.13.



Rys. 2.13. A) Czasowe przebiegi sygnałów generowanych przez czujniki WIM, B) Niejednorodność czułości czujnika polimerowego w funkcji jego długości

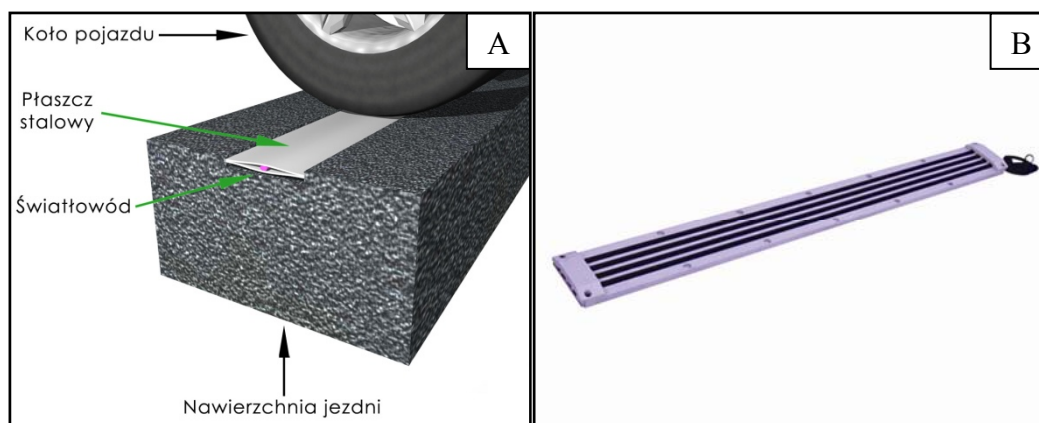
Polimerowe czujniki piezoelektryczne mają zdecydowanie gorsze właściwości od omawianych wcześniej czujników kwarcowych i pojemnościowych. W szczególności charakteryzuje je (Measurement Specialties 2009):

- duża wrażliwość na oddziaływanie sił bocznych, co prowadzi do zniekształcenia sygnału pomiarowego,
- duża wrażliwość na zmiany temperatury (patrz rozdział 3),
- pomiar nacisków zmiennych w czasie, co oznacza, iż prawidłowy pomiar jest możliwy w przedziale prędkości pojazdu 20 – 110 km/h,
- duża niejednorodność czułości czujnika w funkcji jego długości (do $\pm 8\%$ dla czujników klasy I oraz $\pm 20\%$ dla czujników klasy II),
- utrata czułości czujnika pod wpływem wysokiej temperatury i oddziaływań mechanicznych – narażenie czujnika na temperaturę ok. 100°C w czasie 24h, lub zgięcie czujnika o promieniu mniejszym niż 30 cm powoduje trwałe obniżenie jego czułości o około 20%.

Wady czujników piezoelektrycznych kompensuje stosunkowo niska cena, co decyduje o ich szerokim zastosowaniu. Czujnik o długości 4 metrów kosztuje około 4000 zł, co po przeliczeniu na jednostkę długości daje cenę około 10 razy mniejszą niż w przypadku alternatywnych czujników kwarcowych.

- **Czujniki światłowodowe**

Mniej popularną grupę stanowią czujniki światłowodowe, w których wykorzystano zjawisko zmiany warunków propagacji fali świetlnej wewnątrz światłowodu poddanego działaniu siły zewnętrznej. Włókno światłowodowe w czujnikach tego typu umieszcza się w specjalnym płaszczu stalowym, który pełni rolę ochronną, jednocześnie przenosząc nacisk na światłowód. Czujniki tego typu montuje się w wyfrezowanej w nawierzchni jezdni szczeliny, którą następnie wypełnia zalewa epoksydowa.



Rys. 2.14. A) Przekrój poprzeczny profilu jezdni z zamontowanym czujnikiem światłowodowym, **B)** zdjęcie czujnika

Ze względu na zasadę działania czujniki światłowodowe dzieli się na:

- amplitudowe,
- interferometryczne,
- polaryzacyjne,
- wykorzystujące efekt Bragg'a.

W czujnikach polaryzacyjnych wykorzystano zjawisko zmiany kąta polaryzacji fali świetlnej pod wpływem naprężeń mechanicznych w światłowodzie (Caussignac i Rougier 1999). Źródłem światła jest laser o długości fali równej 1330 nm, a elementem światłoczułym dwie fotodiody połączone z nadrzędnym układem kondycjonowania i przetwarzania sygnałów. Czujniki światłowodowe charakteryzuje:

- mała wrażliwość na zmiany temperatury,
- pomiar nacisków stałych jak i zmiennych w czasie (możliwe pomiary statyczne),
- duża odporność na zakłócenia elektromagnetyczne.

Czujniki światłowodowe to względnie nowa technologia na gruncie systemów WIM (od 1997 roku), a badania nad ich wykorzystaniem wciąż trwają.

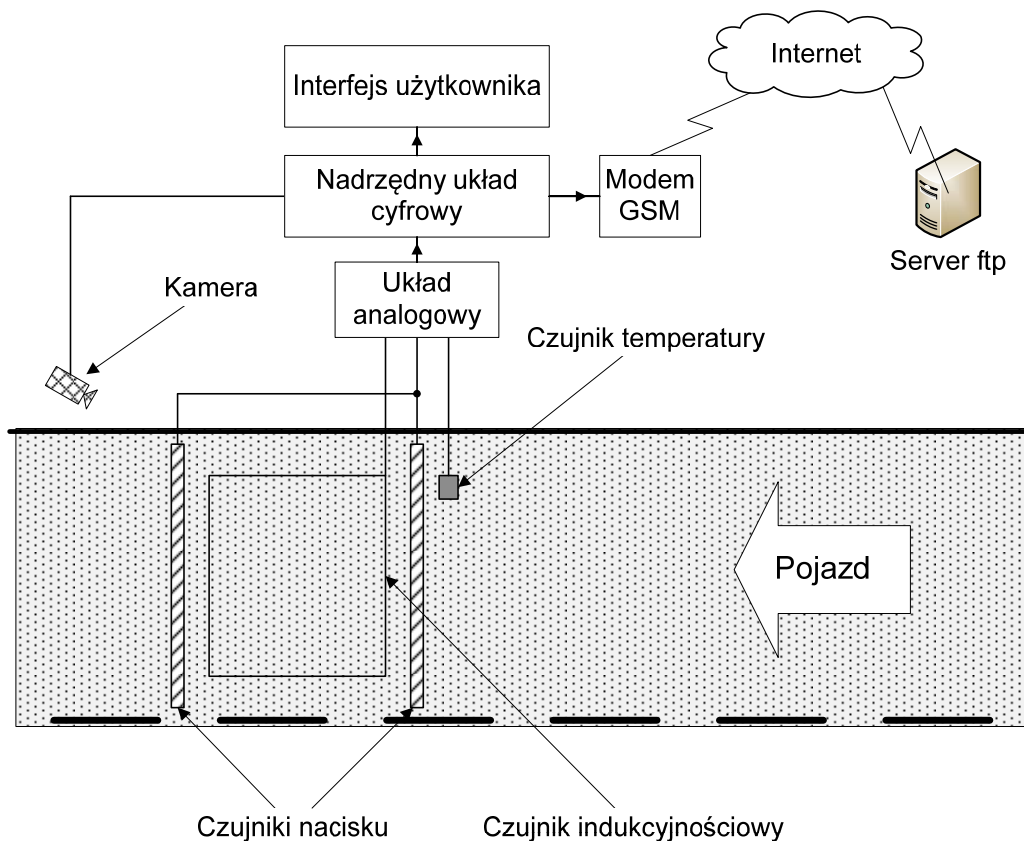
- **Czujniki indukcyjnościowe**

W systemach WIM pojawia się problem przypisywania ważonych osi do konkretnego pojazdu, a więc istnieje potrzeba detekcji obecności pojazdu w strefie pomiaru. Do tego celu powszechnie stosuje się czujniki indukcyjnościowe, nazywane również pętlami indukcyjnymi. Nazwa czujnika w zasadzie tłumaczy jego budowę i zasadę działania, jest to pętla wykonana z kilku zwojów przewodu, zatopiona w nawierzchni jezdni. Rozmiary pętli są różne, szerokość jest porównywalna z szerokością pasa ruchu, a długość może wynosić od kilkudziesięciu centymetrów do kilku metrów. W wyniku oddziaływania pojazdu przejeżdżającego nad czujnikiem z polem magnetycznym wytworzonym przez ten czujnik, możliwa jest jednoznaczna detekcja obecności pojazdu w punkcie pomiaru, oraz rejestracja tak zwanego profilu magnetycznego. Na podstawie profilu magnetycznego, można wydobyć dodatkowe informacje na temat pojazdu takie jak długość (elektryczna) zastępcza, obecność przyczepy czy klasa pojazdu (Burnos, Gajda i inni, *Measurements of Road Traffic Parameters Using Inductive Loops and Piezoelectric Sensors* 2007).

Opisane czujniki zainstalowane w nawierzchni jezdni wraz z systemami akwizycji i przetwarzania danych tworzą systemy WIM. Właściwości metrologiczne tych systemów zależą od typu i liczby zainstalowanych czujników. W następnym rozdziale omówiono najczęściej spotykane struktury systemów WIM poczynając od systemów jednoczujnikowych a kończąc na systemach wieloczujnikowych.

2.4 Struktura systemów WIM

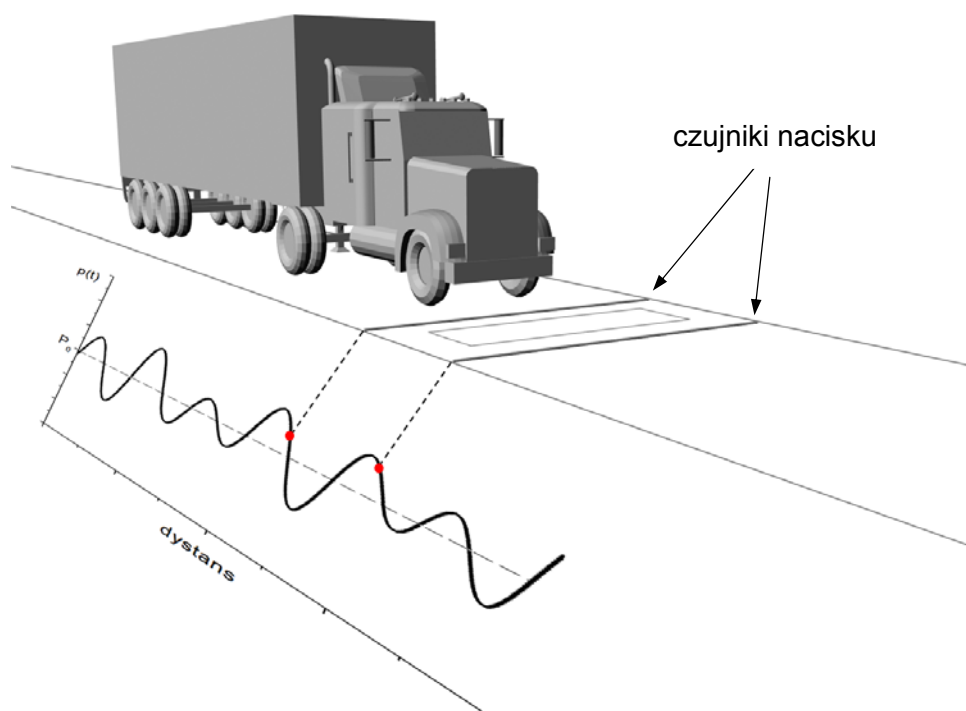
Struktura klasycznego systemu HS-WIM jest prosta. Stanowisko pomiarowe wyposażone jest w jeden lub dwa czujniki nacisku, jedną pętlę indukcyjną oraz czujnik temperatury asfaltu. Czujniki nacisku mają długość odpowiadającą szerokości pasa ruchu, natomiast odległość między nimi (w przypadku systemów dwuczujnikowych) nie jest z góry ustalona. Wyznacza się ją na podstawie badań symulacyjnych, biorąc pod uwagę charakter i parametry ruchu na stanowisku ważącym. Bezpośrednio z czujnikami współpracuje podrzędny analogowy układ kondycjonowania sygnałów, na wyjściu którego otrzymuje się sygnał poddawany dalszej analizie. Do tego celu służy nadrzędny układ cyfrowy, którym zwykle jest komputer klasy PC. Jego zadaniem jest archiwizacja, wizualizacja oraz analiza danych pomiarowych. Komunikacja między układem kondycjonowania sygnałów, a systemem nadrzędnym odbywa się z wykorzystaniem interfejsów szeregowych (np., USB, RS232), a coraz częściej za pomocą transmisji GPRS GSM. W takim przypadku dane za pośrednictwem modemu gsm są przesyłane ze stanowiska ważącego na serwer ftp, z którego mogą być pobrane przez użytkownika (Simon i Walczyk 2002).



Rys. 2.15. Schemat poglądowy systemu HS-WIM

W przypadku wyposażenia systemu w kamerę wizyjną, możliwa jest identyfikacja pojazdu podejrzanego o przeciążenie. W tym celu stosuje się tzw. systemy AVI (Automatic Vehicle Identification), umożliwiające rozpoznanie (odczyt) numeru rejestracyjnego (Pamuła 2005).

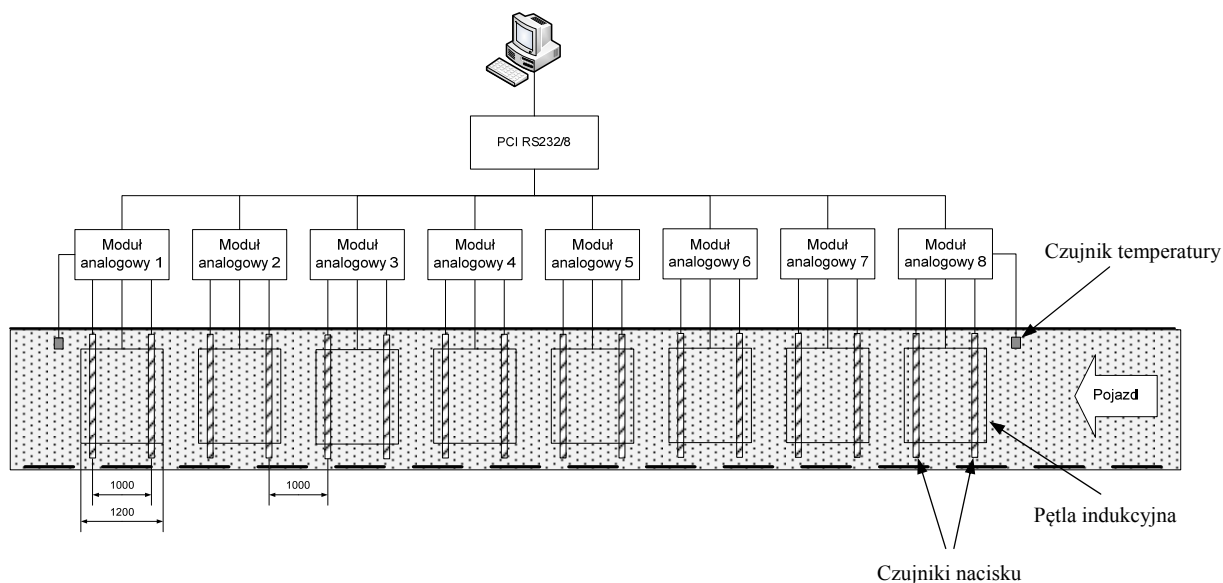
Wyposażenie systemów HS-WIM w dwie linie czujników umożliwia zebranie dwóch próbek nacisku dla każdej osi, a wynik ważenia jest obliczany jako średnia arytmetyczna. Ponieważ siła nacisku danej osi na podłoże zmienia się podczas jazdy w skutek pionowych wahań pojazdu, obliczony w ten sposób nacisk może różnić się od wartości wyznaczonej na wadze statycznej. Na rysunku 2.16 linia ciągła symbolizuje zmienność nacisku wybranej osi pojazdu pięcioosiowego, pozioma linia przerywana wartość nacisku wyznaczoną w warunkach statycznych, a czerwonymi kropkami zaznaczono chwile „próbkowania” nacisku osi przez czujniki systemu WIM. W tym przypadku obliczony na podstawie zebranych próbek nacisk, będzie zawyżony w stosunku do wartości statycznej.



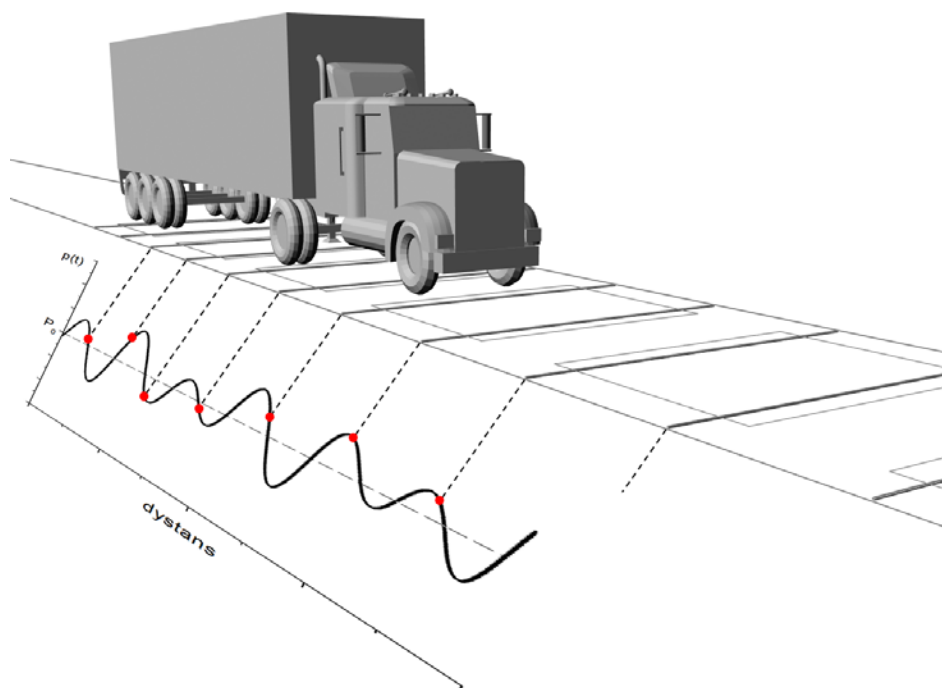
Rys. 2.16. Ilustracja wpływu składowej dynamicznej na wynik próbkowania siły nacisku danej osi, w przypadku gdy w systemie zastosowano dwa czujniki nacisku

Suma tak obliczonych nacisków wszystkich osi danego pojazdu stanowi ocenę masy całkowitej. Ponadto taka konfiguracja stanowiska pomiarowego umożliwia pomiar prędkości pojazdu, liczby osi, odległości między nimi, długości elektrycznej zastępczej oraz detekcję obecności przyczepy. Obliczenie dwóch ostatnich parametrów jest możliwe dzięki analizie profilu magnetycznego pojazdu pochodzącego z pętli indukcyjnej (Gajda, Sroka, i inni 1998), (Gajda, Sroka, i inni, A Vehicle Classification Based on Inductive Loop Detectors 2001). Dodatkowo na podstawie zgromadzonych danych pomiarowych możliwe jest wyznaczenie charakterystyk pokrewnych opisujących właściwości ruchu drogowego na danym obszarze (gęstość, przepływ, średnia prędkość, itp.) oraz automatyczna klasyfikacja pojazdów (dodatek A).

Systemy MS-WIM są rozwinięciem idei systemów dwu czujnikowych. System taki składa się z kilku do kilkudziesięciu czujników piezoelektrycznych, które zwykle uzupełniają czujniki indukcyjnościowe oraz czujnik temperatury. Czujniki nacisku mogą być rozmieszczone równomiernie bądź nierównomiernie, a dobór odległości między nimi poprzedzają badania symulacyjne (Cebon 1990). Przykładem systemu MS-WIM jest stanowisko ważące zaprojektowane i zbudowane w Katedrze Metrologii AGH, którego strukturę przedstawia rysunek 2.17 (Burnos, Gajda, i inni, 2007).



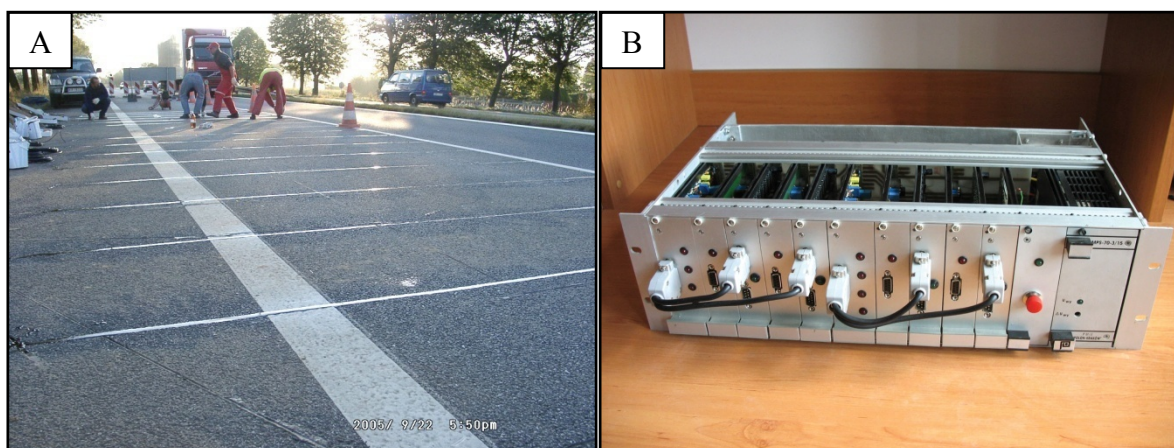
Rys. 2.17. Schemat poglądowy systemu MS-WIM



Rys. 2.18. Ilustracja wpływu składowej dynamicznej na wynik próbkowania siły nacisku danej osi, w przypadku systemu wieloczułnikowego

Najistotniejsza korzyść ze stosowania systemów MS-WIM polega na tym, iż w skutek odpowiedniego „próbkowania” sygnału nacisku możliwa jest redukcja wpływu składowej dynamicznej na wynik estymacji składowej statycznej nacisku osi. Stanowisko zbudowane

w miejscowości Gardawice wyposażone jest w 16 czujników polimerowych, osiem czujników indukcyjnościowych oraz dwa czujniki temperatury umieszczone na początku i końcu stanowiska. Czujniki nacisku są rozmieszczone równomiernie, a odległość między nimi wynosi 1m (Gajda, Sroka, i inni 2007). Każdą parę czujników nacisku obejmuje jeden czujnik indukcyjny, co tworzy zestaw jak w klasycznym systemie dwuczujnikowym. Takie podejście umożliwia modułową budowę układu kondycjonowania sygnałów, który składa się z ośmiu prototypowych systemów podrzędnych. Każdy z nich współpracuje z dwoma czujnikami nacisku, jednym czujnikiem pętlowym oraz czujnikiem temperatury.



Rys. 2.19. A) Stanowisko WIM w Gardawicach (montaż czujników), **B)** układ kondycjonowania sygnałów

System nadrzędny zbudowano w oparciu o komputer klasy PC oraz kartę PCI RS232/8 firmy National Instruments. Karta zwiększa liczbę portów RS232 komputera do ośmiu, co jest konieczne ze względu na modułową strukturę systemu i sposób transmisji danych (Piwowar 2007). Oprogramowanie MS_WIM v.1.0 steruje pracą systemów podrzędnych, odbiera i przetwarza dane pomiarowe, a także umożliwia ich wizualizację oraz archiwizację.

Dane pomiarowe, które wykorzystał autor w swojej pracy pochodzą z jednego systemu podrzędnego współpracującego z dwoma z pośród 16 czujników nacisku, jedną pętlą indukcyjną, czujnikiem temperatury oraz wilgotności powietrza. System ten na stałe zainstalowany na stanowisku ważącym, pracował w okresie od listopada 2005 do stycznia 2008 z przerwami na konserwację. Jeśli nie jest to wyraźnie zaznaczone w tekście, wyniki zaprezentowane w niniejszej rozprawie opracowano w oparciu o rejestracje z takiego systemu dwuczujnikowego.

2.5 Przyczyny błędów pomiarowych w systemach WIM z czujnikami polimerowymi

Podstawową wadą systemów HS- i MS- WIM jest duża niedokładność uzyskiwanych wyników ważenia. Przyczyny tego stanu rzeczy mają różnoraki charakter i można je podzielić na dwie grupy: główne oraz dodatkowe. Do głównych przyczyn ograniczających dokładność systemów WIM zaliczamy (Scheuter 1998), (Huhtala 1999):

- pionowe wahania ważonego pojazdu,
- przestrzenną powtarzalność nacisku osi,
- niestacjonarność systemu WIM,
- zmiany czułości wzdłuż czujników nacisku.

Za przyczyny dodatkowe uznaje się:

- niedokładny montaż czujników,
- transfer masy wewnątrz ważonego pojazdu (tylko estymacja nacisku osi),
- zachowania kierowcy mające na celu zaniżenie wyniku ważenia.

Nacisk wywierany przez koła jadącego pojazdu na podłoże jest zmienny. Wokół składowej stałej wywołanej grawitacją występuje bowiem składowa zmienna generowana przez pionowe wahania pojazdu. Amplituda oraz częstotliwość tych oscylacji jest zależna od masy pojazdu, konstrukcji zawieszenia, prędkości, a przede wszystkim nierówności nawierzchni. Ogólnie można zapisać (Cebon, Handbook of Vehicle-Road Interaction 1999):

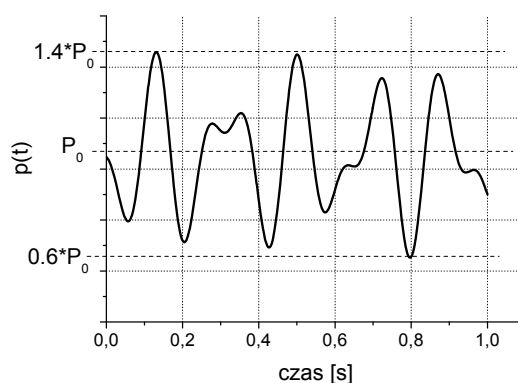
$$p(t) = P_0 + P(t) \quad (2.2)$$

gdzie:

$p(t)$ – chwilowa wartość nacisku osi na podłoże,

P_0 – składowa stała – nacisk statyczny osi,

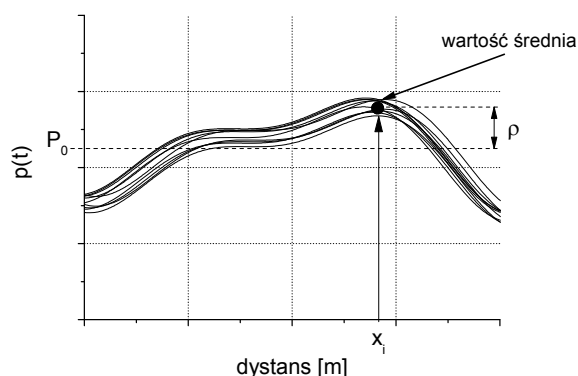
$P(t)$ – składowa zmienna – nacisk dynamiczny osi.



Rys. 2.20. Zmienność nacisku osi w czasie (przebyty dystansie)

Stosunek amplitudy składowej zmiennej względem wartości składowej stałej nacisku może sięgać nawet 40% dla dróg o złej jakości i 15% dla nowo powstałych nawierzchni. Bez względu więc na jakość drogi, efekt ten jest nierozdzielnie związany z szybko poruszającymi się pojazdami. Jest to pierwsza i podstawowa przyczyna dużej niedokładności estymacji nacisku statycznego osi lub masy całkowitej pojazdu w systemach WIM.

Drugą przyczyną, również związaną z profilem jezdni, jest przestrzenna powtarzalność nacisku osi. Przy wielokrotnym przejeździe tego samego pojazdu przez ten sam odcinek drogi składowa dynamiczna nacisku będzie miała powtarzalny kształt (Jacob i Dolcemasco 1998), (O'Brien, Gonzalez i McInerney 2008). Zjawisko to jest zobrazowane na rysunku:

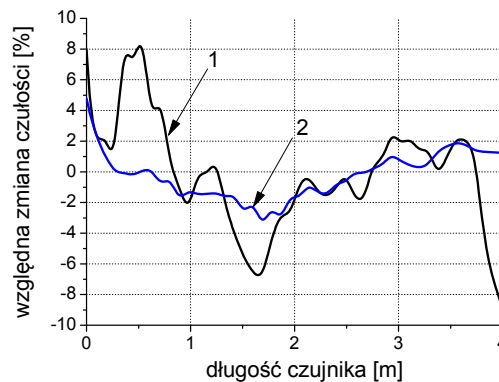


Rys. 2.21. Ilustracja zjawiska przestrzennej powtarzalności nacisku osi

Zróznicowanie „odciśniętego” śladu nacisku wynika z dodatkowych czynników wpływających na dynamikę pojazdu takich jak masa, prędkość, rodzaj zawieszenia, ścieżka przejazdu czy reakcje kierowcy. Przestrzenna powtarzalność nacisku osi może być przyczyną występowania błędów obciążenia wyników ważenia. Gdyby pomiar nacisku odbywał się punkcie x_i wzdłuż drogi (rys. 2.21), to średni wynik ważenia byłby zawyżony o wartość ρ względem składowej stałej nacisku P_0 .

Trzecią przyczyną błędów pomiarowych jest niestacjonarność systemów WIM wyposażonych w polimerowe (piezoelektryczne) czujniki nacisku. Czujniki te wykonane w postaci taśm o długości około 4 metrów, montuje się pod nawierzchnią jezdni, która pośredniczy w przenoszeniu nacisku na czujnik. Wpływa to na dokładność uzyskiwanych wyników ważenia, gdyż asfalt jest lepiszczem, którego właściwości fizyko-mechaniczne są funkcją temperatury i czasu obciążenia. Wraz ze zmianą tych wielkości zmienia się przede wszystkim konsystencja materiału bitumicznego, co w konsekwencji powoduje niestacjonarność systemu (Gaweł, Kalabińska i Piłat 2001). Ograniczenie tej niestacjonarności leży u podstaw opracowanych przez autora metod autokalibracji i korekcji temperaturowej wyników ważenia. Obydwie metody umożliwiają samoczynną kalibrację (korekcję) wyników ważenia, która jest realizowana w sposób ciągły przez sam system. Metody te zostaną szczegółowo omówione w rozdziale 4.

Ostatnią, główną przyczyną mającą wpływ na niedokładność ważenia jest zmienność czułości wzdłuż polimerowych (piezoelektrycznych) czujników nacisku. Jest to cecha charakterystyczna dla tego typu czujników i jest wynikiem stosowanego procesu wytwórczego. Jak wynika z charakterystyki dostarczonej przez producenta (Measurement Specialties 2009), czułość jednego czujnika polimerowego klasy I o długości 4 metrów, a tym samym wynik ważenia, może się zmieniać w granicach $\pm 8.0\%$ (Rys. 2.22).

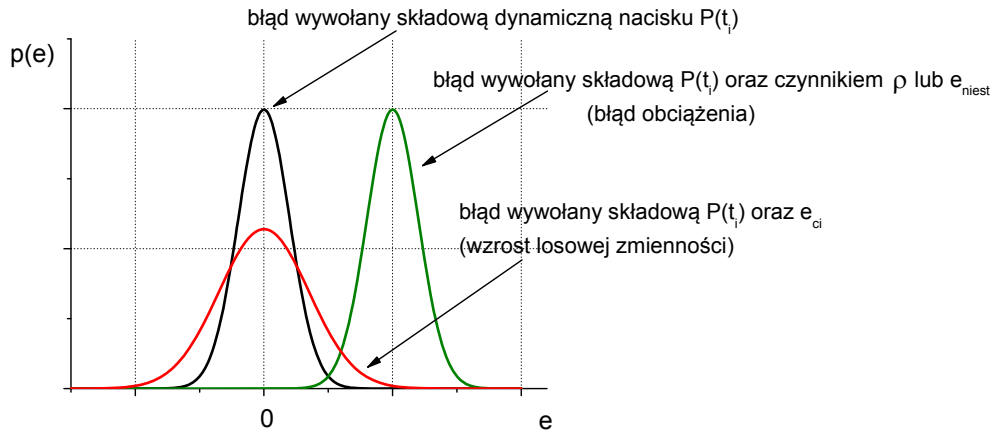


Rys. 2.22. 1 - Względna niejednorodność czułości jednego czujnika piezoelektrycznego, 2 – oraz dla 16 czujników po uśrednieniu

Biorąc pod uwagę powyższe zjawiska, wynik y_i pomiaru nacisku osi przez i -ty czujnik ma charakter losowy i wynosi:

$$y_i = P_0 + P(t_i) + \rho_i + e_{ci} + e_{niest} \quad (2.3)$$

Jeżeli wynik ważenia y_i rozumiemy jako estymatę składowej stałej nacisku osi na podłoże P_0 , to za źródła błędów pomiaru przyjmujemy pionowe wahania pojazdu (składowa dynamiczna $P(t_i)$), przestrzenną powtarzalność nacisku osi (ρ_i), oraz właściwości związane z użytymi czujnikami nacisku (e_{ci} - niejednorodność czułości, e_{niest} - niestacjonarność systemu). Wpływ tych składowych, na rozkład całkowitego błędu ważenia e , obrazuje rysunek 2.23.



Rys. 2.23. Wpływ poszczególnych składowych błędów na rozkład całkowitego błędu ważenia

Niekorzystny wpływ składowej dynamicznej nacisku osi na dokładność estymacji składowej stałej, można ograniczyć poprzez zastosowanie większej liczby czujników nacisku w systemie. Liczba zebranych próbek nacisku danej osi jest wtedy równa liczbie zastosowanych czujników. Czas pomiędzy akwizycją danych z kolejnych czujników zależy od ich wzajemnej odległości oraz prędkości pojazdu. Zebrane w ten sposób próbki, są podstawą estymacji składowej statycznej nacisku osi na podłoże. W tym celu można stosować estymatory o różnym stopniu złożoności, min. estymator LS, estymator największej wiarygodności (Burnos, Gajda, i inni, *Accurate Weighing of Moving Vehicles* 2007), czy sieci neuronowe (Mangeas, Glaser i Dolcemascolo 2002), lecz nawet prosty estymator wartości oczekiwanej daje bardzo dobre rezultaty. W takim przypadku dla p czujników w systemie otrzymujemy:

$$\begin{aligned}
 y_i &= E[P_0] + E[P(t_i)] + E[\rho_i] + E[e_{ci}] + E[e_{niest}] = \\
 &= P_0 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^p P(t_i) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^p \rho_i + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^p e_{ci} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^p e_{niest}
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

y_i jest więc nieobciążoną estymatą składowej stałej nacisku P_0 , tylko wtedy gdy cztery ostatnie składniki równania (2.4) są równe zero.

Wartość oczekiwana $P(t_i)$ dąży do zera ze wzrostem liczby czujników, pod warunkiem że w ważonym pojeździe nie występuje transfer masy z jednej osi na drugą, np. wskutek przyspieszania/hamowania pojazdu podczas ważenia. Składowe $E[\Delta\rho_i]$ i $E[e_{ci}]$ można ograniczyć w ten sam sposób, gdyż ich rozkłady na ścieżce przejazdu pojazdu posiadają zerową wartość oczekiwaną.

Jedynym błędem, którego nie da się ograniczyć poprzez zastosowanie większej liczby czujników w systemie jest błąd związany z niestacjonarnością systemu. Wartość oczekiwana e_{niest} , jest funkcją wpływu czynników zewnętrznych na system, głównie temperatury. Składową tą, oraz wpływ przestrzennej powtarzalności ścieżki przejazdu pojazdu można ograniczyć poprzez regularną kalibrację systemu wykorzystując jedną z klasycznych metod kalibracji systemów WIM lub poprzez zastosowanie alternatywnych algorytmów opracowanych przez autora. W następnym punkcie opisano klasyczne, powszechnie stosowane metody kalibracji systemów WIM.

2.6 Kalibracja systemów WIM

Kalibracja inaczej wzorcowanie – jest to ogół czynności ustalających relację między wartościami wielkości mierzonej wskazanymi przez przyrząd pomiarowy, a odpowiednimi wartościami wielkości fizycznych, realizowanymi przez wzorzec jednostki miary (Okręgowy Urząd Miar 2009).

Celem kalibracji systemu WIM jest eksperymentalne wyznaczenie współczynnika kalibracji C , rozumianego jako liczby, przez którą należy pomnożyć uzyskane z układu pomiarowego wyniki, aby otrzymać ocenę nacisku statycznego osi pojazdu na podłoże lub masę całkowitą wyrażoną w kilogramach zgodnie z zależnością (2.5).

$$y_s(i) = \frac{1}{C} \cdot y(i) \quad (2.5)$$

gdzie:

$y_s(i)$ – skalibrowany wynik ważenia i -tego pojazdu tj. ocena masy całkowitej pojazdu lub nacisku statycznego wybranej osi,
 $y(i)$ – nie kalibrowany wynik ważenia i -tego pojazdu tj. wynik przetwarzania sygnału nacisku z czujników systemu WIM.

W procesie tym elementem kluczowym jest wzorzec wielkości mierzonej. Zgodnie z definicją wzorzec jest to narzędzie pomiarowe odtwarzające jednostkę miary lub jej wielokrotność (Poniński, Siedlecki i Chwaleba 2000). Od wzorców wymaga się:

- niezmienności w czasie,
- łatwej porównywalności,
- łatwości odtwarzania,
- dużej dokładności,
- łatwości stosowania.

W przypadku systemów WIM używa się różnych przyrządów posiadających cechy wzorca, m.in.: statycznych lub dynamicznych zadajników siły, pojazdu oprzyrządowanego posiadającego zdolność ciągłego pomiaru nacisku kół na podłoże, lub popularnej metody pojazdu wstępnie zważonego. Niestety z przyczyn, o których była mowa w punkcie 2.2, spełnienie wymagań stawianych wzorcom przez np. nacisk danej osi pojazdu wstępnie zważonego nie jest możliwe. Nacisk wywierany przez osie poruszającego się pojazdu jest zmienny i dla każdego przejazdu tego samego pojazdu przez stanowisko WIM inny. Rozrzut nacisku wokół wartości oczekiwanej (nacisku statycznego) jest nieunikniony i zależy od wielu czynników. W takim przypadku nie można więc mówić wprost o wzorcu wielkości mierzonej, a jedynie o „wielkości odniesienia”, która posiada cechy zmiennej losowej, której parametry można ocenić metodami statystycznymi.

Wybór metody kalibracji zależy w głównej mierze od rodzaju i przeznaczenia systemu WIM (estymacja masy całkowitej, nacisków osi lub chwilowej wartości nacisku osi), oraz zastosowanych czujników nacisku. Metoda wykorzystująca statyczne zadajniki siły nadaje się wyłącznie do systemów wyposażonych w czujniki przenoszące stałe wymuszenie (np. czujniki pojemnościowe). Nie uwzględnia stanu nawierzchni drogi oraz oddziaływania dynamicznego pojazd – nawierzchnia. Z kolei zadajniki generujące dynamiczne udary charakteryzują się małą powtarzalnością wymuszenia. W praktyce zaprzestano stosowania obydwu metod kalibracji.

2.6.1 Metoda pojazdu wstępnie zważonego

Jest to najpopularniejsza obecnie metoda kalibracji, odpowiednia dla większości systemów ważących. Pojazdów wstępnie zważonych powinno być kilka o zróżnicowanych masach całkowitych i typach zawieszenia. W trakcie kalibracji przejeżdżają one wielokrotnie z różnymi prędkościami przez stanowisko WIM. Zgodnie z zaleceniami zawartymi w (COST 323 1999) możliwe są następujące warianty tej metody:

- (r1) kilkukrotny przejazd jednego pojazdu z tą samą prędkością, oraz ładunkiem,
- (r2) kilkukrotny przejazd jednego pojazdu z różną prędkością (zależną od warunków drogowych) oraz różnym ładunkiem (pojazd załadowany w pełni, połowicznie, lub pusty),
- (R1) kilkukrotny przejazd serii pojazdów (zazwyczaj 2 do 10) reprezentatywnych dla struktury ruchu drogowego na danym obszarze, przy czym każdy przejazd odbywa się z inną prędkością,
- (R2) przejazd dużej kolumny pojazdów (dziesiątki lub setki) reprezentatywnych dla struktury ruchu drogowego na danym obszarze, pojazdy są ważone statycznie przed lub po przejechaniu stanowiska WIM.

Powyższe warianty metody różnią się stopniem odwzorowania potoku pojazdów w punkcie pomiaru. Wariant (r1) daje najmniej wiarygodną, a wariant (R2) najbardziej wiarygodną reprezentację populacji pojazdów. Niezależnie od wariantu metody, każdy pojazd

powinien być ważony przynajmniej 10 razy. Pozwala to ograniczyć wpływ zjawisk dynamicznych „pojazd-jezdni” na dokładność kalibracji. Dodatkowo zalecenia mówią, aby dla każdego obciążenia pojazdu przejazd był wykonywany z różnymi prędkościami, dwiema lub trzema charakterystycznymi dla miejsca zainstalowania systemu: 60% przejazdów powinno być wykonane z maksymalną dozwoloną prędkością w danym miejscu, 20% z prędkością 1.2 razy większą i 20% z prędkością 0.8 razy mniejszą od dozwolonej. Dla nowo zainstalowanych systemów lub tych, które wymagają rekalkibracji zaleca się stosowanie wariantu R1 metody z co najmniej czterema pojazdami.

Zarejestrowane wyniki ważenia pojazdów wstępnie zważonych, stanowią podstawę estymacji współczynnika kalibracji. Proces ten, w warunkach normalnego ruchu drogowego zajmuje zwykle 3 – 8 godzin. Stąd kalibracja taka powinna być prowadzona w dniu, w którym nie występują znaczące zmiany temperatury. Metoda jest czasochłonna, kosztowna (koszt wynajęcia samochodów i pracy zespołu ludzi) i pomimo prostoty idei trudna do przeprowadzenia ze względu na liczne dodatkowe wymagania (stała temperatura otoczenia, stała prędkość pojazdu, eliminacja powtarzalności ścieżki przejazdu, zapewnienie różnorodności dynamicznych właściwości zawieszenia, minimalizacja błędów dynamicznych, korekcja ubytku masy spowodowana zużyciem paliwa).

2.6.2 Metoda pojazdu oprzyrządowanego

Metoda jest przeznaczona do kalibracji systemów HS- i MS-WIM. Polega na wykorzystaniu pojazdu wyposażonego w zestaw aparatury pomiarowej, który umożliwia „samo-ważenie” tzn. ciągłą estymację chwilowej wartości siły nacisku wywieranej przez wybraną oś na podłoże (Kalibra 2009). Jest to zdecydowaną zaletą metody, gdyż pozwala na precyzyjne określenie nacisku osi na czujnik w chwili pomiaru. Tym samym eliminuje to konieczność wielokrotnego powtarzania przejazdów w celu ograniczenia czynnika losowego związanego z pionowymi wahaniami pojazdu. Dokładność takiego pomiaru zależy w dużym stopniu od jakości zainstalowanej w pojeździe aparatury pomiarowej jak również od synchronizacji danych uzyskanych z systemu pokładowego i kalibrowanego systemu WIM.



Rys. 2.24. Pojazd oprzyrządowany

Kalibracja z wykorzystaniem takiego pojazdu powinna być wykonana dla trzech różnych obciążeń i różnych prędkości. Teoretycznie, przy spełnieniu powyższych warunków, dla każdej konfiguracji ładunek – prędkość wystarcza tylko jeden przejazd przez stanowisko WIM. Ogranicza to znacznie czas potrzebny na przeprowadzenie kalibracji. Do wad metody należy zaliczyć bardzo wysokie koszty i trudności operowania pojazdem, który wymaga wysoce wyspecjalizowanej obsługi technicznej, oraz trudności z synchronizacją wyników z systemu pokładowego i naziemnego.

Przedstawione metody kalibracji są czasochłonne, kosztowne, a popularna metoda pojazdu wstępnie zważonego wymaga użycia kilku samochodów ciężarowych wielokrotnie przejeżdżających przez stanowisko ważące. Stanowi to duże przedsięwzięcie logistyczne oraz często wymaga wyłączenia z ruchu fragmentu drogi. Z tych powodów kalibrację metodami klasycznymi przeprowadza się nie częściej niż raz na 6 miesięcy. Mając na uwadze fakt, że systemy WIM z czujnikami polimerowymi są niestacjonarne, a ich parametry mogą ulegać istotnej zmianie w ciągu doby wskutek zmian temperatury, to dwukrotna kalibracja systemu w ciągu roku nie zapewnia kompensacji wpływu czynników zewnętrznych na wynik pomiaru.

2.6.3 Metoda pojazdu odniesienia

Zwiększenie częstotliwości kalibracji jest możliwe poprzez zastosowanie metody wykorzystującej tzw. pojazdy odniesienia. Jej podstawy po raz pierwszy zostały sformułowane w 1984 roku w pracach (Stanczyk 1984), (Stanczyk i Jacob 1997). Idea metody opiera się na założeniu, że za wielkość odniesienia służącą do kalibracji systemów WIM, można wykorzystać nacisk osi lub masę całkowitą charakterystycznej grupy pojazdów. Jeżeli wartości średnie tych wielkości są znane to po zgromadzeniu odpowiednio dużej liczby wyników ważenia pojazdów tego typu na kalibrowanym stanowisku WIM, można wyznaczyć współczynnik kalibracji w sposób analogiczny jak w przypadku metody pojazdu wstępnie zważonego. Dzięki temu częstotliwość kalibracji wzrasta do kilku razy w ciągu doby i zależy jedynie od częstotliwości pojawiania się pojazdów odniesienia na kalibrowanym stanowisku.

Potencjał metody pojazdu odniesienia wykracza poza okresową kalibrację stanowiska. Pojazdy takie, jako źródło względnie stabilnej wielkości odniesienia, można wykorzystać do:

- ciągłej kalibracji systemu WIM (metoda autokalibracji),
- wyznaczenia charakterystyki temperaturowej stanowiska WIM (metoda korekcji temperaturowej),
- monitorowania stanu systemu WIM lub identyfikacji jego parametrów.

Ponieważ w dalszej części pracy autor będzie wielokrotnie odwoływał się do cech pojazdów odniesienia w tym miejscu zostaną one dokładnie opisane. Rozwijając ideę

kalibracji z wykorzystaniem tego typu pojazdów, autor sformułował hipotezę, że za wielkość odniesienia mogą służyć wyniki ważenia pewnej kategorii pojazdów biorących udział w ruchu drogowym, przy czym populacja takich pojazdów powinna charakteryzować się następującymi cechami:

- masa całkowita lub nacisk danej osi powinien posiadać znaną wartość oczekiwaną oraz dla poszczególnych pojazdów powinno występować możliwie małe względne losowe odchylenie od tej wartości;
- udział populacji takich pojazdów powinien być duży na tle innych pojazdów przejeżdżających przez kalibrowane stanowisko WIM,
- pojazdy takie powinny być łatwo rozpoznawalne przez kalibrowany system.

Pojazdy spełniające te warunki i wykorzystywane w procesie autokalibracji oraz korekcji temperaturowej wyników ważenia dalej będą nazywane pojazdami odniesienia. Typ tych pojazdów nie jest z góry ustalony, gdyż struktura rodzajowa ruchu drogowego na terenie Europy jest niejednorodna. Dla każdego kraju, grupa pojazdów odniesienia powinna być wyznaczana indywidualnie. Ich wyboru w warunkach polskich, autor dokonał analizując wyniki ważenia pochodzące z dwóch źródeł:

- systemu HS-WIM zainstalowanego w Gardawicach - dane te posłużyły do zgrubnej oceny właściwości różnych kategorii pojazdów i na tej podstawie do wyłonienia grup posiadających cechy pojazdów odniesienia,
- Inspekcji Transportu Drogowego - wyniki ważenia na statycznych wagach administracyjnych posłużyły do dokładnej oceny wartości oczekiwanej wielkości odniesienia.

W pierwszej kolejności analizie poddano wyniki ważenia z systemu HS-WIM zainstalowanego w Gardawicach. Pomiary przeprowadzono w okresie od 10.01 do 11.03 2007 roku i zarejestrowano 403148 pojazdów. Wykorzystując opracowaną przez autora klasyfikację ALT (dodatek A), pojazdy podzielono na kategorie o zbliżonych cechach, takich jak liczba i rozstaw osi, masa całkowita czy przeznaczenie użytkowe pojazdów. Algorytm klasyfikacji działa w sposób automatyczny wykorzystując informację o rozstawie osi i zastępczej długości elektrycznej pojazdu. Dzięki zastosowaniu miar rozmytych oraz fuzji danych uzyskano wysoką efektywność klasyfikacji. W ten sposób pojazdy podzielono na 20 najczęściej występujących kategorii w Polsce. Następnie dla nacisków wszystkich osi oraz masy całkowitej pojazdów zakwalifikowanych do danej kategorii, oceniono parametry statystyczne takie jak wartość oczekiwana, odchylenie standardowe oraz unormowana macierz kowariancji. Poniżej podano definicje oraz interpretacje tych charakterystyk statystycznych.

Dla zbioru realizacji $x(i)$, $i=1, 2, \dots, N$, losowej zmiennej ergodycznej, nieobciążonej estymatory wartości oczekiwanej i odchylenia standardowego przyjmują następującą postać (Gajda 2002):

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x(i) \quad (2.6)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N [x(i) - \bar{x}]^2}, \quad (2.7)$$

Natomiast macierz kowariancji wyznaczona dla L zmiennych losowych $X = [x_1, x_2, \dots, x_L]^T$:

$$C = E[(X - \bar{X}) \cdot (X - \bar{X})^T] \quad (2.8)$$

Macierz ta jest kwadratowa i symetryczna o wymiarze równym liczbie zmiennych losowych. Jej elementy diagonalne są równe wariancjom kolejnych zmiennych a poza diagonalne kowariancjom pomiędzy odpowiednimi zmiennymi losowymi:

$$c_{ii} = E[(x_i - E[x_i]) \cdot (x_i - E[x_i])] = \sigma_{x_i}^2 \quad (2.9)$$

$$c_{ij} = E[(x_i - E[x_i]) \cdot (x_j - E[x_j])] = \text{cov}[x_i, x_j] \quad (2.10)$$

Macierz kowariancji można przestawić w następującej postaci:

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1L} \\ c_{21} & c_{21} & \dots & c_{2L} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{N1} & c_{N2} & \dots & c_{LL} \end{bmatrix}_{L \times L} = \begin{bmatrix} \sigma_{x_1}^2 & \text{cov}[x_1, x_2] & \dots & \text{cov}[x_1, x_L] \\ \text{cov}[x_2, x_1] & \sigma_{x_2}^2 & \dots & \text{cov}[x_2, x_L] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \text{cov}[x_L, x_1] & \text{cov}[x_L, x_2] & \dots & \sigma_{x_L}^2 \end{bmatrix}_{L \times L} \quad (2.11)$$

Czasami wygodniej jest posługiwać się unormowaną macierzą kowariancji R , której elementy są równe:

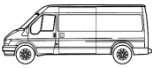
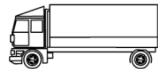
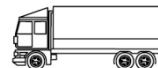
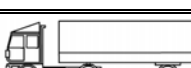
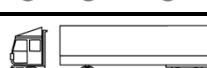
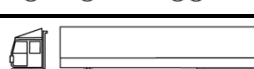
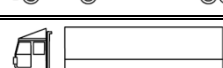
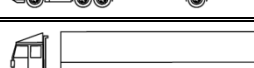
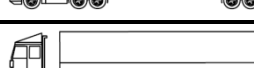
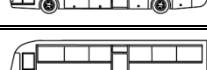
$$R_{ij} = \frac{\text{cov}[x_i, x_j]}{\sqrt{\sigma_i^2 \cdot \sigma_j^2}} \quad (2.12)$$

Przyjmują one wartości z przedziału $[-1; 1]$, przy czym wartość 1 oznacza pełną korelację, 0 jej całkowity brak, a -1 korelację przeciwną. Macierz ta ma postać:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \dots & \rho_{1L} \\ \rho_{21} & 1 & \dots & \rho_{2L} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \rho_{L1} & \rho_{L2} & \dots & 1 \end{bmatrix}_{L \times L} \quad (2.13)$$

Wyznaczenie powyższych charakterystyk w zbiorze wyników ważenia danej kategorii pojazdów pozwoliło na jakościową ocenę statystycznych właściwości potencjalnych wielkości odniesienia. Wyniki zebrano w tabelach 2.7 i 2.8.

Tabela 2.7: Podział pojazdów na kategorie wg klasyfikacji ALT i ocena parametrów statystycznych nacisku osi

			I oś	II oś	III oś	IV oś	V oś	VI oś	Masa	N
Nr	Symbol Kategorii	Symbol graficzny	Wartości średnie [t]							Liczba pojazdów
			Względne odchylenia standardowe [-]							
2	2C		0.52	0.38					0.91	277590
			0.32	0.40					0.33	
3	2C+1R		0.85	0.86	0.36				2.08	1798
			0.65	0.78	1.31				0.73	
4	2C+2R		0.88	0.88	0.37	0.31			2.47	885
			0.42	0.62	0.80	0.95			0.49	
5	2D		1.16	1.03					2.19	42680
			0.46	0.65					0.49	
6	2L		2.82	3.55					6.38	23008
			0.52	0.60					0.53	
7	3L		5.76	6.77	5.50				18.05	1926
			0.27	0.37	0.49				0.32	
8	4L		5.18	5.32	8.01	7.68			26.23	520
			0.24	0.24	0.36	0.38			0.29	
9	2L+2R		4.46	5.40	2.89	2.89			15.67	2580
			0.35	0.40	0.62	0.65			0.43	
10	2L+3R		5.73	7.17	4.76	4.76	4.80		27.28	202
			0.19	0.44	0.49	0.52	0.57		0.40	
11	3L+2R		6.19	6.59	5.00	5.21	4.98		28.02	1962
			0.20	0.33	0.42	0.44	0.45		0.31	
12	3L+3R									
13	2T+1S		4.73	4.40	4.14				13.29	110
			0.26	0.44	0.41				0.29	
14	2T+2S		5.53	4.41	3.12	3.09			16.19	7124
			0.13	0.29	0.38	0.40			0.23	
15	2T+3S		6.06	6.72	5.28	5.38	5.29		28.78	35444
			0.14	0.35	0.44	0.44	0.45		0.33	
16	3T+1S									
17	3T+2S		5.41	5.75	5.28	5.17	5.25		26.90	116
			0.18	0.42	0.48	0.53	0.57		0.37	
18	3T+3S		5.67	5.08	4.51	4.60	4.37	4.25	28.53	78
			0.17	0.45	0.50	0.54	0.54	0.53	0.38	
19	2A		4.50	7.40					11.91	5341
			0.23	0.22					0.19	
20	3A		6.12	7.02	4.61				17.79	220
			0.20	0.23	0.25				0.18	

Jak wynika z tabeli 2.7 najmniejszą losową zmiennością charakteryzuje się nacisk pierwszej osi pojazdów z kategorii 14 i 15 czyli członowych pojazdów cztero i pięcioosiowych, w skład których wchodzi dwuosiowy ciągnik siodłowy oraz odpowiednio dwu i trzyosiowa naczepa. Dodatkowo przedstawione w tabeli 2.8 wyniki wskazują, że nacisk pierwszej osi pojazdów z kategorii 15 jest najslabiej skorelowany z naciskami pozostałych osi oraz z masą całkowitą pojazdu.

Tabela 2.8 Macierz kowariancji nacisków osi pojazdów z kategorii 15

	I oś	II oś	III oś	IV oś	V oś	masa c.
I oś	1	0.50	0.53	0.54	0.53	0.61
II oś	0.50	1	0.83	0.79	0.79	0.89
III oś	0.53	0.83	1	0.95	0.93	0.97
IV oś	0.54	0.79	0.95	1	0.96	0.97
V oś	0.53	0.79	0.93	0.96	1	0.96
masa c.	0.61	0.89	0.97	0.97	0.96	1

Oznacza to, że nacisk tej osi jest względnie stabilny i w niewielkim stopniu zależy od przewożonego ładunku czyli masy pojazdu. Obserwowana korelacja oraz losowa zmienność jest 2 do 5 razy mniejsza niż dla innych kategorii pojazdów. Dodatkowo udział pojazdów z kategorii 15 w ruchu jest 5 razy większy niż pojazdów z kategorii 14, co przemawia na korzyść grupy samochodów pięcioosiowych. Co więcej pojazdy takie są łatwo rozpoznawalne przez system, gdyż rozmieszczenie trzech osi naczepy występuje we wzajemnych odległościach równych 1310 mm.

Na podstawie powyższych przesłanek, na pojazdy odniesienia wybrano pięcioosiowe pojazdy członowe, w skład których wchodzi dwuosiowy ciągnik siodłowy i trzyosiowa naczepa. Za wielkość odniesienia przyjęto wartość średnią nacisku I osi tych pojazdów.

Znając rodzaj pojazdów odniesienia należało jeszcze wyznaczyć dokładną wartość wielkości odniesienia. W tym celu posłużono się wynikami ważenia otrzymanymi od Inspekcji Transportu Drogowego, która do kontroli używa statycznych wag administracyjnych posiadających świadectwo legalizacji. Na prośbę o udostępnienie danych z kontroli pojazdów odpowiedziało kilka inspektoratów z całego kraju. Łącznie nadesłano 308 wyników ważenia pojazdów z kategorii 15. Dla tak zgromadzonej populacji wyznaczono parametry statystyczne (2.6), (2.7) i (2.13):

Tabela 2.9

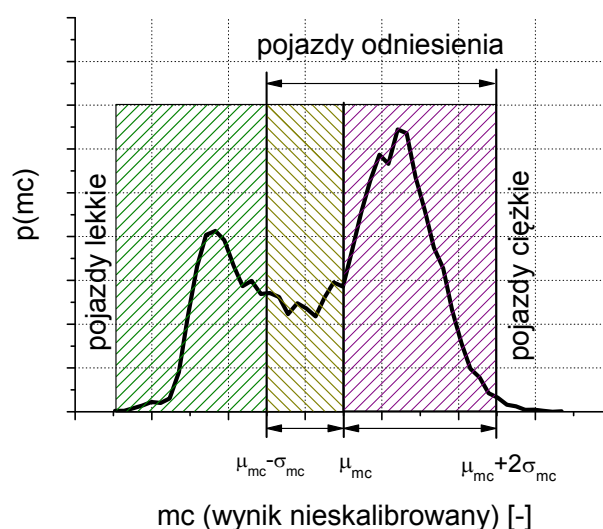
	$\bar{x}$	$s_x/\bar{x}$
I oś	61.670 kN	0.10
II oś	96.604 kN	0.17
III oś	64.980 kN	0.24
IV oś	64.638 kN	0.23
V oś	64.827 kN	0.22
masa c.	35.955 ton	0.17

Tabela 2.10

	I oś	II oś	III oś	IV oś	V oś	masa całk.
I oś	1	0.63	0.41	0.43	0.43	0.59
II oś	0.63	1	0.63	0.66	0.67	0.83
III oś	0.41	0.63	1	0.97	0.94	0.94
IV oś	0.43	0.66	0.97	1	0.97	0.95
V oś	0.43	0.67	0.94	0.97	1	0.95
masa c.	0.59	0.83	0.94	0.95	0.95	1

Wartość średnia nacisku I osi przyjęta za wartość wielkości odniesienia wynosi: $\mu_0 = 61.670 \text{ kN}$.

Na uwagę zasługuje fakt, że wartość średnia masy całkowitej kontrolowanych przez ITD pojazdów przekracza 35 ton. Oznacza to, że ITD protokołuje wyniki ważenia tylko tych pojazdów, które przewożą ładunek, lub przekroczyły dopuszczalne normy. Zostało to potwierdzone w rozmowie z pracownikami inspektoratu małopolskiego. Na pojazdy odniesienia powinny więc być wybierane tylko te, których masa całkowita mc przekracza pewną wartość graniczną lub znajduje się w określonym przedziale (pojazdy załadowane). To ograniczenie rodzi problem wyboru pojazdów odniesienia, na podstawie pomiaru masy całkowitej pojazdów z kategorii 15 w systemie WIM, który dopiero ma być skalibrowany z wykorzystaniem tych pojazdów. Tą pozorną sprzeczność można w prosty sposób rozwiązać wykorzystując rozkład gęstości prawdopodobieństwa nieskalibrowanych wyników ważenia. Rozkład ten dla pojazdów z kategorii 15 oraz zasadę wyboru pojazdów odniesienia ilustruje rysunek 2.25 (oznaczenia μ_{mc} i σ_{mc} to odpowiednio wartość średnia oraz odchylenie standardowe nieskalibrowanych wyników ważenia):



Rys. 2.25. Rozkład masy całkowitej pojazdów z kategorii 15 i kryterium wyboru pojazdów odniesienia

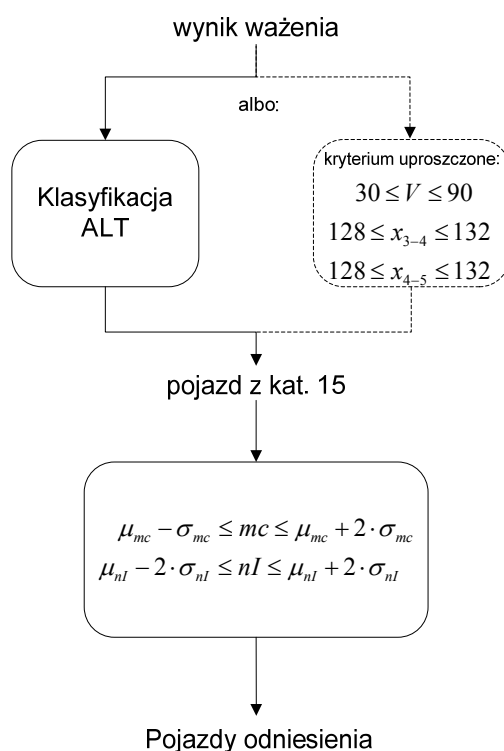
Znając parametry statystyczne μ_{mc} i σ_{mc} można wyznaczyć przedział wartości niekalibrowanych wyników ważenia, który będzie odpowiadał pojazdom najcięższym:

$$\mu_{mc} - \sigma_{mc} \leq mc \leq \mu_{mc} + 2 \cdot \sigma_{mc} \quad (2.14)$$

Aby w grupie pojazdów odniesienia ograniczyć udział tych, u których nacisk I osi nI znacząco odbiega od wartości wielkości odniesienia μ_0 , sformułowano analogiczne kryterium dla nacisku tej osi:

$$\mu_{nI} - 2 \cdot \sigma_{nI} \leq nI \leq \mu_{nI} + 2 \cdot \sigma_{nI} \quad (2.15)$$

gdzie μ_{nI} i σ_{nI} to odpowiednio wartość średnia oraz odchylenie standardowe nieskalibrowanych wyników ważenia I osi pojazdów z kategorii 15. Rozważania te prowadzą ostatecznie do pokazanego na rysunku 2.26 kryterium wyboru pojazdów odniesienia. Ponieważ pojazdy z kategorii 15 są łatwo rozpoznawalne przez system zamiast klasyfikacji ALT, można użyć uproszczonego kryterium wyboru tych pojazdów bazując jedynie na pomiarze odległości między trzema ostatnimi osiami:



Rys. 2.26 Schemat wyboru pojazdów odniesienia

gdzie:

V – prędkość [km/h],

x_{3-4} , x_{4-5} – rozstaw pomiędzy osiami 3 i 4 oraz 4 i 5 [m].

Alternatywny sposób selekcji pojazdów z kategorii 15 nie wpływa w istotny sposób na jej efektywność, a tym samym liczbę wytypowanych pojazdów. W ciągu doby przez stanowisko ważące w Gardawicach przejeżdża około 300 pojazdów spełniających sformułowane powyżej wymagania dla pojazdów odniesienia.

2.7 Podsumowanie

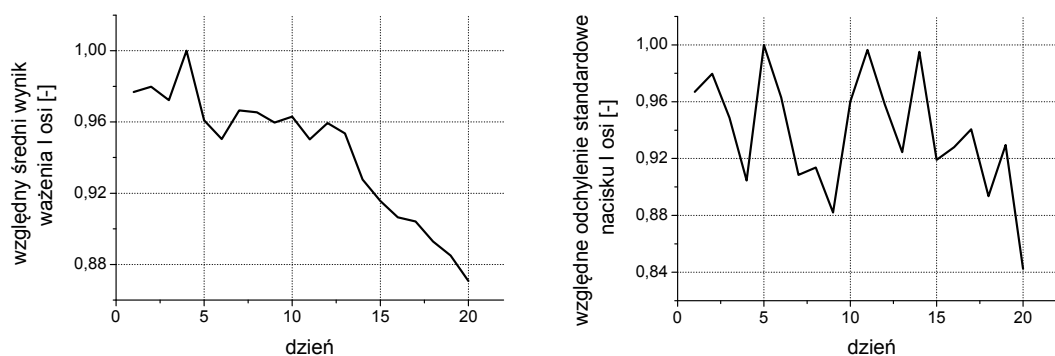
W niniejszym rozdziale zawarto wprowadzenie do szeroko rozumianej tematyki kontroli wagi pojazdów samochodowych. Skalę problemu obrazują przytoczone przykłady (raport o stanie dróg krajowych), oraz wymienione czynniki potęgujące niszczący wpływ pojazdów najcięższych na nawierzchnie drogowe (wzrost natężenia ruchu drogowego, zmiany konstrukcyjne pojazdów, niedostosowanie infrastruktury drogowej w Polsce do wymogów UE). Celem efektywnej eliminacji z ruchu pojazdów przeciążonych, w latach 90-tych rozpoczęto intensywnie prace badawcze nad systemami ważącymi. Zaowocowało to gwałtownym rozwojem systemów WIM, które pomimo podjętych wysiłków do dziś pracują jedynie jako uzupełnienie statycznych stanowisk kontroli pojazdów (co wynika z bardzo ograniczonej dokładności uzyskiwanych wyników ważenia). Przyczyny tego stanu rzeczy mają różnoraki charakter i zależą od właściwości użytych czujników nacisku, jakości nawierzchni na stanowisku ważącym (amplitudy pionowych wahań pojazdu), niestacjonarności systemu czy problemów natury prawnej (brak wzorca). Klasyczne metody kalibracji systemów ważących, dzięki którym można zwiększyć dokładność uzyskiwanych wyników ważenia są czasochłonne i drogie, a przez to nieefektywne. W konsekwencji proces kalibracji systemów WIM z ich użyciem jest powtarzany nie częściej niż co kilka miesięcy. W poszukiwaniu nowych, bardziej efektywnych metod kalibracji systemów WIM w punkcie 2.6.3 rozwinęto ideę metody pojazdów odniesienia. Pojazdy te, są wykorzystywane w metodzie autokalibracji oraz korekcji temperaturowej. Zanim jednak metody te zostaną w pełni przedstawione (rozdział 4), zasadne wydaje się jakościowe i ilościowe opisanie właściwości systemów WIM wyposażonych w polimerowe czujniki nacisku. Poznanie mechanizmów wywołujących niestacjonarność w systemach tego typu pozwoli na lepsze zrozumienie zasady działania algorytmów przeciwdziałającym skutkom tej niestacjonarności.

3. Modelowanie systemu WIM z czujnikami polimerowymi

Systemy WIM z czujnikami polimerowymi są najbardziej rozpowszechnione wśród systemów ważących pojazdy samochodowe przy prędkościach drogowych. Duża popularność takich rozwiązań wynika z niskiej ceny czujników, ich łatwego montażu i prostej obsługi systemu nadrzędnego. Niestety, podstawową wadą takich rozwiązań jest ograniczona dokładność uzyskiwanych wyników ważenia. Ta patowa sytuacja na rynku systemów WIM z czujnikami polimerowymi utrzymuje się od kilku lat – tanie rozwiązania nie są wystarczająco dokładne. Istnieje więc potrzeba prowadzenia badań nad systemami tego typu, których celem byłoby poznanie i zrozumienie ich właściwości, a to pozwoliłoby na świadome przeciwdziałanie przyczynom wywołującym dużą niedokładność wyników ważenia. Ponieważ istnieją uzasadnione przesłanki co do niestacjonarności systemów WIM z czujnikami polimerowymi, w rozdziale tym opisano właściwości takich systemów pod kątem ich niestacjonarności. Druga część rozdziału poświęcona jest wyznaczeniu modelu systemu WIM. Znajomość struktury takiego modelu pozwoli jednoznacznie określić przyczynę niestacjonarności systemu oraz umożliwi lepsze zrozumienie tego zjawiska.

3.1 Opis właściwości systemów WIM wyposażonych w taśmowe czujniki polimerowe

System pomiarowy jest niestacjonarny wtedy, gdy jego parametry zmieniają się w czasie. Miarą tej niestacjonarności może być zakres zmian wyników pomiarowych pod warunkiem, że system za każdym razem pobudzany jest takim samym wymuszeniem, najlepiej wartością wzorcową wielkości mierzonej. W przypadku systemów WIM do tego celu można użyć pojazdu wstępnie zważonego, pojazdu oprzyrządowanego, lub pojazdów odniesienia. Ponieważ badanie długoterminowej niestacjonarności systemu WIM wymaga rejestracji co najmniej kilkunastodniowych wykorzystanie w tym celu pojazdów odniesienia było jedyną możliwością. Problem identyfikacji czynników mających wpływ na wynik ważenia, pierwszy raz pojawił się podczas analizy danych pomiarowych z 2003 roku, pochodzących ze stanowiska WIM z dwoma czujnikami polimerowymi zainstalowanego w Woli Dębińskiej (Bajor i Zygmunt 1999). Stwierdzono wtedy, iż wyniki ważenia silnie zależą od czynników atmosferycznych takich jak temperatura i wilgotność powietrza. Jednak ze względu na brak wystarczającej ilości danych oraz techniczną degradację stanowiska, przeprowadzenie dokładnej analizy nie było możliwe. Badania wznowiono pod koniec 2005 roku po zakończeniu budowy stanowiska ważącego w miejscowości Gardawice. Analizując wyniki pochodzące z nowego systemu WIM, stwierdzono zmiany wartości średniej oraz odchylenia standardowego wielkości odniesienia w kolejnych okresach 24 – godzinnych (Burnos 2006). Na rysunku 3.1 przedstawiono tę zmienność dla danych pochodzących z listopada 2005 roku.

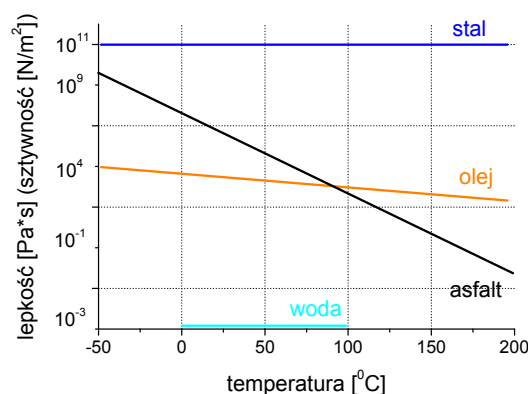


Rys. 3.1. Zmienność parametrów statystycznych nacisku I osi pojazdu odniesienia w czasie

Na przestrzeni 20 dni zaobserwowano ponad 12% zmianę wartości średniej oraz 15% zmianę odchylenia standardowego wyników ważenia. Przyczyną tego zjawiska nie może być stopniowa zmiana nacisku pierwszej osi pojazdów odniesienia, ze względu na brak logicznego uzasadnienia takiej sytuacji. Obserwowana niestacjonarność może być wywołana zmianą własności samych czujników, nawierzchni, w której są one zamontowane lub parametrów charakteryzujących system akwizycji i przetwarzania danych pomiarowych.

W systemach z czujnikami polimerowymi przenoszenie sygnału pomiarowego przez nawierzchnię jezdni powoduje, że wyniki ważenia są bardzo wrażliwe na zmiany jej parametrów (Jacob i O'Brien 2002).

Asfalt jest lepiszczem, którego właściwości fizyko-mechaniczne są funkcją temperatury i czasu obciążenia. Wraz ze zmianą tych wielkości zmienia się przede wszystkim konsystencja materiału bitumicznego charakteryzowana przez lepkość i sprężystość (Gaweł, Kalabińska i Piłat, Asfalty Drogowe 2001) , (Pavement Interactive 2009).



Rys. 3.2 Zmienność lepkości (sztywności) materiałów pod wpływem zmian temperatury

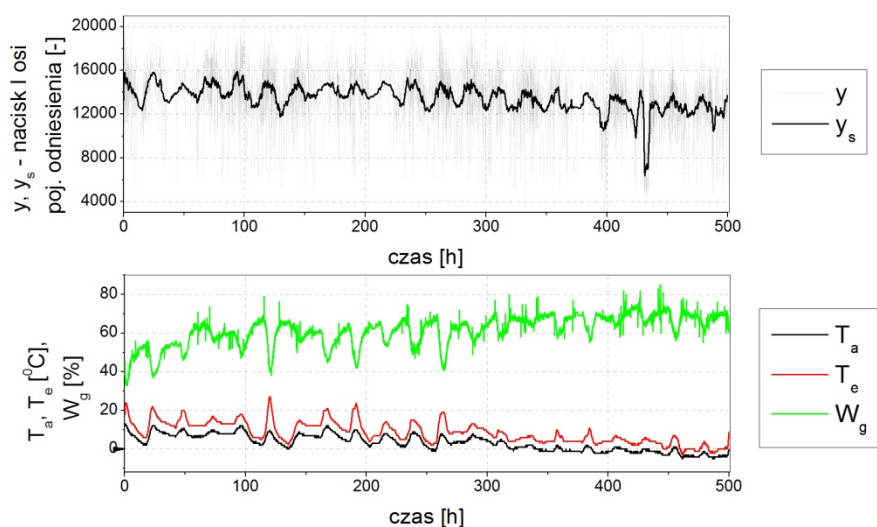
W Polsce zakres temperatur eksploatacyjnych nawierzchni asfaltowych określono na około -40°C do 70°C (najwyższa temperatura jaką może osiągnąć nawierzchnia przy temperaturze powietrza 40°C). Przy tak dużej zmianie temperatur, asfalt zmienia konsystencję od stanu sprężystego, przez stan lepkosprężysty do stanu lepkiego co ma niewątpliwie wpływ

na sygnał pomiarowy docierający do czujnika nacisku. Pozostałe czynniki mogące wpływać niekorzystnie na dokładność ważenia są związane z analogowym układem kondycjonowania sygnału z czujników nacisku. Pomimo zastosowania wysokiej jakości elementów elektronicznych, nie można wykluczyć wrażliwości układu na wahania temperatury wewnątrz szafy pomiarowej. Zmiany temperatury mogą mieć wpływ na punkt pracy członów wzmacniających (Tietze i Schenk 1993). Dodatkowo, ze względu na specyfikę budowy systemu nie można również pominąć niekorzystnego wpływu zmian wilgotności powietrza na zmianę rezystancji wejściowej układu. Na podstawie powyższych przesłanek postawiono hipotezę, iż istnieją czynniki zewnętrzne takie jak temperatura asfaltu, temperatura aparatury pomiarowej oraz wilgotność powietrza, które mogą mieć wpływ na otrzymywane wyniki ważenia. Wstępna analiza danych pomiarowych wskazuje na istotną niestacjonarność systemu WIM. Miarą tej niestacjonarności może być zakres zmian wyników ważenia pierwszej osi pojazdów odniesienia. Ciągła rejestracja i analiza tych wyników umożliwia zatem śledzenie „stanu” systemu ważącego. W połączeniu z równoległą rejestracją temperatury asfaltu i aparatury pomiarowej oraz wilgotności powietrza, stwarza to możliwość ilościowej oceny wpływu tych czynników na system ważący.

Na rysunku 3.3 przedstawiono zmienność nieskalibrowanego wyniku ważenia nacisku I osi pojazdów odniesienia oraz zarejestrowane przebiegi temperatury asfaltu (T_a), wilgotności powietrza (W_g) i temperatury aparatury pomiarowej (T_e). Aby na tle losowej zmienności wyników ważenia lepiej wyeksponować trend związany ze zmianą parametrów systemu WIM, dane te poddano wygładzaniu. Zastosowano metodę średniej ruchomej wg zależności:

$$y_s(i) = \frac{1}{2 \cdot N_s + 1} \cdot (y(i + N_s) + y(i + N_s - 1) + \dots + y(i - N_s)) \quad (3.1)$$

gdzie $y_s(i)$ jest i -tą wygładzona próbką, a N_s jest liczbą sąsiednich, uśrednianych próbek wektora y .



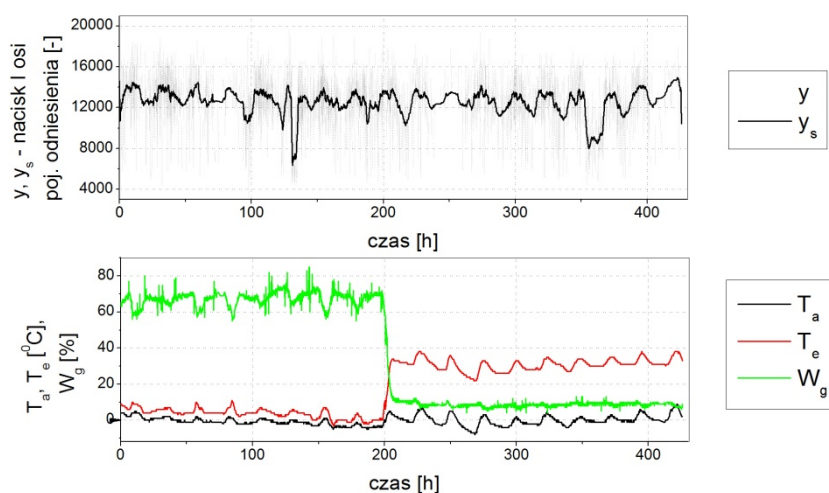
Rys. 3.3. Zmienność nacisku I osi pojazdów odniesienia oraz wielkości środowiskowych

Dla powyższych przebiegów obliczono macierz kowariancji (2.13) jako miarę podobieństwa sygnałów:

Tabela 3.1. Macierz kowariancji

	$nacisk$	T_a	T_e	W_g
$nacisk$	1.00	0.69	0.67	-0.58
T_a		1.00	0.94	-0.79
T_e			1.00	-0.86
W_g				1.00

Wynik ważenia wielkości odniesienia, będący miarą niestacjonarności systemu jest najmocniej skorelowany z temperaturą asfaltu, a najslabiej z wilgotnością powietrza. Ze względu na silną korelację czynników atmosferycznych między sobą, nie da się jednak rozstrzygnąć, która wielkość ma decydujący wpływ na właściwości systemu. Aby odpowiedzieć na to pytanie, wykonano drugi eksperyment, w którym w dwusetnej godzinie pracy systemu aparatura pomiarowa została umieszczona w szczelnej obudowie. Pozwoliło to ograniczyć wpływ zmian wilgotności i temperatury powietrza na układ kondycjonowania sygnałów (rys. 3.4).



Rys. 3.4. Zmienność nacisku i osi pojazdów odniesienia oraz wielkości środowiskowych

Pomimo wyraźnej zmiany warunków w dwusetnej godzinie pracy systemu, nie nastąpiła obserwowalna zmiana w wynikach ważenia. Wyklucza to wpływ zmian temperatury aparatury pomiarowej oraz wilgotności powietrza na pracę systemu.

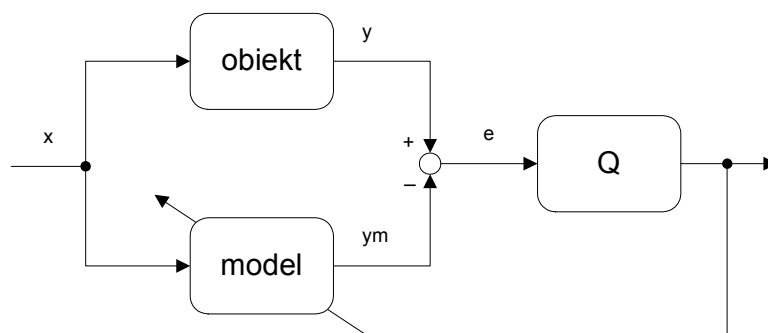
Na tej podstawie zasadne wydaje się przyjęcie tezy, iż to zmiany temperatury asfaltu są główną przyczyną niestacjonarności systemów WIM wyposażonych w polimerowe czujniki nacisku, a w konsekwencji przyczyną dużej niepewności uzyskiwanych wyników ważenia w systemach tego typu.

Aby w sposób ilościowy opisać to zjawisko należy dokonać identyfikacji systemu WIM. Wyznaczony w ten sposób model systemu poza walorem poznawczym będzie służył jako podstawa badań symulacyjnych metod autokalibracji oraz korekcji temperaturowej. W kolejnym punkcie opisano metodę identyfikacji systemu WIM.

3.2. Model matematyczny i symulacyjny procesu identyfikacji niestacjonarności systemu WIM

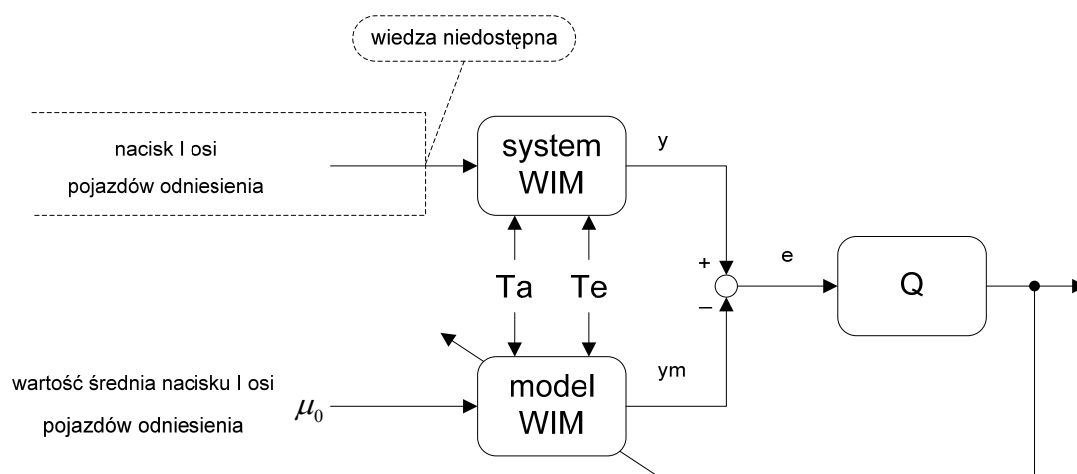
Pod pojęciem identyfikacji obiektu rozumie się ogół czynności opartych na eksperymencie pomiarowym prowadzących do wyznaczenia modelu parametrycznego lub nieparametrycznego opisującego identyfikowany obiekt. U podstaw tego procesu leży wiedza wstępna (a priori) na temat obiektu, jak również wiedza pomiarowa zdobyta podczas eksperymentów (a posteriori). Wyznaczenie modelu parametrycznego (a z taką sytuacją mamy do czynienia w przypadku modelu systemu WIM) polega na przyjęciu klasy modelu oraz obliczeniu liczbowych wartości jego współczynników. Przyjęcie klasy modelu sprowadza się do określenia wyrażenia matematycznego opisującego badany obiekt z dokładnością do współczynników. Wyznaczenie ich wartości realizowane jest przez algorytm identyfikacji, a podstawą takiego działania jest pomiar zmiennych obiektu, tj. pobudzających go wymuszeń oraz odpowiedzi na te wymuszenia. W przypadku budowy modeli całych systemów pomiarowych identyfikacja polega na wyznaczeniu modeli poszczególnych elementów systemu oraz odwzorowaniu połączeń między nimi. Ze względu na konieczne uproszczenia struktura wewnętrzna modelu może być inna niż struktura systemu. Ważne jest aby „zewnętrznie” model oraz system charakteryzowała ta sama funkcjonalność. Tak wyznaczone modele służą do celów analizy, syntezy i optymalizacji właściwości metrologicznych systemów pomiarowych (Gajda i Szyper 1998).

Wyznaczenie modelu niestacjonarności systemu WIM umożliwi realizację dwóch celów: po pierwsze znajomość struktury takiego modelu pozwoli jednoznacznie określić przyczynę niestacjonarności systemu oraz umożliwi lepsze zrozumienie tego zjawiska. Po drugie bazując na wyznaczonym modelu możliwe będzie przeprowadzenie badań symulacyjnych mających na celu określenie właściwości proponowanych algorytmów autokalibracji i korekcji temperaturowej wyników ważenia. Dotychczas nie opracowano jednak metody pozwalającej na identyfikację niestacjonarności systemu WIM, co więcej nie istnieją żadne przesłanki co do wyboru klasy takiego modelu. Autor proponuje więc nową metodę pozwalającą rozwiązać powyższy problem. Jej podstawą jest algorytm strojonego modelu. Zasada działania algorytmu jest znana, współczynniki modelu są dobierane w procesie strojenia w taki sposób aby wartość kryterium dopasowania Q pomiędzy odpowiedzią obiektu i modelu pobudzonych tym samym wymuszeniem osiągnęła wartość minimalną (Nelles 2001). Wyznaczone współczynniki modelu zapewniające spełnienie tego warunku, przyjmuje się za estymaty współczynników obiektu.



Rys. 3.5. Schemat identyfikacji metodą strojonego modelu

Adaptacja algorytmu na potrzeby identyfikacji parametrów modelu systemu WIM pokazana jest na kolejnym rysunku:



Rys. 3.6. Schemat identyfikacji systemu WIM

Jako kryterium jakości dopasowania modelu i obiektu przyjęto funkcjonal (3.2).

$$Q = \sum_{i=1}^N [y(i) - y_m(i)]^2 \quad (3.2)$$

gdzie:

- $y(i)$ – i -ty wynik ważenia z identyfikowanego systemu WIM,
- $y_m(i)$ – i -ty wyliczony wynik ważenia z modelu wyznaczanego,
- N – liczba wyników ważenia.

Podstawą takiego procesu identyfikacji jest długoterminowa rejestracja wyników ważenia pierwszej osi pojazdów odniesienia, temperatury asfaltu oraz temperatury układu kondycjonowania sygnałów. Długoterminowość należy rozumieć jako wystarczająco długi okres czasu, w którym w zarejestrowanych wynikach ważenia uwidacznia się trend związany z niestacjonarnością systemu (porównaj rysunek 3.3). Oryginalność metody polega na wykorzystaniu jako wymuszenia wartości oczekiwanej nacisku I osi pojazdów odniesienia μ_0 oraz sygnałów, które normalnie uznano by za zakłócające tj.: temperatury asfaltu oraz temperatury części analogowej. Dzięki temu wyznaczany model posiada stałe współczynniki, choć sam obiekt identyfikacji jest niestacjonarny. Do poszukiwania minimum funkcjonu (3.2) użyto funkcji *fminsearch* z pakietu MATLAB. Procedura ta wykorzystuje metodę simpleksów do znalezienia minimum funkcji wielu zmiennych bez ograniczeń. W celu poprawienia efektywności obliczeń, fazę strojenia modelu poprzedzono symulacją Monte Carlo.

Przedstawiona metoda identyfikacji niestacjonarności systemu WIM nie była wcześniej wykorzystywana. W takiej sytuacji należy najpierw na drodze badań symulacyjnych ocenić jej zdolność do poprawnego wyznaczenia modelu systemu WIM, przez co należy rozumieć jakościową i ilościową ocenę wpływu parametrów procesu identyfikacji na błędy wyznaczenia modelu. Jeżeli otrzymana w wyniku symulacji dokładność identyfikacji jest zadowalająca, algorytm można zastosować w praktyce. Podstawą badań symulacyjnych proponowanej metody identyfikacji jest model odniesienia reprezentujący obiekt identyfikacji – system WIM ze szczególnym uwzględnieniem jego niestacjonarności. Niestacjonarność osiągnięto poprzez uzależnienie wartości współczynnika kalibracji od atmosferycznych czynników wpływowych. Model odniesienia jest pobudzany symulowanym wymuszeniem, a jego odpowiedź stanowi symulowany wynik pomiaru, będący podstawą identyfikacji. Celem symulowanego eksperymentu jest wyznaczenie liczbowych wartości współczynników modelu wyznaczanego, które są interpretowane jako oceny współczynników przyjętego modelu odniesienia. Porównanie obliczonych współczynników modelu wyznaczanego z założonymi na wstępie wartościami współczynników modelu odniesienia jest miarą dokładności, która w probabilistycznym przypadku identyfikacji przyjmuje formę błędów: obciążenia, średniokwadratowego i wariancji (Gajda 2000). W kolejnych podpunktach opisano modele odniesienia i wyznaczany oraz badania symulacyjne umożliwiające weryfikację przyjętej metody identyfikacji.

3.2.1 Model odniesienia

Podczas budowy modelu należy dokonać wyboru jedynie tych cech i właściwości, które mają decydujący wpływ na zachowanie modelowanego systemu. Zalecenia mówią (Gajda i Szyper 1998), iż w modelu nie powinno się uwzględniać szczegółów, które nie są potrzebne z punktu widzenia celu badań. Mając na uwadze właściwości systemów ważących, które są wyposażone w polimerowe czujniki nacisku w modelu odniesienia uwzględniono niestacjonarność systemu WIM (3.3).

$$y^j(i) = p^j(i) \cdot C^j(T_a^m, T_e^m) \quad (3.3)$$

gdzie:

- $y^j(i)$ – symulowany wynik ważenia i -tego pojazdu, przez j -ty czujnik systemu,
- $p^j(i)$ – model wymuszenia – np. nacisk I osi i -tego pojazdu odniesienia,
- $C^j(T_a^m, T_e^m)$ – model współczynnika kalibracji j -tego czujnika nacisku,
- T_a^m – model zmian temperatury asfaltu w funkcji czasu,
- T_e^m – model zmian temperatury aparatury pomiarowej – „elektroniki” w funkcji czasu.

Model współczynnika kalibracji j -tego czujnika $C^j(T_a^m, T_e^m)$, uwzględnia wpływ czynników atmosferycznych na wynik pomiaru, symulując niestacjonarność systemu WIM. Bez istotnej szkody dla dokładności modelu, można przyjąć jeden współczynnik kalibracji dla systemów wyposażonych w dwa czujniki nacisku. Dodatkowo przyjęto addytywny charakter oddziaływania T_a^m i T_e^m na wynik ważenia, w związku z tym:

$$C^j(T_a^m, T_e^m) = C(T_a^m, T_e^m) = C_1(T_a^m) + C_2(T_e^m) \quad (3.4)$$

Na podstawie analizy wykonanej w punkcie 3.1 oraz przesłanek teoretycznych przyjęto następującą postać C_1, C_2 :

$$C_1(T_a^m) = k \cdot 10^{w \cdot T_a^m} \quad (3.5a)$$

$$C_2(T_e^m) = d \cdot T_e^m \quad (3.5b)$$

gdzie:

- k, d , – współczynniki wzmocnienia,
- w – współczynnik nachylenia krzywej.

Postać C_2 przyjęto w sposób arbitralny, sugerując się jedynie wynikiem analizy korelacyjnej. Natomiast model C_1 to znana w literaturze (Lukanen, Stubstad i Briggs 2000), (Turner - Fairbank Highway Research Center 2002) zależność określająca wpływ temperatury nawierzchni asfaltowej na jej sztywność (konsystencję), a pośrednio na wynik ważenia. Współczynniki k i w są zależne od rodzaju oraz składu asfaltu.

Uwzględniając zależności (3.4) i (3.5), oraz zakładając że $T_a^m(i)$, $T_e^m(i)$ to wartości zmiennych środowiskowych w chwili ważenia i -tego pojazdu, równanie (3.3) można zapisać w następującej postaci:

$$y^j(i) = p^j(i) \cdot C(T_a^m, T_e^m) = p^j(i) \cdot (k \cdot 10^{w_{T_a^m(i)}} + d \cdot T_e^m(i)) \quad (3.6)$$

Powyższa zależność jest modelem odniesienia, i opisuje współpracę j -tego czujnika nacisku z nawierzchnią asfaltową, w której jest zamontowany.

3.2.2 Model nacisku osi pojazdów odniesienia

Modelowanie wymuszenia, czyli chwilowej wartości nacisku osi na czujnik wygodnie jest rozpocząć od ponownego przytoczenia równania (2.2):

$$p(t) = P_0 + P(t) \quad (3.7)$$

gdzie:

- $p(t)$ – chwilowa wartość nacisku osi na podłoże,
- P_0 – składowa stała – nacisk statyczny osi,
- $P(t)$ – składowa zmienna – nacisk dynamiczny osi.

Uwzględniając ogólnie przyjętą postać składowej dynamicznej nacisku osi, równanie można zapisać w postaci (Cebon, Handbook of Vehicle-Road Interaction 1999)

$$p(t) = P_0 + \sum_{k=1}^M P_k \cdot \sin(2\pi f_k t + \varphi_k) \quad (3.8)$$

gdzie:

- M – liczba składowych dynamicznych sygnału nacisku osi,
- P_k, f_k, φ_k – parametry k -tej składowej dynamicznej sygnału nacisku, odpowiednio: amplituda, częstotliwość i faza początkowa.

Zakładając, że w chwili ważenia pojazd porusza się ze stałą prędkością V , a czujniki nacisku rozmieszczone są równomiernie we wzajemnych odległościach Δ to chwilowy nacisk osi na j -ty czujnik licząc od kierunku najazdu, zgodnie z zależnością (3.9) wynosi:

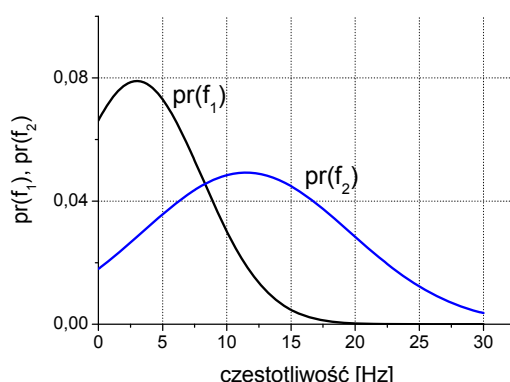
$$p^j = P_0 + \sum_{k=1}^M P_k \cdot \sin\left(j \cdot 2\pi f_k \frac{\Delta}{V} + \varphi_k\right) \quad \text{gdzie } j = 1, 2, 3 \dots \quad (3.9)$$

W zależności od żądanej dokładności modelu oraz rodzaju zawieszenia pojazdu przyjmuje się różną liczbę składowych dynamicznych nacisku (zwykle $M=1$ lub $M=2$). Częstotliwości f_1 i f_2 opisują wtedy drgania tzw. masy zawieszonyj (kabina pojazdu) i nie zawieszonyj (koło pojazdu). Ich wartości zawierają się w granicach $f_1 = 1.5 \div 4.5 \text{ Hz}$ oraz $f_2 = 8 \div 15 \text{ Hz}$ zależnie od rodzaju pojazdu i rodzaju zawieszenia oraz masy całkowitej i prędkości. Ponieważ nie istnieją związki empiryczne opisujące zmienność tych częstotliwości przyjęto, iż mają one rozkład normalny o parametrach statystycznych (3.10), gdzie $N(\mu, \sigma)$ oznacza rozkład normalny o wartości oczekiwanej μ i odchyleniu standardowym σ :

$$f_1: N(3.5, 5) \quad (3.10a)$$

$$f_2: N(11.5, 8) \quad (3.10b)$$

Funkcje gęstości prawdopodobieństwa $pr(f_1)$ i $pr(f_2)$, pokazano na rysunku:

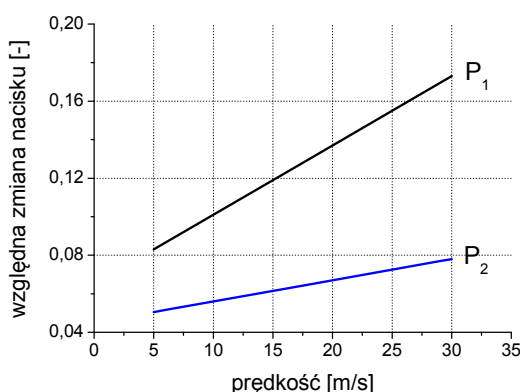


Rys. 3.7. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa częstotliwości f_1 i f_2

Podobnie jak wartości częstotliwości, amplitudy drgań poszczególnych składowych dynamicznych P_1 i P_2 zależą od wielu czynników, lecz dla danego profilu jezdni decydujące znaczenie ma prędkość pojazdu. Niemal wszystkie badania wskazują na wzrost tych amplitud wraz ze wzrostem prędkości V , przy czym parametrem tego wzrostu jest jakość nawierzchni (Cebon, Handbook of Vehicle-Road Interaction 1999). Dowiedziono, że dla dróg o dobrej jakości, a na takich montuje się systemy WIM, dominuje składowa dynamiczna o mniejszej częstotliwości.

Na tej podstawie przyjęto następującą zmienność amplitud składowych dynamicznych:

$$\begin{aligned} P_1 &= a_1 \cdot V + b_1 \\ P_2 &= a_2 \cdot V + b_2 \end{aligned} \quad \text{gdzie:} \quad \begin{aligned} a_1 &= 0.0036; & b_1 &= 0.065 \\ a_2 &= 0.0011; & b_2 &= 0.045 \end{aligned} \quad (3.11)$$



Rys. 3.8. Model zmienności amplitud P_1 i P_2

Wartości współczynników a_1 , a_2 , b_1 , b_2 zostały dobrane w taki sposób aby zmienność amplitud składowych dynamicznych w funkcji prędkości odpowiadała najczęściej spotykanemu w literaturze przypadkowi tej zmienności dla dróg o dobrej jakości (Cebon, Handbook of Vehicle-Road Interaction 1999).

Model rozkładu prędkości pojazdów odniesienia wyznaczono na podstawie rejestracji tej wielkości przez system ważący w Gardawicach. W tym celu użyto funkcji *dfittool* z pakietu MATLAB, która umożliwia wybór i dopasowanie funkcji gęstości prawdopodobieństwa do danych pomiarowych. Jako wynik dopasowania (estymator największej wiarygodności) zwracany jest zbiór ocen parametrów statystycznych opisujących dany rozkład. Oprócz tych ocen, funkcja zwraca przedziały ufności, w których z założonym prawdopodobieństwem (poziomem ufności) znajdują się rzeczywiste wartości parametrów danego rozkładu. W prowadzonych badaniach poziom ufności przyjęto równy 0.95.

Dla prędkości pojazdów odniesienia, najlepszą aproksymację uzyskano dla rozkładu typu *extreme value*:

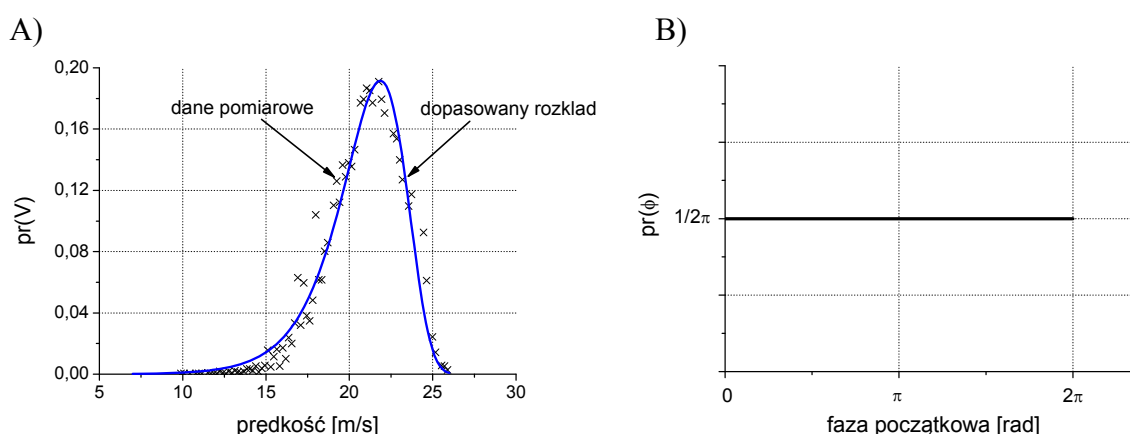
$$pr(V) = \sigma^{-1} \cdot e^{\left(\frac{V-v}{\xi}\right)} \cdot e^{\left(-e^{\frac{V-v}{\xi}}\right)} \quad (3.12)$$

a oszacowane wartości parametrów statystycznych wyniosły:

$$\begin{aligned} v &= 21.856 \pm 0.018 \\ \xi &= 1.920 \pm 0.013 \end{aligned} \quad (3.12a)$$

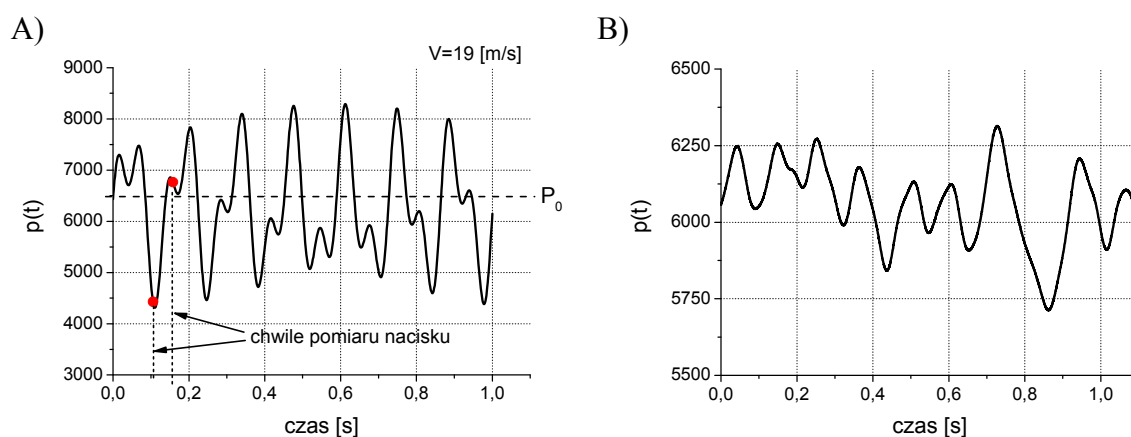
Faza początkowa występująca w zależnościach (3.8) i (3.9) jest wybierana w sposób losowy i ma rozkład równomierny opisany równaniem:

$$pr(\varphi) = \begin{cases} \frac{1}{2 \cdot \pi} & \text{dla } 0 < \varphi < 2\pi \\ 0 & \text{dla } 0 > \varphi > 2\pi \end{cases} \quad (3.13)$$



Rys. 3.9. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa **A)** prędkości V , **B)** fazy początkowej

Przykładową zmienność nacisku osi wygenerowaną na podstawie modelu (3.8) przedstawiono na kolejnym rysunku. Czerwonymi kropkami zaznaczono chwile „pomiaru” tego sygnału przez czujniki nacisku obliczone z zależności (3.9).



Rys. 3.10 Zmienność nacisku osi dla wybranego pojazdu odniesienia
(**A** - model, **B** - rejestracja z pojazdu oprzyrządowanego)

Amplituda składowej dynamicznej nacisku $P(t)$ zależy od przyjętych wartości współczynników modelu P_1 , P_2 , oraz prędkości pojazdu. Ponieważ prędkość jest zmienną losową o rozkładzie (3.12) to amplituda $P(t)$ również zmienia się w sposób losowy z pojazdu na pojazd. Z tego powodu w badaniach symulacyjnych do oceny rozrzutu amplitudy składowej dynamicznej $P(t)$ wokół wartości składowej stałej P_0 należy użyć miary statystycznej, na przykład odchylenia standardowego (2.7) zdefiniowanego w rozdziale drugim. Ponieważ estymator ten również jest zmienną losową, to ocenę odchylenia standardowego należy wyznaczyć wielokrotnie, (obliczyć dla K realizacji $P(t)$), a za końcowy wynik przyjąć wartość średnią.

$$\sigma_p = \frac{1}{K} \cdot \sum_{i=1}^K s_{pi} \quad (3.14)$$

gdzie:

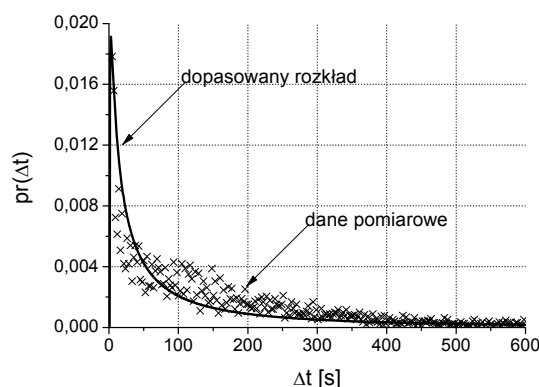
s_{pi} – jest oceną odchylenia standardowego (2.7), wyznaczonego dla i -tej realizacji symulowanej składowej dynamicznej nacisku osi $P(t)$.

Pełny model wymuszenia wymaga jeszcze opisu częstotliwości z jaką symulowane pojazdy odniesienia przejeżdżają przez symulowane stanowisko ważące. W tym celu zbadano odstępy czasowe pomiędzy przejazdami kolejnych pojazdów odniesienia Δt przez system WIM w Gardawicach. Stwierdzono, że rozkład tych odstępów jest mocno niesymetryczny, a maksimum osiąga dla czasu 3 sekund. Po próbie dopasowania kilku typów rozkładów gęstości prawdopodobieństwa do danych pomiarowych za pomocą funkcji *dffitool* stwierdzono, że najlepszą aproksymację uzyskuje się dla rozkładu logarytmicznego:

$$pr(\Delta t) = \frac{1}{\Delta t \cdot \sigma_L \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(\ln(\Delta t) - \mu_L)^2}{2\sigma_L^2}} \quad (3.15)$$

o parametrach:

$$\mu_L = 4.20, \quad \sigma_L = 1.89 \quad (3.15a)$$



Rys. 3.11 Rozkład gęstości prawdopodobieństwa odległości czasowych pomiędzy pojazdami odniesienia

3.2.3 Model zmienności czynników atmosferycznych

Modele zmienności czynników atmosferycznych wyznaczono na podstawie analizy danych pomiarowych z losowo wybranego okresu 400 godzin rejestracji wyników ważenia w Gardawicach. Przyjęto sinusoidalną zmienność wahań dobowych tych wielkości z trendem długoterminowym wynikającym ze zmiany wartości średniej wskutek zmian pór roku. Za model trendu przyjęto funkcję kwadratową, w postaci kanonicznej. Dla wielkości T_x otrzymujemy:

$$T_x = A_x \cdot \sin(2\pi \cdot f_x \cdot t + \varphi_x) + a_x(t - p_x)^2 + q_x \quad (3.16)$$

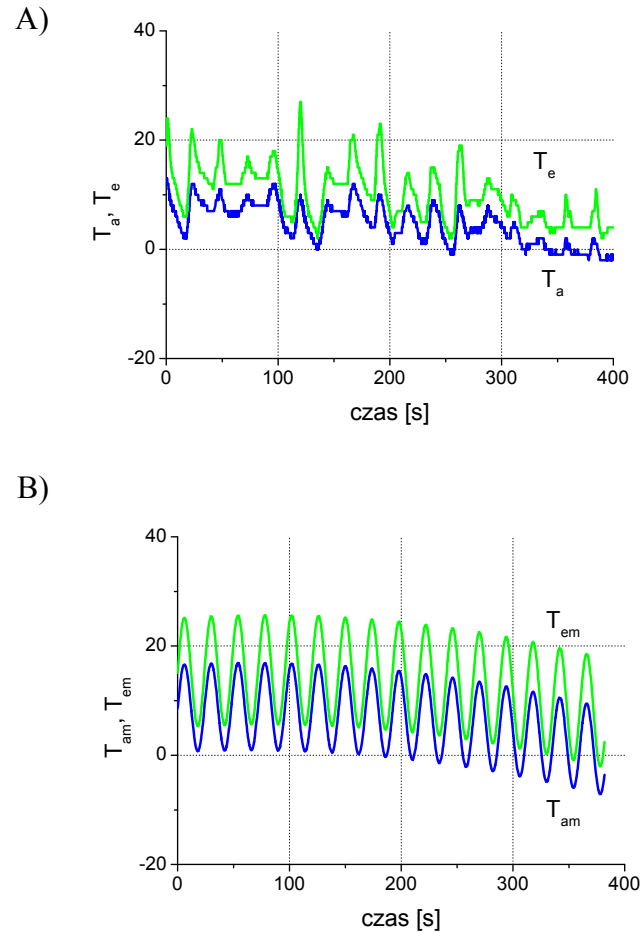
gdzie:

$A_x, f_x, \varphi_x, a_x, p_x, q_x$ – parametry modelu.

Posługując się między innymi analizą korelacyjną obliczono zestaw parametrów dla modeli T_a^m – temperatury asfaltu i T_e^m – temperatury elektroniki:

Tabela 3.2. Parametry modeli zmiennych środowiskowych

	$A_x[^\circ C]$	$f_x[Hz]$	$\varphi_x[rad]$	$a_x[^\circ C/s^2]$	$p_x[s]$	$q_x[^\circ C]$
T_a^m	8	$1.15 \cdot 10^{-5}$	0	$-8.18 \cdot 10^{-5}$	64.59	8.90
T_e^m	10	$1.15 \cdot 10^{-5}$	0	$-8.70 \cdot 10^{-5}$	80.30	15.65



Rys. 3.12 A) zmienność zarejestrowanych wielkości środowiskowych B) oraz ich modele

3.2.4 Model algorytmu estymacji nacisku statycznego

W sytuacji gdy w systemie zastosowano tylko dwa czujniki nacisku, algorytm estymacji nacisku statycznego sprowadza się obliczenia średniej ze zmierzonych wartości:

$$y(i) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 y^j(i) \quad (3.17)$$

Przy większej liczbie czujników, można użyć alternatywnych estymatorów np.: największej wiarygodności lub sieci neuronowych (Burnos, Gajda, i inni, Accurate Weighing of moving Vehicles 2007), (Botwinowski, Piotrowski i Sroka 2006).

3.2.5 Model wyznaczany

Opisany w punkcie 3.2.1 model odniesienia w badaniach symulacyjnych reprezentuje obiekt identyfikacji. Ustalone dla potrzeb symulacji wartości współczynników tego modelu są interpretowane jako rzeczywiste wartości współczynników obiektu. Celem symulowanego procesu identyfikacji jest wyznaczenie struktury oraz liczbowych wartości współczynników modelu wyznaczanego, które należy rozumieć jako oceny współczynników przyjętego modelu odniesienia. Model wyznaczany pobudzany jest wartością oczekiwaną nacisku pierwszej osi pojazdów odniesienia μ_0 , gdyż informacja o chwilowej wartości nacisku osi na czujnik nie jest znana dla eksperymentatora (porównaj rysunek 3.6). Ponieważ model nigdy nie odzwierciedla pełnej struktury obiektu identyfikacji w modelu wyznaczanym uwzględniono jedynie wpływ temperatury asfaltu na wynik ważenia, świadomie pomijając model wpływu temperatury aparatury pomiarowej. W modelu wyznaczanym, należy jednak wziąć pod uwagę czynniki zakłócające pomiar, stąd w równaniu (3.18) uwzględniono wpływ nierównomierności czułości wzdłuż czujników nacisku $(\sigma_z \cdot z)$ oraz stałą wartość błędu obciążenia ρ wynikającą z przestrzennej powtarzalności nacisku osi:

$$\begin{aligned} y_m(i) &= \mu_0 \cdot C_m(T_a^m) + \mu_0 \cdot \sigma_z \cdot z(i) + \rho = \\ &= \mu_0 \cdot (k \cdot 10^{w \cdot T_a^m(i)}) + \mu_0 \cdot \sigma_z \cdot z(i) + \rho \end{aligned} \quad (3.18)$$

gdzie:

$y_m(i)$ – symulowany wynik ważenia i -tego pojazdu,

$C_m(T_a^m)$ – model wyznaczany współczynnika kalibracji,

σ_z – parametr określający względną (odniesioną do μ_0) zmienność czułości wzdłuż czujnika nacisku,

$z(i)$ – składowa losowa o rozkładzie równomiernym z przedziału $[-0.5 \div 0.5]$,

ρ – stała wartość – błąd obciążenia.

3.3 Identyfikacja parametryczna systemu WIM z czujnikami polimerowymi

Prowadzone badania można podzielić na dwa etapy:

- etap symulacyjny (obejmujący weryfikację modelu odniesienia oraz ocenę dokładności metody identyfikacji),
- etap „pomiarowy” (zastosowanie metody identyfikacji w praktyce i wyznaczenie modelu niestacjonarności systemu WIM w Gardawicach).

Właściwości nowej metody identyfikacji powinny zostać zbadane przed jej pierwszym zastosowaniem w praktyce. Dlatego pierwszy etap, symulacyjny, dotyczy oceny dokładności zaproponowanej metody identyfikacji niestacjonarności systemu WIM. Elementem odgrywającym tu kluczową rolę jest model odniesienia reprezentujący rzeczywisty obiekt identyfikacji. Dokładne odwzorowanie obiektu w modelu odniesienia warunkuje wiarygodność uzyskanych na tym etapie wyników. Z tego powodu przed przystąpieniem do symulacji należy dokonać weryfikacji „wiarygodności” modelu odniesienia poprzez porównanie jego odpowiedzi z zarejestrowaną odpowiedzią rzeczywistego obiektu. Jeżeli uzyskana zgodność w opinii eksperymentatora jest wystarczająca, można przejść do właściwych symulacji, których celem jest ocena dokładności metody identyfikacji. Dokładność identyfikacji powinna być lepsza niż dokładność wyników pomiarowych uzyskiwanych z modelowanego urządzenia. Istotnie, budowanie niedokładnych modeli, dokładnych systemów pomiarowych nie znajduje uzasadnienia. Jeżeli warunek, o którym mowa jest spełniony, można przejść do drugiego etapu badań modelowych polegających na zastosowaniu zaproponowanej metody identyfikacji w praktyce i wyznaczeniu modelu rzeczywistego systemu WIM.

3.3.1 Weryfikacja modelu odniesienia

Przed przystąpieniem do badań symulacyjnych prowadzonych z wykorzystaniem zbudowanego modelu odniesienia, musi on zostać zweryfikowany poprzez porównanie wyników symulacji z wynikami pomiarowymi pochodzącymi z rzeczywistego systemu WIM. W tym celu zasymulowano ważenie pierwszej osi 5000 pojazdów odniesienia, a wynik porównano z taką samą liczbą wyników ważenia pochodzących z rzeczywistego systemu WIM. Za kryterium jakości dopasowania modelu do systemu przyjęto względny błąd skuteczny zdefiniowany na wynikach ważenia I osi pojazdów odniesienia:

$$\delta_y = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{y(i) - y^{WIM}(i)}{y^{WIM}(i)} \right)^2} \quad (3.19)$$

gdzie:

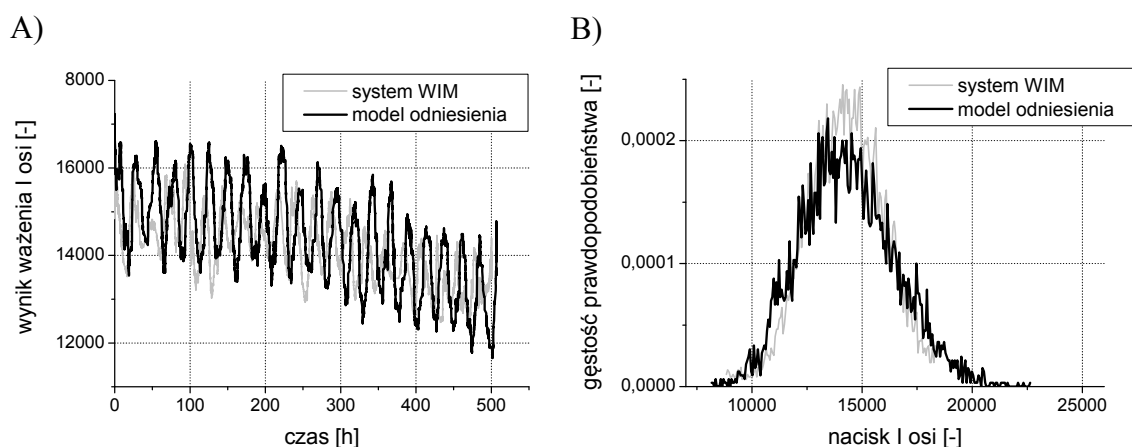
$y(i)$ – symulowany wynik ważenia i -tego pojazdu odniesienia,

$y^{WIM}(i)$ – wynik ważenia i -tego pojazdu odniesienia z systemu WIM,

N – liczba pojazdów odniesienia.

Dla przyjętego modelu odniesienia, różnica pomiędzy symulowanymi wynikami ważenia, a wynikami pochodzącymi z systemu WIM, rozumiana jako błąd (3.19) wyniosła 8%. Uzyskany wynik wskazuje na dobre odwzorowanie właściwości systemu WIM w modelu

odniesienia, tj. zarówno struktura modelu jak również liczbowe wartości jego współczynników zostały dobrane w sposób poprawny. Na rysunku 3.13 pokazano zmienność wyników ważenia I osi pojazdów odniesienia w czasie oraz funkcję gęstości prawdopodobieństwa dla danych otrzymanych w wyniku symulacji oraz z rzeczywistego systemu WIM.



Rys. 3.13. A) Zmienność wyników ważenia w czasie, B) oraz funkcja gęstości prawdopodobieństwa

Potwierdzona zgodność wyniku symulacji z wynikami pochodzącymi z systemu ważącego uzasadnia wykorzystanie modelu odniesienia w dalszych badaniach symulacyjnych.

3.3.2 Badanie wpływu parametrów algorytmu na błędy identyfikacji współczynników modelu wyznaczanego

Symulowany eksperyment identyfikacji obejmuje kilka modeli elementów systemu pomiarowego. Zmiana właściwości jednego z nich, rzutuje na zachowanie całego modelu systemu i może mieć wpływ na symulowane wyniki pomiarowe, a w konsekwencji na wynik estymacji współczynników modelu wyznaczanego k i w . Wpływ zmiany parametrów wymuszenia, modelu odniesienia czy algorytmu identyfikacji na błędy estymacji powinien być poddany dokładnej analizie. W zaproponowanej metodzie identyfikacji eksperymentator nie ma jednak kontroli nad zmianą niektórych parametrów. Przykładem jest wymuszenie, o stałej wartości oczekiwanej równej $\mu_0 = 61670$ kN, w związku z tym badanie wrażliwości metody na zmianę tego parametru nie ma uzasadnienia. W przeprowadzonych symulacjach uwzględniono wpływ dwóch innych parametrów związanych z algorytmem identyfikacji: N_s – liczby próbek branej do uśredniania (wygładzania) wyników ważenia, oraz T_c – całkowitego czasu rejestracji wyników ważenia. Uzmieniając wybrany parametr można wyznaczyć zbiór charakterystyk, ilustrujących zmienność błędów identyfikacji i na tej podstawie wybrać taką wartość parametru, która zapewni minimalne wartości tych błędów. Ponieważ losowa zmienność wyników pomiaru, determinuje losowy charakter procesu identyfikacji, to do

oceny błędów należy użyć miar statystycznych. W tym celu powszechne zastosowanie znajdują trzy miary błędów estymacji: względny błąd obciążenia, względne odchylenie standardowe, oraz względny błąd średniokwadratowy.

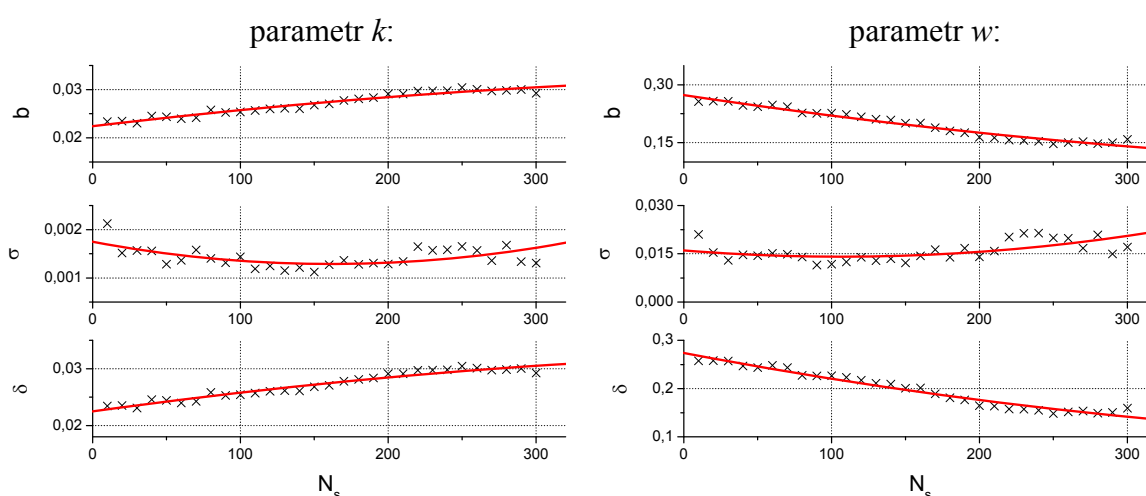
Jeżeli przez Φ rozumiemy estymator nieznanego parametru, a przez φ wartość tego parametru to błędy można zdefiniować w następujący sposób (Gajda i Twardowski 2002):

$$b = \frac{E[\Phi] - \varphi}{\varphi} \quad - \text{względny błąd obciążenia,} \quad (3.20a)$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{E[(E[\Phi] - \varphi)^2]}}{\varphi} \quad - \text{względne odchylenie standardowe,} \quad (3.20b)$$

$$\delta = \sqrt{b^2 + \sigma^2} \quad - \text{względny błąd średniokwadratowy.} \quad (3.20c)$$

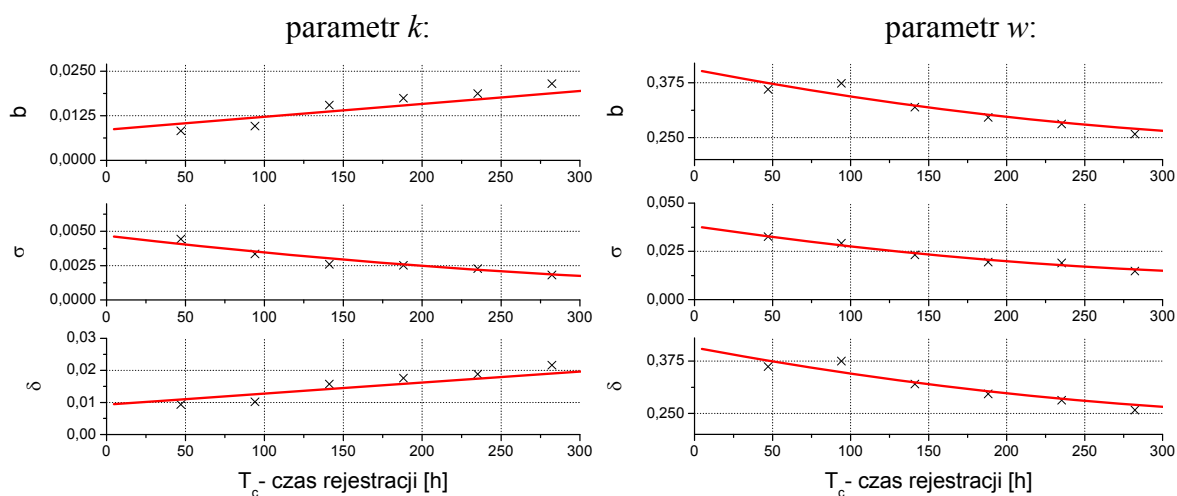
Błędy (3.20 a-c) w funkcji N_s , dla obydwu wyznaczanych współczynników k i w modelu pokazano poniżej. Czas rejestracji wyników ważenia $T_C = 400h$.



Rys. 3.14. Wpływ N_s na błędy wyznaczenia współczynników modelu

Oceny obu parametrów są obciążone, przy czym parametr k jest identyfikowalny znacznie dokładniej niż parametr w – mniej więcej 10-krotnie. Zwiększanie liczby uśrednień przynosi pogorszenie dokładności estymacji współczynnika k , natomiast w przypadku współczynnika w , wraz ze wzrostem N_s błędy maleją o około 15 %. Przeciwnastawne trendy błędów identyfikacji współczynników k i w wymuszają potrzebę kompromisu w doborze wartości N_s . Wartość $N_s = 150$ wydaje się rozsądna ze względu na akceptowalne wartości błędów identyfikacji obydwu współczynników.

Wpływ czasu rejestracji wyników ważenia na błędy estymacji umieszczono na rys 3.15. Liczbę uśrednień przyjęto na $N_s = 150$.



Rys. 3.15. Wpływ T_c na błędy wyznaczenia parametrów modelu.

Przy zwiększaniu czasu obserwacji T_c mamy do czynienia z podobną sytuacją jak przy zmianie liczby uśrednień, z tą różnicą, że dla obydwu współczynników wariancje obliczanych estymat maleją wraz ze wzrostem T_c . Ponieważ błąd średniokwadratowy estymacji współczynnika k w niewielkim stopniu zależy od T_c , a dla współczynnika w , ta zależność jest wyraźna i prowadzi do zmniejszenia błędów, to można przyjąć założenie, że im dłuższy czas rejestracji tym lepiej. Zestawiając ze sobą wnioski płynące z przeprowadzonych symulacji przyjęto następujące wartości parametrów algorytmu identyfikacji:

$$N_s = 150 \quad (3.21a)$$

$$T_c > 200h \quad (3.21b)$$

Dla tak przyjętych wartości parametrów algorytmu powtórzono symulowany eksperyment identyfikacji i obliczono błędy wyznaczenia współczynników k i w oraz skuteczny błąd względny (3.19):

Tabela 3.3. Błędy estymacji parametrów k i w

	k	w
b	0.0268	0.1997
σ	0.0012	0.0142
δ	0.0268	0.2002
δ_y	0.064	

Skuteczny błąd względny, będący miarą dopasowania modelu wyznaczanego do modelu odniesienia, wyniósł 6.4%. Jest to znacznie mniej niż dokładność wyników ważenia uzyskiwanych w systemach z dwoma czujnikami polimerowymi (15 – 20%). Dokładność identyfikacji jest więc lepsza niż dokładność wyników ważenia pochodzących z modelowanego urządzenia, a to warunkuje użyteczność metody w praktyce.

3.3.3 Eksperymentalne wyznaczenie modelu systemu WIM

Wyznaczenie modelu systemu WIM, wymaga rejestracji wyników ważenia pierwszej osi pojazdów odniesienia oraz temperatury asfaltu, przy czym rejestracja tych danych powinna odbywać się w sposób ciągły, w okresie co najmniej kilkunastu dni. W bazie wyników ważenia, którą dysponuje autor, warunkom tym odpowiadały rejestracje z Gardawic z okresu 17.11.06 do 10.01 2007. W tym czasie zarejestrowano wyniki ważenia 350 tyś. pojazdów, w tym niemal 20 tyś. pojazdów odniesienia. Parametry N_s i T_c algorytmu identyfikacji przyjęto zgodnie z wynikami uzyskanymi podczas badań symulacyjnych (3.21a) i (3.21b).

Za klasę modelu, przyjęto zależność (3.18) i wykorzystując opisaną metodę identyfikacji obliczono wartości współczynników modelu:

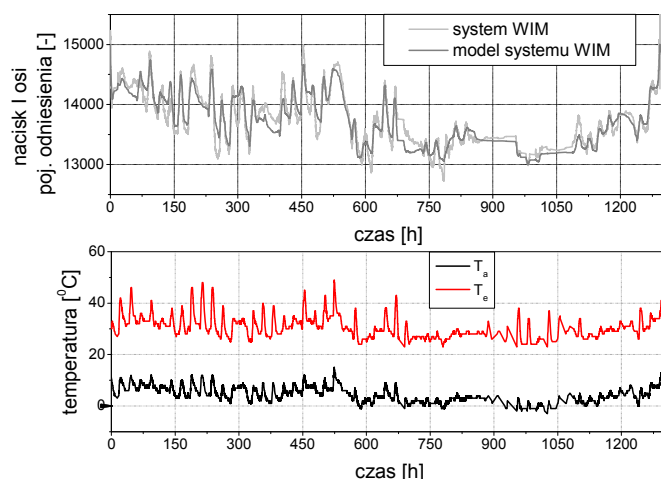
$$k = 2.07 \quad (3.22a)$$

$$w = 0.00504 \quad (3.22b)$$

Wyznaczony w ten sposób model niestacjonarności systemu WIM w Gardawicach ma zatem postać:

$$y_m(i) = \mu_0 \cdot \left(2.07 \cdot 10^{0.00504 \cdot T_a^m(i)} \right) + \mu_0 \cdot \sigma_z \cdot z(i) \quad (3.23)$$

Do oceny dopasowania wyznaczonego modelu do systemu WIM po raz kolejny użyto funkcjonu (3.19). Skuteczny błąd względny, będący miarą różnicy pomiędzy wynikami ważenia z systemu WIM, a wynikami uzyskanymi z wyznaczonego modelu tego systemu wyniósł 1.14%. Współczynnik korelacji zdefiniowany na tych samych wynikach ważenia wyniósł 0.93. Bardzo mała wartość błędu względnego i duża wartość współczynnika korelacji wskazuje na bardzo dobre odwzorowanie właściwości systemu WIM w modelu.



Rys. 3.16. Porównanie wyników z systemu WIM oraz modelu tego systemu

Wykorzystując zbudowany model, można w sposób ilościowy oszacować wpływ zmian temperatury asfaltu na zmianę wyników ważenia, poprzez obliczenie stosunku wartości współczynnika kalibracji dla różnych temperatur asfaltu. Przyjmując, że w ciągu dnia temperatura asfaltu może się zmieniać o 30°C (np. dzień $T_a^1 = 30^{\circ}\text{C}$ - noc $T_a^2 = 0^{\circ}\text{C}$), to zgodnie z przyjętym modelem systemu stosunek wyników ważenia tego samego pojazdu w różnych temperaturach wynosi:

$$k_{Ta} = \frac{\mu_0 \cdot \left(2.07 \cdot 10^{0.00504 T_a^1(i)}\right)}{\mu_0 \cdot \left(2.07 \cdot 10^{0.00504 T_a^2(i)}\right)} = \frac{2.92}{2.07} = 1.41 \quad (3.24)$$

Czterdziestoprocentowa zmiana wyników ważenia w ciągu dnia uniemożliwia wiarygodne wykorzystanie systemów WIM jako wag preselekcyjnych, nie wspominając o ich zastosowaniu administracyjnym. Niestacjonarność systemu, obok pionowych wahań pojazdów, należy więc uznać za jedną z głównych przyczyn ograniczonej dokładności wyników ważenia i zjawisku temu należy zdecydowanie przeciwdziałać. W tym celu w następnym rozdziale przedstawiono metody autokalibracji i korekcji temperaturowej wyników ważenia.

3.4 Podsumowanie

Podsumowując, wyniki badań zamieszczone w bieżącym rozdziale jednoznacznie dowodzą, że systemy WIM wyposażone w polimerowe czujniki nacisku są niestacjonarne. Ich właściwości zmieniają się w skutek zmiany konsystencji asfaltu wywołanej zmianami temperatury otoczenia. Wyznaczony w punkcie 3.3.3 model współpracy czujników nacisku z nawierzchnią asfaltową dla systemu ważącego w Gardawicach przyjął postać zdefiniowaną

zależnością (3.23). Przedstawiona analiza pokazuje jednoznacznie, że klasa modelu i jego współczynniki zostały wyznaczone poprawnie. Struktura modelu niestacjonarności systemu uwzględniająca jedynie oddziaływanie temperatury asfaltu jest wystarczająca. Brak wpływu temperatury aparatury pomiarowej oraz wilgotności powietrza na wynik ważenia został potwierdzony. Mała wartość błędu dopasowania modelu do obiektu (1.14%) umożliwia przyjęcie tezy, że cel modelowania systemu WIM został osiągnięty. Wyznaczony model zostanie wykorzystany jako podstawa dalszych badań symulacyjnych, mających na celu określenie właściwości metod autokalibracji i korekcji temperaturowej. W następnym rozdziale przedstawiono ideę obydwu metod, oraz wyniki badań symulacyjnych.

4. Autokalibracja i korekcja temperaturowa wyników ważenia

W kontekście dyskusji przedstawionej w poprzednim rozdziale dotyczącej stopnia niestacjonarności systemów WIM z polimerowymi czujnikami nacisku należy stwierdzić, że klasyczne metody kalibracji nie mogą zapewnić wystarczającej dokładności wyników ważenia. Duża dynamika zmian parametrów systemu, ogranicza również efektywność kalibracji metodą pojazdów odniesienia. Aby w sposób skuteczny zmniejszyć skutki niestacjonarności systemu, jego kalibracja lub korekcja wyników ważenia powinna odbywać się w sposób ciągły. Konfrontując wymienione ograniczenia występujące przy kalibracji systemów WIM z negatywnymi właściwościami systemów z czujnikami polimerowymi, dochodzimy do wniosku, że istnieje potrzeba poszukiwania nowych, bardziej efektywnych metod kalibracji (korekcji) tych systemów. Tak powstała idea dwóch metod automatycznej kompensacji wpływu niestacjonarności systemu WIM na wyniki ważenia: autokalibracji systemu i korekcji temperaturowej wyników ważenia (Burnos, 2007). Obydwie metody umożliwiają samoczynną kalibrację (korekcję) wyników ważenia, która jest realizowana w sposób ciągły przez sam system w trakcie jego normalnej pracy kilkadziesiąt razy w ciągu doby. W punktach 4.1 oraz 4.2 przedstawiono ideę obydwu metod, a w punkcie 4.3 zamieszczono wyniki badań symulacyjnych. Ich celem było wyznaczenie wrażliwości tych metod na zmiany parametrów systemu ważącego. Wszystkie symulacje wykonano w oparciu o modele przedstawione w rozdziale 3.

4.1 Autokalibracja

Idea metody autokalibracji polega na ciągłej estymacji współczynnika kalibracji C systemu WIM, oraz modyfikowaniu wyników ważenia zgodnie z aktualnie wyznaczoną estymatą (Burnos i Gajda 2005):

$$y_s(i) = \frac{1}{C} \cdot y(i) \quad (4.1)$$

gdzie:

$y_s(i)$ – skalibrowany wynik ważenia i -tego pojazdu tj. masa całkowita pojazdu lub nacisk statyczny wybranej osi,

$y(i)$ – nie kalibrowany wynik ważenia i -tego pojazdu tj. wynik przetwarzania sygnału nacisku z czujników systemu WIM.

Warunkiem koniecznym umożliwiającym autokalibrację systemu WIM jest występowanie w strumieniu pojazdów przejeżdżających przez kalibrowane stanowisko pojazdów odniesienia. Podstawą aktualizacji współczynnika C są wyniki ważenia I-szej osi tych pojazdów (patrz rozdział 2.6.3). Znając wartość wielkości odniesienia ($\mu_0 = 61.670$ kN) oraz

mając na uwadze, że współczynnik kalibracji powinien być wyznaczany w sposób ciągły, do jego obliczenia wykorzystano rekurencyjny algorytm najmniejszych kwadratów z wykładniczym zapominaniem, sprowadzając problem estymacji współczynnika C do minimalizacji kryterium (4.2).

$$Q_n = \sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} \cdot (y(i) - \hat{C} \cdot \mu_0)^2 =$$

$$= \lambda^{n-1} \cdot (y(1) - \hat{C} \cdot \mu_0)^2 + \lambda^{n-2} \cdot (y(2) - \hat{C} \cdot \mu_0)^2 + \dots + (y(n) - \hat{C} \cdot \mu_0)^2 \quad (4.2)$$

gdzie:

- n – numer aktualnie wykonywanego kroku algorytmu rekurencyjnego,
- i – numer kroku algorytmu, w którym został uzyskany wynik pomiarowy,
- λ – współczynnik zapominania, $\lambda \in (0;1)$,
- μ_0 – wartość średnia nacisku I-szej osi pojazdów odniesienia,
- $y(i)$ – i -ty wynik pomiaru wyjścia obiektu czyli nie kalibrowany wynik ważenia I osi pojazdu odniesienia.

Z zależności (4.2) wynika, że wagi kolejnych wyników pomiarowych przyjmują odpowiednio wartości (poczynając od wyniku najstarszego):

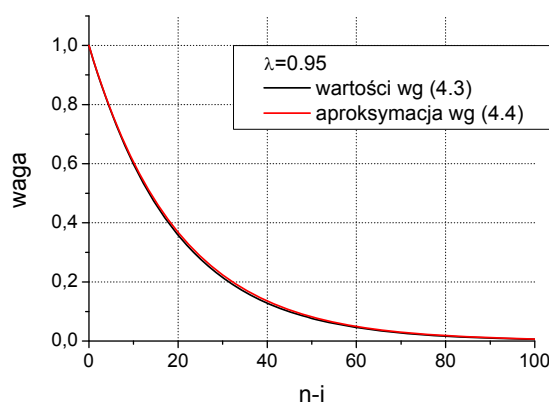
$$\lambda^{n-1}, \lambda^{n-2}, \lambda^{n-3}, \dots, \lambda^{n-i}, \dots, \lambda^3, \lambda^2, \lambda^1, \lambda^0 \quad (4.3)$$

gdzie:

λ^{n-i} – waga i -tego wyniku pomiarowego w n -tym kroku realizacji algorytmu.

Jeżeli przyjęta wartość współczynnika zapominania jest mniejsza od jedności to wagi, a tym samym znaczenie przeszłych wyników pomiarowych maleje wraz ze wzrostem odległości $(n-i)$ pomiędzy aktualnym krokiem algorytmu n , a krokiem w którym zebrano i -tą próbkę wyjścia obiektu. Oznacza to, że największy wpływ na wynik estymacji parametrów obiektu mają „najświeższe” dane pomiarowe. To co się wydarzyło w „przeszłości” jest zapominane proporcjonalnie do szybkości, z jaką maleją wagi przeszłych wyników pomiarowych. Dzięki temu algorytm zyskuje zdolność śledzenia bieżących wartości parametrów niestacjonarnego obiektu. Szybkość zapominania zależy od przyjętej wartości współczynnika λ . Zmianę wag λ^{n-i} dobrze przybliża zależność wykładnicza (4.4), co uzasadnia nazwę tego algorytmu.

$$h = e^{[-(1-\lambda) \cdot (n-i)]} \quad (4.4)$$



Rys. 4.1. Zależność wag przeszłych wyników pomiarowych od odległości ($n-i$)

Zależności (4.5) opisują estymator wynikający z metody z wykładniczym zapominaniem (Gajda i Szyper 1998).

$$\hat{C}_n = \hat{C}_{n-1} + K_n (y(n) - \mu_0 \cdot \hat{C}_{n-1}) \quad (4.5)$$

$$b_n = 1/(\mu_0 \cdot P_{n-1} \cdot \mu_0 + \lambda) \quad (4.5a)$$

$$K_n = P_{n-1} \cdot \mu_0 \cdot b_n \quad (4.5b)$$

$$P_n = (P_{n-1} - K_n \cdot \mu_0 \cdot P_{n-1})/\lambda \quad (4.5c)$$

Przyjrzyjmy się pierwszemu z równań (4.5), które strukturą odzwierciedla schemat estymacji rekurencyjnej:

$$\begin{aligned} \text{bieżąca estymata} &= \text{poprzednia estymata} + \text{korekta} \\ \text{korekta} &= \text{wzmocnienie} \cdot (\text{pomiar} - \text{prognoza pomiaru}) \end{aligned}$$

Akwizycja danych pomiarowych oraz proces identyfikacji odbywają się w tym samym czasie. Kolejny pomiar wyjścia obiektu $y(n)$, wzbogaca wiedzę na jego temat. Bogatsza wiedza pozwala wyznaczyć dokładniejsze oceny parametrów obiektu, w tym przypadku współczynnika kalibracji. Proces estymacji współczynnika C można przedstawić jako cykl powtarzających się na przemian procesów predykcji i korekcji (Nelles 2001), (Mańczak i Nahorski 1983). Bieżąca estymata $\hat{C}_n$, jest wyznaczana poprzez wprowadzenie korekty do estymaty $\hat{C}_{n-1}$ obliczonej w poprzednim kroku obliczeniowym. Korekta ta, jest proporcjonalna do błędu predykcji rozumianego jako różnica pomiędzy bieżącym pomiarem wyjścia obiektu $y(n)$ i przewidywaną przez model wartością wyjścia w poprzednim cyklu $\mu_0 \cdot \hat{C}_{n-1}$. Jeżeli wartość estymaty jest równa rzeczywistej wartości estymowanego parametru, błąd predykcji jest równy zero i zachodzi równość $\hat{C}_n = \hat{C}_{n-1}$. W przeciwnym wypadku wnoszona korekta jest różna od zera i w ten sposób otrzymujemy nową ocenę estymowanego

parametru. Wynik identyfikacji $\hat{C}_n$ staje się podstawą predykcji w następnym cyklu, dla nowego wymuszenia (nacisk I osi pojazdów odniesienia) pobudzającego identyfikowany obiekt.

Posługiwanie się estymatorem (4.5), wymaga określenia warunków początkowych umożliwiających rozpoczęcie obliczeń: wartości $\hat{C}_0$ oraz macierzy P_0 . Istnieją dwa sposoby rozwiązania tego problemu.

Pierwszy polega na podziale procesu identyfikacji na dwie części. Najpierw na podstawie niewielkiej liczby M zgromadzonych danych pomiarowych wyznaczamy początkowe wartości parametrów korzystając z zależności:

$$\hat{C}_0 = (U_M^T U_M)^{-1} U_M^T \bar{y}_M \quad (4.6a)$$

$$\hat{P}_0 = (U_M^T U_M)^{-1} \quad (4.6b)$$

gdzie:

U_M – macierz wejść obiektu (wyniki pomiaru wymuszeń),

$\bar{y}_M$ – wektor wyjść obiektu (wyniki pomiaru odpowiedzi),

M – liczba wstępnie dokonanych pomiarów.

Obliczone w ten sposób wartości $\hat{C}_0$ i $\hat{P}_0$ umożliwiają „start” algorytmu i rozpoczęcie obliczeń, a kolejne iteracje są wykonywane z wykorzystaniem właściwego algorytmu rekurencyjnego (4.5).

Druga metoda polega na arbitralnym przyjęciu warunków początkowych w postaci:

$$\hat{C}_0 = 0 \quad (4.7a)$$

$$P_0 = I \cdot \alpha \quad (4.7b)$$

gdzie:

α – jest dużą liczbą np.: $10^3 - 10^6$,

I – macierzą jednostkową.

Duża wartość niezerowych elementów macierzy P_0 wymusza gwałtowną korekcję przyjętej (zapewne niesłusznie) wartości $\hat{C}_0$, dzięki czemu już w pierwszych krokach obliczeniowych algorytm szybko „dostraja” się do rzeczywistych wartości szukanych parametrów. Zbyt mała wartość α ogranicza zbieżność algorytmu, co może prowadzić do błędnych wyników identyfikacji.

4.1.1 Modyfikacja algorytmu

Parametrem regulującym długość „pamięci” algorytmu jest stały współczynnik zapominania, którego wartość zawiera się w przedziale $0 < \lambda \leq 1$ (Soderstrom i Stoica 1997). Od jego wartości zależą właściwości dynamiczne algorytmu, a tym samym zdolność do śledzenia zmieniających się wartości parametrów obiektu. W przypadku systemów istotnie niestacjonarnych należy przyjąć małą wartość współczynnika λ , gdyż to skraca pamięć algorytmu. Estymaty będą wyznaczane tylko na podstawie ostatnich pomiarów i algorytm będzie posiadał dobrą zdolność śledzenia zmian stanu obiektu. Okupione jest to wzrostem wariancji obliczanych ocen, gdyż duża dynamika oznacza podatność algorytmu na zakłócenia występujące w mierzonych sygnałach. Przyjęcie wartości współczynnika λ bliskiej jedności zmniejszy wprawdzie tę losową zmienność ale spowoduje, że właściwości dynamiczne algorytmu będą bardzo złe wskutek wydłużonej pamięci. Dobór wartości współczynnika zapominania zawsze jest więc kompromisem pomiędzy dobrą dynamiką algorytmu (małe λ), a małą losową zmiennością generowanych ocen (duże λ). Jego wartość dobiera się bazując na wstępnych przesłankach co do szybkości zmian parametrów obiektu, zwykle z przedziału 0.95 – 0.99.

W celu rozwiązania powyższego problemu autor zaproponował modyfikację algorytmu (4.5) polegającą na uzależnieniu wartości współczynnika zapominania λ od odległości czasowej pomiędzy kolejnymi pojazdami odniesienia Δt_n .

Zaproponowana modyfikacja algorytmu bazuje na założeniu, że parametry stanowiska pomiarowego zmieniają się nieznacznie w krótkich przedziałach czasu. W dłuższych okresach zmiana parametrów może natomiast istotnie wpływać na właściwości systemu ważącego. Stąd współczynnik λ powinien przyjmować tym mniejsze wartości im dłuższy jest czas oczekiwania na kolejny pojazd odniesienia. Zależność tę można ogólnie zapisać w postaci (4.8).

$$\lambda_n = \lambda_0 \cdot f(\Delta t_n) \quad (4.8)$$

gdzie:

n – numer aktualnego kroku algorytmu odpowiadający numerowi kolejnego pojazdu odniesienia, który przejechał przez kalibrowane stanowisko,

λ_n – wartość współczynnika zapominania wyznaczona w n -tym kroku,

λ_0 – początkowa wartość współczynnika zapominania,

Δt_n – czas, jaki upłynął od przejazdu poprzedniego pojazdu odniesienia,

$f(\Delta t_n)$ – funkcja wagi.

Funkcja wagi może przyjmować wartości z przedziału $(f_{\min}; 1]$, przy czym $f_{\min} \geq 0$. Współczynnik λ_0 określa maksymalną wartość modyfikowanego w każdym kroku algorytmu współczynnika zapominania λ_n . Tym samym λ_n zawiera się w granicach $(f_{\min} \cdot \lambda_0; \lambda_0]$, co pozwala na elastyczny dobór wartości współczynnika zapominania. Parametry $f_{\min}$ i λ_0 oraz postać funkcji wagi $f(\Delta t_n)$ powinny być dobrane w taki sposób, aby algorytm jak najdokładniej śledził zmienność współczynnika kalibracji. Ponieważ nie da się z góry odpowiedzieć na pytanie jaka postać funkcji wagi gwarantuje najlepsze rezultaty, pod uwagę wzięto dwie funkcje potęgowe oraz funkcję liniową.

$$f_1(\Delta t_n) = q_1 \cdot (\Delta t_n - \Delta t_{\max})^4 + f_{\min} \quad q_1 > 0 \quad (4.9a)$$

$$f_2(\Delta t_n) = q_2 \cdot (\Delta t_n - \Delta t_{\max}) + f_{\min} \quad q_2 < 0 \quad (4.9b)$$

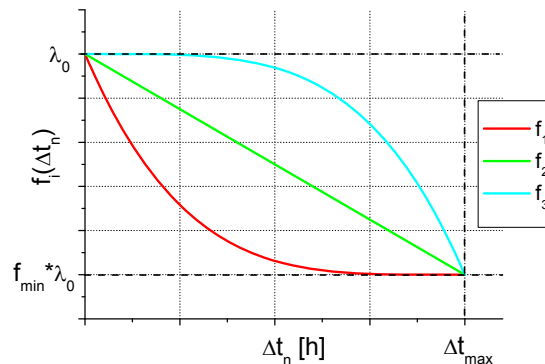
$$f_3(\Delta t_n) = q_3 \cdot (\Delta t_n)^4 + 1 \quad q_3 < 0 \quad (4.9c)$$

gdzie:

$q_{1...3}$ – współczynniki kolejnych funkcji wagi, których wartość zależy od $\Delta t_{\max}$ i $f_{\min}$,

$\Delta t_{\max}$ – czas, dla którego funkcja wagi przyjmuje wartość minimalną $f_{\min}$.

Przykładową zmienność i interpretację funkcji (4.9 a - c) przedstawiono na kolejnym rysunku:

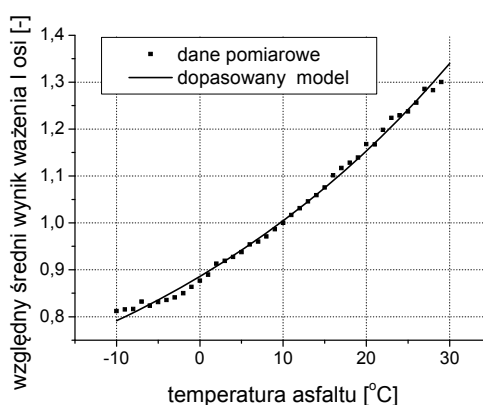


Rys. 4.2. Przykładowy wykres funkcji 4.9 a - c

Postać funkcji wagi oraz wartości parametrów $\Delta t_{\max}$ i $f_{\min}$, określono na podstawie wyników badań symulacyjnych. Problemowi temu poświęcono rozdział 4.3.1.

4.2. Korekcja temperaturowa wyników ważenia

Drugą metodą eliminacji wpływu niestacjonarności systemu WIM na wyniki ważenia jest korekcja temperaturowa. Metoda ta wymaga znajomości modelu charakterystyki temperaturowej stanowiska WIM. Model taki można wyznaczyć posługując się wynikami ważenia I-szej osi pojazdów odniesienia. Na rysunku 4.3 przedstawiono doświadczalnie wyznaczoną charakterystykę temperaturową w zakresie od -10 do 30 °C. Dane rejestrowano w okresie od listopada 2005 do stycznia 2008 roku w Gardawicach. W tym czasie (z małymi przerwami na konserwację systemu) zostało zarejestrowanych ponad trzy miliony pojazdów różnych kategorii, w tym ponad 100 tys. pojazdów odniesienia. Każdy punkt na rysunku 4.3 (dane pomiarowe) to średni wynik ważenia I-szej osi tysięcy pojazdów odniesienia w wybranej temperaturze asfaltu.



Rys. 4.3 Charakterystyka temperaturowa systemu WIM (-15 do 30 °C)

W zakresie temperatur od -10 do 30 °C dane pomiarowe dobrze opisuje model (4.10), którego współczynniki wyznaczono metodą strojonego modelu. Skuteczny błąd względny (3.19), dopasowania modelu do danych pomiarowych wyniósł 1%.

$$C_T(T_a) = k_T \cdot 10^{w_T \cdot (T_a)} + b_T \quad (4.10)$$

gdzie:

T_a – temperatura asfaltu [°C],

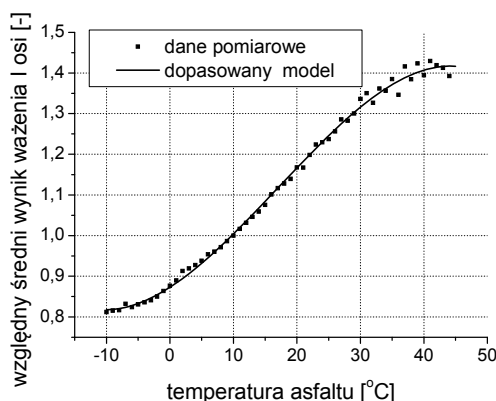
$k_T = 0.4659$ – współczynnik wzmocnienia,

$w_T = 0.0098$ – współczynnik nachylenia krzywej,

$b_T = 0.4199$ – offset.

Model (4.10) ma analogiczną postać jak model zmienności współczynnika kalibracji (3.5a). Zbieżność ta nie jest przypadkowa, gdyż obydwa modele opisują to samo zjawisko. Współczynniki k_T , w_T , b_T są zależne od rodzaju oraz składu asfaltu i dla każdego stanowiska powinny być wyznaczone eksperymentalnie.

Powyżej 30 °C stromość charakterystyki temperaturowej gwałtownie maleje i ze względu na punkt przebiegu model (4.10) nie jest dobrą aproksymacją punktów pomiarowych dla wyższych temperatur.



Rys. 4.4 Charakterystyka temperaturowa systemu WIM (-15 do 45 °C)

W poszerzonym zakresie temperatur od -10 do 45 °C dane pomiarowe dobrze opisuje model w postaci wielomianu (4.11). Skuteczny błąd względny (3.19), dopasowania modelu do danych wyniósł 1%.

$$C_T(T_a) = a \cdot (T_a - q_1)^3 + b \cdot (T_a - q_2)^2 + c \quad (4.11)$$

gdzie:

a, b, c, q_1, q_2 – współczynniki wielomianu (4.11), które wynoszą:

$$a = -7.4514$$

$$b = 3.8005$$

$$c = 0.80612$$

$$q_1 = 0.0000$$

$$q_2 = -13.2507$$

Model (4.10) opisuje wpływ temperatury nawierzchni asfaltowej na jej sztywność (konsystencję), natomiast model (4.11) został wybrany w sposób arbitralny i nie posiada interpretacji fizycznej. Niemniej jednak w szerokim zakresie temperatur tylko model (4.11) dobrze opisuje zależność wyników ważenia od T_a i powinien być stosowany, gdy temperatura asfaltu przekracza 30 °C. Stwierdzenia tego nie należy jednak uogólniać na każde stanowisko ważące z tego względu, że kształt charakterystyki temperaturowej zależy od rodzaju i składu asfaltu.

Istota metody korekcji temperaturowej polega na wykorzystaniu modelu charakterystyki temperaturowej stanowiska WIM do obliczenia wartości współczynnika C_T oraz na modyfikowaniu wyników ważenia zgodnie z zależnością (4.12).

$$y_{ST}(i) = \frac{1}{C_0 \cdot C_T(T_a)} \cdot y(i) \quad (4.12)$$

gdzie:

C_0 – stały współczynnik kalibracji wyznaczony np. metodą pojazdu wstępnie zważonego w temperaturze T_a^0 ,

$y_{ST}(i)$ – skalibrowany i -ty wynik ważenia uwzględniający korektę temperaturową, tj. masa całkowita pojazdu lub nacisk statyczny wybranej osi.

Charakterystyka temperaturowa stanowiska WIM powinna być tak unormowana aby zachodził warunek $C_T(T_a^0) = 1$, przez co korekcja wyników jest „wnoszona” względem temperatury T_a^0 , w której wykonano kalibrację stanowiska. Dzięki ciągłemu pomiarowi temperatury asfaltu, bieżącej korekcie podlegają wszystkie wyniki ważenia co jest niewątpliwą zaletą metody. Należy jednak pamiętać, że korekta niweluje jedynie wpływ zmian temperatury asfaltu na wynik ważenia, a dokładność metody w dużej mierze zależy od jakości wyznaczonej charakterystyki temperaturowej. Na dokładność ostatecznego wyniku będzie mieć również wpływ wstępna kalibracja stanowiska, a więc dokładność wyznaczenia współczynnika C_0 .

Wyznaczenie charakterystyki temperaturowej stanowiska WIM wymaga długotrwałych rejestracji wyników ważenia I-szej osi pojazdów odniesienia dla różnych temperatur asfaltu. Charakterystyki z rysunków 4.3 i 4.4 zostały wyznaczone za okres niemal dwóch lat. W praktyce czas ten można znacznie skrócić, poprzez bieżącą aktualizację modelu temperaturowego w takt pojawiania się nowych rejestracji pojazdów odniesienia.

4.3 Badania symulacyjne

Badania symulacyjne nad zaproponowanymi algorytmami podzielono na dwa etapy. W pierwszej kolejności skupiono się na algorytmie autokalibracji, celem wyznaczenia wpływu wyboru rodzaju funkcji wagi oraz wartości jej współczynników na dokładność „autokalibrowanych” wyników ważenia. Następnie porównano wrażliwość metod autokalibracji i korekcji temperaturowej na zmiany 7 parametrów systemu ważącego. Wybór zbioru parametrów w naturalny sposób wynikał z przyjętych w rozdziale 3 modeli: nacisku I-szej osi pojazdów odniesienia, zmienności czynników atmosferycznych, algorytmu estymacji nacisku statycznego oraz modelu systemu WIM. Poniżej przedstawiono definicje tych parametrów.

a) Δt_n - odległość czasowa pomiędzy pojazdami odniesienia [h], (4.13)

b) δC_0 - błąd względny wyznaczenia współczynnika C_0 , rozumiany jako:

$$\delta C_0 = \frac{\hat{C}_0 - C_0}{C_0} \quad (4.14)$$

gdzie:

C_0 - rzeczywista wartość współczynnika kalibracji,

$\hat{C}_0$ - estymata wartości współczynnika kalibracji,

c) $\delta \sigma_p$ - względne odchylenie standardowe symulowanego nacisku $p(t)$ pierwszej osi pojazdów odniesienia:

$$\delta \sigma_p = \frac{\sigma_p}{P_0} \quad (4.15)$$

gdzie:

σ_p - odchylenie standardowe symulowanego nacisku osi $p(t)$ (zależność 3.14),

P_0 - składowa stała – nacisk statyczny symulowanego nacisku osi,

d) $\delta \rho$ - względny błąd obciążenia wyników ważenia wywołany przestrzenną powtarzalnością nacisku osi,

$$\delta \rho = \frac{\rho}{P_0} \quad (4.16)$$

gdzie:

ρ - błąd obciążenia wyników ważenia wynikający z przestrzennej powtarzalności nacisku osi,

e) $\delta \sigma_z$ - względna niejednorodność czułości polimerowych czujników nacisku,

$$\delta \sigma_z = \frac{\sigma_z}{P_0} \quad (4.17)$$

gdzie:

σ_z - parametr określający zmienność czułości wzdłuż czujnika nacisku,

f) A_{Ta} - amplituda zmian temperatury asfaltu [$^{\circ}\text{C}$], (4.18)

g) f_{Ta} - częstotliwość zmian temperatury asfaltu [Hz]. (4.19)

Wpływ zmian wartości każdego z powyższych siedmiu parametrów, na dokładność wyników ważenia badano niezależnie, to znaczy w danej symulacji zmieniano wartość tylko jednego z nich, a pozostałe były ustalone, równe przyjętym wartościom referencyjnym, które zawarto w tabeli 4.1. Wartości parametrów a – g wynikają z opisanych w rozdziale 3.2 modeli elementów systemu ważącego i wymuszenia oraz z danych doświadczalnych.

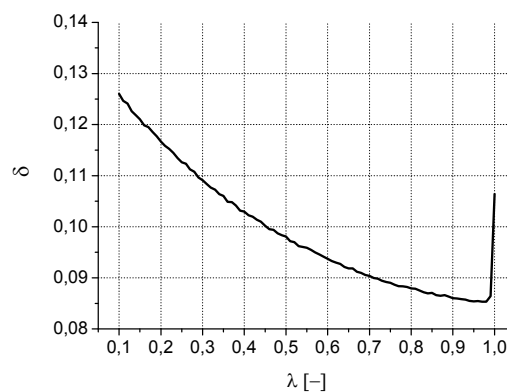
Tabela 4.1 Wartości referencyjne parametrów symulacji

Parametr	Δt_n [h]	δC_0 [%]	$\delta \sigma_p$ [%]	$\delta \rho$ [%]	$\delta \sigma_z$ [%]	A_{Ta} [°C]	f_{Ta} [Hz]
Wartość	0.05	10	10	1	8	8	$1.15 \cdot 10^{-5}$

Aby lepiej zobrazować łączne oddziaływanie zmian parametrów na właściwości systemu, w kilku przypadkach jednoczesnej zmianie podlegały dwa parametry, a charakterystyki przedstawiono w postaci wykresu 3D. Liczbę symulowanych pojazdów ustalono na 50 tysięcy. Za miarę dokładności wyników ważenia przyjęto skuteczny błąd względny δ (3.19).

4.3.1 Wybór funkcji wagi

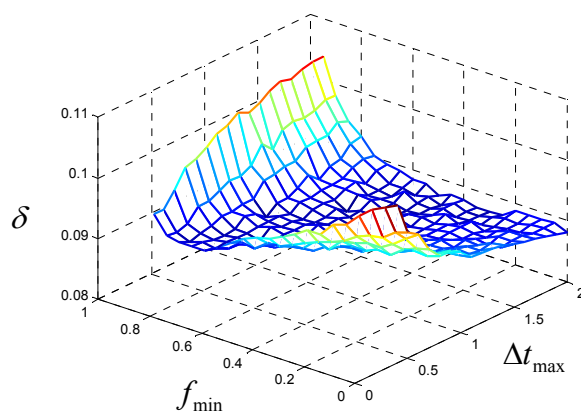
Dla algorytmu LS ze stałą wartością współczynnika zapominania, najmniejszą wartość błędu δ otrzymujemy dla $\lambda = 0.98$, co wynika z przedstawionej na rysunku 4.5 charakterystyki.



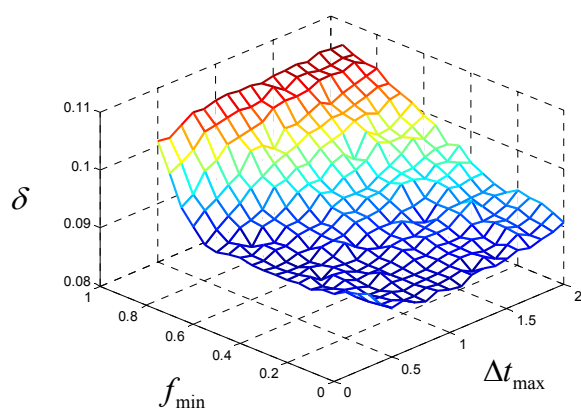
Rys. 4.5 Wpływ wartości współczynnika zapominania na dokładność ważenia dla algorytmu bez modyfikacji

Z drugiej strony na podstawie rozważań teoretycznych z rozdziału 4.1.1 wiadomo, że zdolność algorytmu LS z wykładniczym zapominaniem do śledzenia zmian estymowanego parametru zależy od wartości współczynnika zapominania. Uzmiennienie wartości tego współczynnika od odległości czasowej pomiędzy pojazdami odniesienia poprzez wprowadzenie funkcji wagi powinno poprawić dokładność estymacji nacisku statycznego osi (masy całkowitej pojazdu). Stopień tej poprawy niewątpliwie zależy od rodzaju funkcji oraz wartości współczynników $f_{\min}$, $\Delta t_{\max}$, które mają wpływ na jej kształt. Na rysunku 4.6 znajdują się charakterystyki względnego błędów skutecznego w zależności od wartości tych współczynników $\delta = g(f_{\min}, \Delta t_{\max})$, dla funkcji 4.9a – 4.9c. Wynik przedstawiono w postaci wykresu 3D w kartezjańskim układzie współrzędnych. Aby zmniejszyć losową zmienność rezultatu symulacji eksperyment powtórzono pięciokrotnie, a wyniki uśredniono.

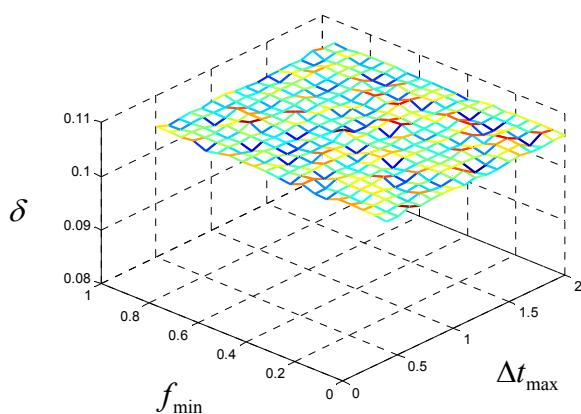
funkcja f_1 :



funkcja f_2 :



funkcja f_3 :



Rys. 4.6 Wpływ współczynników funkcji wagi na skuteczny błąd względny wyników ważenia w systemie z autokalibracją

Dla funkcji f_3 algorytm nie wykazuje istotnej wrażliwości na zmiany współczynników $f_{\min}$, $\Delta t_{\max}$, a błąd utrzymuje się na średnim poziomie 10.6%, natomiast dla funkcji f_1 i f_2 zaobserwowano wyraźną zmienność tego błędu. Na tej podstawie dla każdej funkcji wagi wybrano taką parę wartości współczynników $f_{\min}$, $\Delta t_{\max}$, która minimalizuje względny błąd skuteczny wyników ważenia (tabela 4.2).

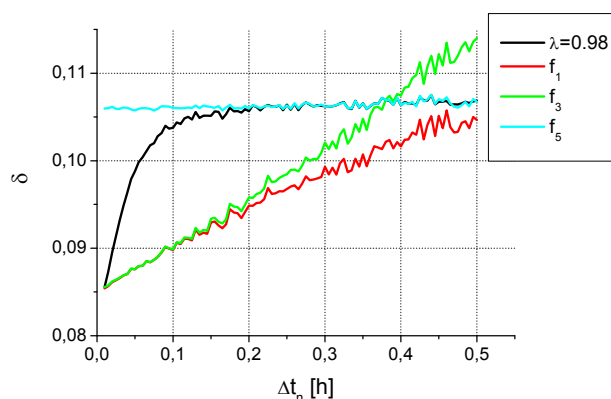
Tabela 4.2 Wybrane parametry funkcji wagi

	$f_{\min}$	$\Delta t_{\max}$	δ
f_1	0.55	1.7	0.087
f_2	0.45	1.0	0.087
f_3	0.5	0.5	0.105

Wyznaczone w ten sposób wartości, przyjęto za współczynniki funkcji wagi. Celem weryfikacji ich poprawnego wyboru, wyznaczono następujące charakterystyki:

- względny błąd skuteczny ważenia w funkcji odległości czasowej między pojazdami odniesienia,
- względny błąd skuteczny ważenia w funkcji amplitudy i częstotliwości zmian temperatury asfaltu.

Na rysunku 4.7 przedstawiono pierwszą z charakterystyk. Dla porównania kolorem czarnym oznaczono zmienność błędu δ dla algorytmu z wykładniczym zapominaniem bez modyfikacji. Maksymalną wartość argumentu Δt_n ustalono na 30 minut, gdyż w 99% przypadków, oczekiwanie na przejazd kolejnego pojazdu odniesienia na stanowisku WIM w Gardawicach nie przekracza 30 minut.

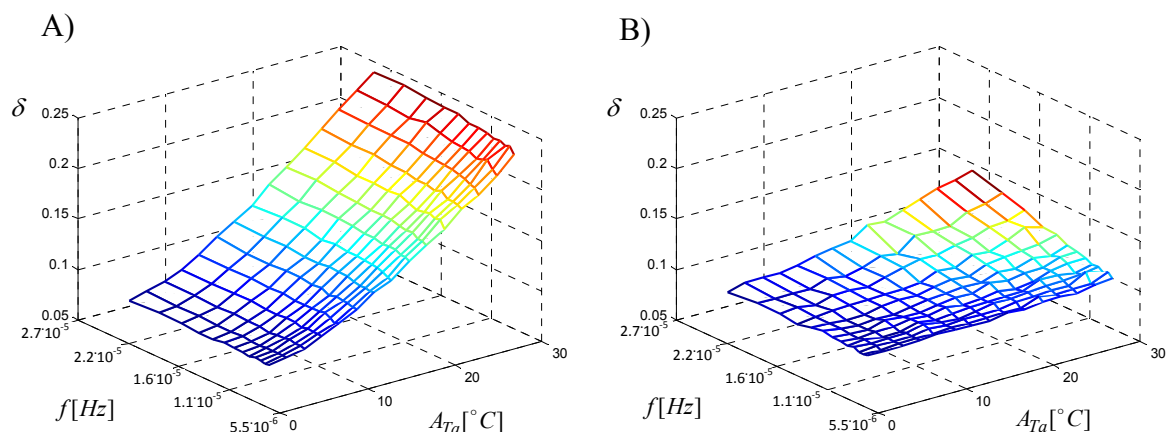


Rys. 4.7 Wpływ odległości czasowych Δt_n na względny błąd skuteczny wyników ważenia

W wyniku zastosowania modyfikacji algorytmu LS z funkcją wagi f_1 skuteczny błąd względny wyników ważenia w całym zakresie zmienności Δt_n ma mniejszą wartość niż w

przypadku użycia algorytmu ze stałą wartością λ , równą 0.98. Dla funkcji f_2 otrzymujemy dobry rezultat wyłącznie dla $\Delta t_n < 0.38$, a funkcja f_3 wnosi pogorszenie dokładności wyników ważenia względem algorytmu bez modyfikacji. W najlepszym przypadku (funkcja f_1) różnice pomiędzy wynikiem dla algorytmu zmodyfikowanego, a algorytmu bez modyfikacji sięgają 1.5% (poprawa o 16% dla $\Delta t_n = 0.1h$), a co istotne największy „zysk” otrzymujemy w przedziale często występujących odległości czasowych pomiędzy pojazdami odniesienia (porównaj rys. 3.11).

Jeszcze większa korzyść z zastosowania funkcji wagi w algorytmie LS objawia się dla systemów silnie niestacjonarnych. Na rysunku 4.8 przedstawiono charakterystykę obrazującą wpływ stopnia niestacjonarności systemu na dokładność wyników ważenia, przy czym wzrost niestacjonarności należy rozumieć jako wzrost amplitudy i częstotliwości zmian temperatury asfaltu. Porównano działanie algorytmu bez modyfikacji, oraz z modyfikacją w postaci funkcji wagi f_1 .



Rys. 4.8 Wpływ stopnia niestacjonarności systemu WIM na względny błąd skuteczny wyników ważenia:
A) algorytm bez modyfikacji, B) algorytm z modyfikacją

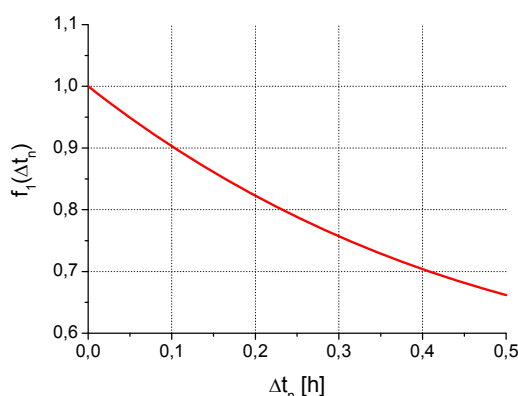
W przypadku systemów istotnie niestacjonarnych (duża amplituda i częstotliwość zmian T_a) dokładność wyników ważenia uzyskana dla algorytmu zmodyfikowanego jest na poziomie 15%, a dla algorytmu bez modyfikacji na poziomie 25%. Zastosowanie algorytmu z modyfikacją wnosi więc poprawę dokładności ważenia do 66% względem algorytmu bez modyfikacji, ze stałą wartością $\lambda = 0.98$. Dla systemów o małej dynamice zmian parametrów obydwa algorytmy dają porównywalne rezultaty.

Na podstawie przedstawionych wyników badań symulacyjnych, można sformułować następujący wniosek:

Zaproponowana modyfikacja algorytmu LS, z funkcją wagi f_1 wnosi istotną poprawę dokładności autokalibrowanych wyników ważenia względem algorytmu bez modyfikacji. Szczególna korzyść występuje dla systemów silnie niestacjonarnych.

Wybrana funkcja wagi f_1 ma postać (4.20), a jej zmienność przedstawiono na rysunku 4.9.

$$f_1(\Delta t_n) = 0.053 \cdot (\Delta t_n - 1.7)^4 + 0.55 \quad (4.20)$$



Rys. 4.9 Zmienność funkcji wagi (4.12)

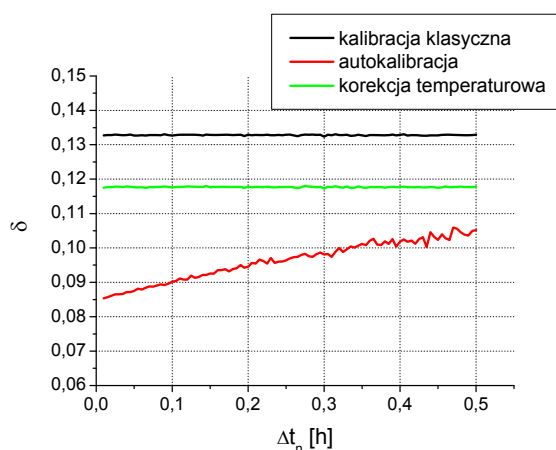
Wszystkie symulacje dotyczące algorytmu autokalibracji zostały wykonane w oparciu o zmodyfikowany algorytm LS z wyznaczoną funkcją wagi (4.20).

4.3.2 Autokalibracja i korekcja temperaturowa wyników ważenia - ocena właściwości metod

Celem drugiego etapu badań symulacyjnych jest ocena i porównanie właściwości metod autokalibracji oraz korekcji temperaturowej. Przedmiotem oceny jest wpływ zmian wartości parametrów 4.13 – 4.19 na względny błąd skuteczny wyników ważenia przy czym wpływ ten badano niezależnie, to znaczy w danej symulacji zmieniano wartość tylko jednego parametru, a pozostałe były ustalone, równe przyjętym wartościom referencyjnym, zawartym w tabeli 4.1. W metodzie autokalibracji, zastosowano zmodyfikowany algorytm LS z funkcją wagi (4.20). Korekcja temperaturowa polegała na obliczeniu wyników ważenia zgodnie z zależnością (4.12). Dla porównania, oceniono również dokładność systemu WIM kalibrowanego metodą pojazdu wstępnie zważonego, a więc dla stałej, raz wyznaczonej wartości współczynnika kalibracji C_0 . W tym przypadku, podobnie jak w metodzie korekcji temperaturowej przyjęto, że błąd wyznaczenia współczynnika kalibracji wyniósł $\delta C_0 = 10\%$. Za symulowane naciski osi posłużył wygenerowany zbiór 50 tysięcy liczb o rozkładzie normalnym i parametrach statystycznych charakteryzujących rozkład nacisków I-szej osi pojazdów odniesienia. Liczby te reprezentowały rzeczywiste wartości wielkości mierzonej.

4.3.2a Wpływ odległości czasowych pomiędzy pojazdami odniesienia Δt_n

Charakterystyki przedstawione na rysunku 4.10 ilustrują wpływ odległości czasowych pomiędzy pojazdami odniesienia na wynik ważenia dla różnych algorytmów korekcji.



Rys. 4.10 Wpływ odległości czasowych Δt_n na błąd wyników ważenia

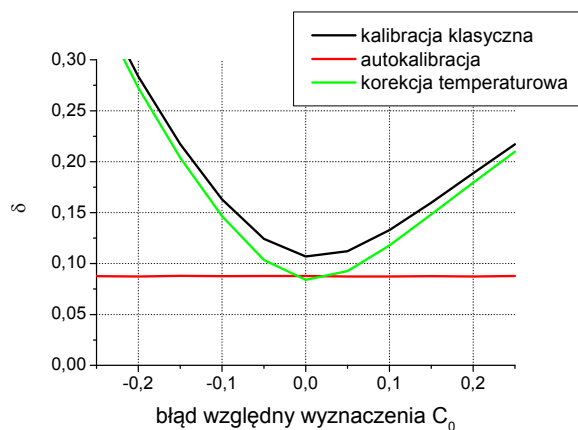
Najgorszy wynik, niezależnie od wartości Δt_n , uzyskano dla klasycznej kalibracji systemu WIM metodą pojazdu wstępnie zważonego. Rezultat ten należy uznać za zgodny z przewidywaniami, gdyż dla systemów niestacjonarnych, kalibracja tego rodzaju nie zapewnia kompensacji wpływu czynników zewnętrznych na wynik pomiaru. Największą dokładność wyników w całym przedziale zmienności Δt_n otrzymujemy natomiast dla algorytmu autokalibracji.

Dokładność wyników ważenia kalibrowanych w sposób klasyczny wyniosła 13,5%, a wyników poddanych procedurze autokalibracji nawet 8,5%. Zastosowanie metody autokalibracji wnosi prawie dwukrotną poprawę dokładności wyników ważenia w zadanych warunkach pomiaru scharakteryzowanych wartościami parametrów z tabeli 4.1.

Metoda autokalibracji jest wrażliwa na zmianę odległości czasowych Δt_n , częstotliwość występowania pojazdów odniesienia nie wpływa natomiast na dokładność wyników korygowanych temperaturowo co wynika wprost z przedstawionej idei tej metody. Jej dokładność plasuje się pomiędzy kalibracją klasyczną, a metodą autokalibracji, należy jednak pamiętać o założeniu, że wstępna wartość współczynnika kalibracji C_0 została oszacowana z błędem $\delta C_0 = 10\%$.

4.3.2b Wpływ dokładności wyznaczenia współczynnika C_0

Dokładność wyników ważenia w funkcji błędu δC_0 przedstawia rysunek 4.11.

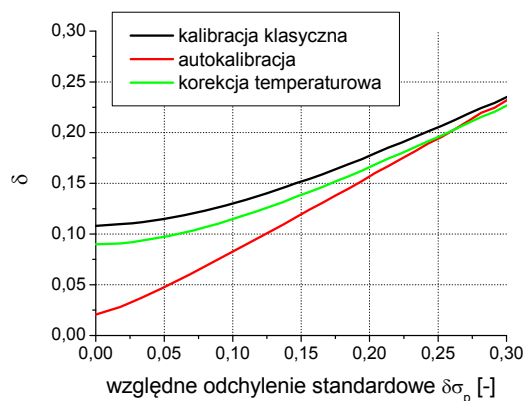


Rys. 4.11 Wpływ dokładności wyznaczenia współczynnika C_0 na błąd wyników ważenia

W przedziale $\pm 5\%$ błędu względnego wyznaczenia współczynnika C_0 można przyjąć, że wyniki ważenia w systemie z korekcją temperaturową i metodą autokalibracji są obciążone porównywalnym błędem δ . Powyżej $\pm 5\%$ błędu wyznaczenia C_0 dokładność metody korekcji gwałtownie spada, co wskazuje na jej dużą wrażliwość na dokładność wstępnej kalibracji systemu WIM. Ponieważ z przeprowadzonych badań (Gajda i Sroka 2005) wynika, iż w zależności od liczby pojazdów kalibrujących ich mas oraz liczby przejazdów przez stanowisko ważące uzyskiwana dokładność kalibracji metodą pojazdu wstępnie zważonego zawiera się w granicach od dziesięciu do kilkunastu procent to rzeczywistą dokładność metody korekcji temperaturowej należy szacować na tym samym poziomie.

4.3.2c Wpływ względnej zmienności nacisku $\delta\sigma_p$

Kolejny czynnik mający wpływ na dokładność uzyskiwanych wyników ważenia to jakość nawierzchni. Od tej jakości zależy amplituda pionowych wahań pojazdu charakteryzowana przez względne odchylenie standardowe nacisku osi $\delta\sigma_p$. Z przedstawionej na rysunku 4.12 charakterystyki wynika, że dla idealnie płaskiej nawierzchni (brak pionowych wahań pojazdów), niestacjonarność systemu powodowana zmianą temperatury asfaltu może być niemal w pełni niwelowana metodą autokalibracji. Niezerowa wartość błędu wynika z niezerowej losowej zmienności wzorca użytego w tej metodzie do estymacji współczynnika kalibracji oraz z błędów obciążenia wyników ważenia ρ .



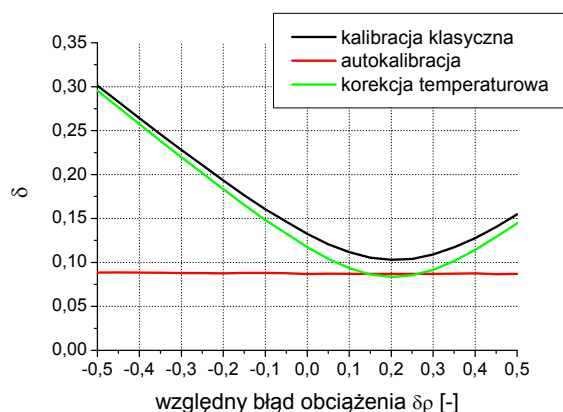
Rys. 4.12 Wpływ względnej zmienności nacisku I-szej osi pojazdów odniesienia na błąd wyników ważenia

Pogorszenie jakości nawierzchni objawiające się wzrostem pionowych wahań pojazdu, w podobny sposób wpływa na wyniki uzyskane wszystkimi metodami. Wbrew obawom losowa zmienność wzorca autokalibracji nie jest parametrem krytycznym tej metody, co wskazuje na jej przydatność na stanowiskach WIM montowanych na drogach o gorszej jakości.

4.3.2d Wpływ względnego błędu obciążenia wyników ważenia $\delta\rho$

Z charakterystyk umieszczonych na rysunku 4.13 wynika, że metoda autokalibracji nie jest wrażliwa na zmiany błędu obciążania wyników ważenia (wywołanego np. przestrzenną powtarzalnością nacisku osi) w przeciwieństwie do metod korekcji temperaturowej i kalibracji klasycznej. Wynika to wprost z zasady działania poszczególnych algorytmów i prowadzi do następującego wniosku:

Autokalibracja ogranicza niekorzystny wpływ wszystkich czynników zakłócających pomiar (gdyż bazuje na pomiarze wielkości odniesienia), natomiast metoda korekcji ogranicza jedynie wpływ zmian temperatury asfaltu (gdyż bazuje na charakterystyce temperaturowej stanowiska).



Rys. 4.13 Wpływ względnego błędu obciążenia na błąd wyników ważenia

Dodatkowego wytłumaczenia wymaga fakt wyraźnego minimum błędu względnego dla algorytmu korekcji i klasycznej metody kalibracji dla niezerowej wartości $\delta\rho$. Wynik ten tylko pozornie wydaje się sprzeczny z intuicją i można go wytłumaczyć w następujący sposób. W przeprowadzonych badaniach wymuszeniem jest symulowany nacisk I-szej osi pojazdów odniesienia (rzeczywista wartość wielkości mierzonej) o wartości średniej $\mu_0 = 61.670kN$. Przez μ_T oznaczmy wartość średnią korygowanych temperaturowo wyników ważenia (wynik pomiaru wielkości mierzonej). W skutek niestacjonarności systemu WIM i błędów pomiarowych wartość zmierzona nie jest równa wartości rzeczywistej nacisku, skąd otrzymujemy, że $\mu_0 \neq \mu_T$. Dla przyjętego w badaniach modelu systemu WIM ($\delta\rho = 0.01$) stosunek wyżej wymienionych wartości średnich wynosi:

$$\frac{\mu_T}{\mu_0} = 1.10$$

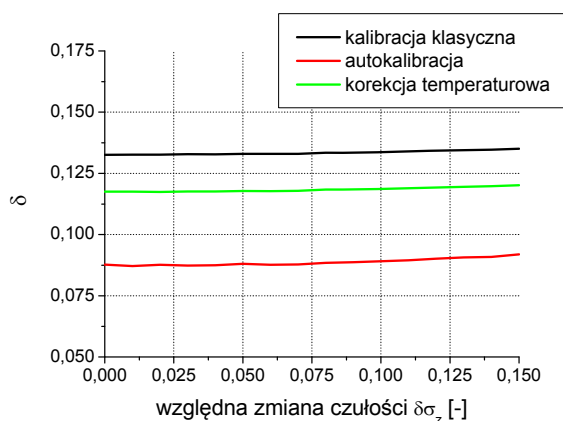
co oznacza, że wartość średnia korygowanych temperaturowo wyników ważenia jest o 10% większa od średniej wartości wielkości mierzonej. Przyjmując $\delta\rho = 0.22$, co odpowiada minimum zmienności charakterystyk z rys 4.13, otrzymujemy natomiast:

$$\frac{\mu_T}{\mu_0} = 1.00$$

z czego wynika, że w skutek wprowadzenia do wyników ważenia błędu obciążenia, wartości średnie zrównały się $\mu_0 = \mu_T$ i w konsekwencji dla $\delta\rho = 0.22$ otrzymujemy minimum względnego błędu skutecznego wyników ważenia.

4.3.2e Wpływ względnej zmiany czułości czujników nacisku $\delta\sigma_z$

Względna zmiana czułości wzdłuż polimerowych czujników nacisku, nie ma istotnego wpływu na dokładność wyników ważenia.

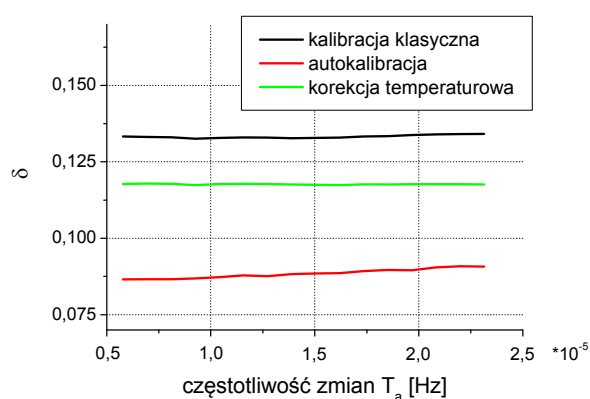


Rys. 4.14 Wpływ względnej zmiany czułości czujników nacisku na błąd wyników ważenia

Wynika to z faktu, że rozkład względnych zmian czułości dla kolejnych czujników nacisku, na ścieżce przejazdu pojazdu ma zerową wartość oczekiwaną (porównaj rozdział 2.5 „Przyczyny błędów pomiarowych w systemach WIM z czujnikami polimerowymi”).

4.3.2f Wpływ częstotliwości zmian temperatury asfaltu

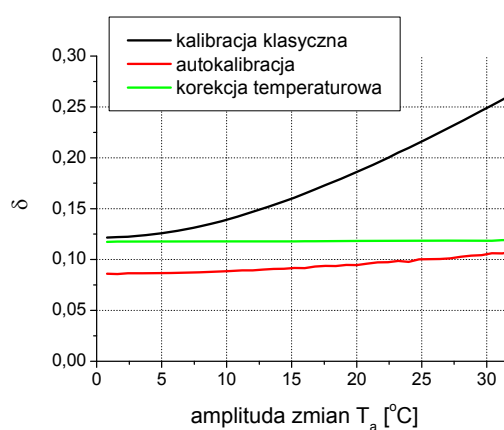
Podobnie jak zmiany czułości wzdłuż czujników nacisku tak częstotliwość zmian temperatury asfaltu nie ma istotnego wpływu na dokładność skorygowanych wyników ważenia (rys. 4.15).



Rys. 4.15 Wpływ częstotliwości zmian temperatury asfaltu na błąd wyników ważenia

4.3.2g Wpływ amplitudy zmian temperatury asfaltu (stopnia niestacjonarności systemu)

Odmiennie wygląda sytuacja ze zmianą amplitudy temperatury asfaltu, która wpływa na zakres zmian współczynnika kalibracji, a tym samym na stopień niestacjonarności systemu. Im większa amplituda zmian temperatury, tym większa niestacjonarność.



Rys. 4.16 Wpływ zmiany amplitudy temperatury asfaltu na błąd wyników ważenia

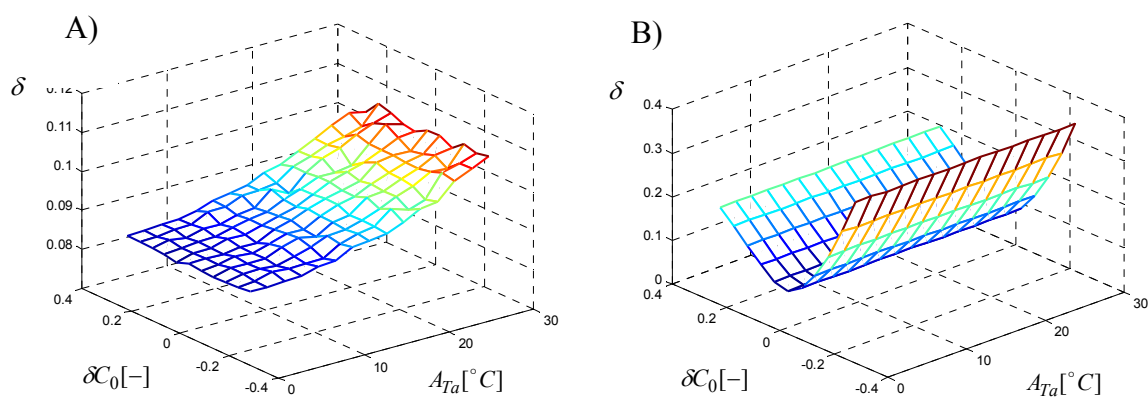
Największą wrażliwość na zmiany A_{Ta} wykazuje klasyczna metoda kalibracji, następnie autokalibracja, a metoda korekcji temperaturowej nie wykazuje żadnej wrażliwości. Jest to zdecydowana zaleta tej metody dzięki czemu może być ona stosowana w systemach istotnie niestacjonarnych bez wpływu na jakość korekcji.

4.3.3 Autokalibracja i korekcja temperaturowa – charakterystyki wielowymiarowe i analiza korelacyjna przebiegów czasowych

Z przedstawionych dotychczas wyników badań symulacyjnych można wyciągnąć wniosek, że metody autokalibracji i korekcji temperaturowej, charakteryzują się rozłączną wrażliwością na zmiany parametrów systemu WIM. Oznacza to, że gdy dokładność autokalibrowanych wyników ważenia zależy od zmian danego parametru to korygowane temperaturowo wyniki nie wykazują takiej wrażliwości i odwrotnie. Wyjątek stanowi wpływ względnej zmienności nacisku $\delta\sigma_p$. Z kolei względna zmiana czułości wzdłuż czujników nacisku $\delta\sigma_z$, oraz zmiany częstotliwości temperatury asfaltu f_{Ta} nie mają wpływu na wynik działania algorytmów. Za najistotniejsze parametry mające wpływ na dokładność obydwu metod należy zatem uznać :

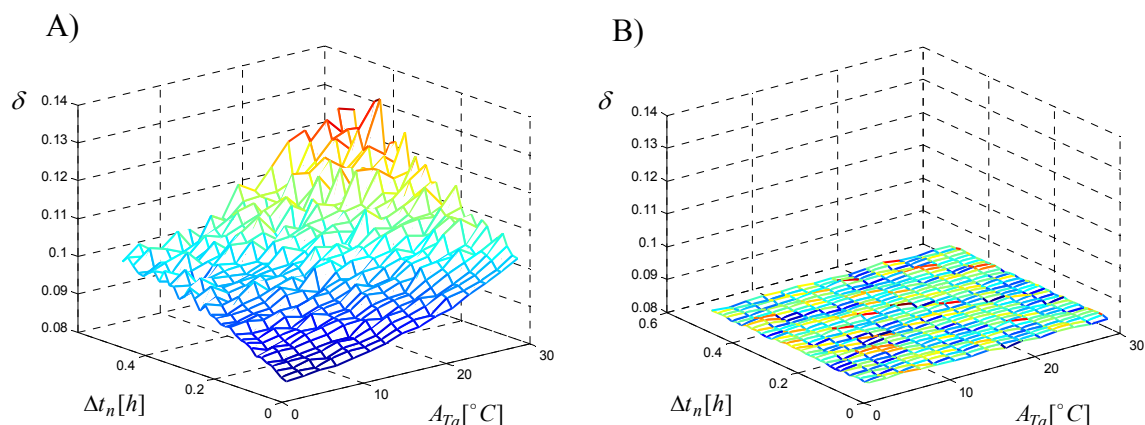
- odległość czasową między pojazdami odniesienia,
- dokładność wyznaczenia współczynnika C_0 ,
- amplitudę zmian temperatury asfaltu (stopień niestacjonarności systemu WIM).

Ponieważ właściwości wypadkowe systemu nie są prostą sumą właściwości poszczególnych jego elementów, to zrozumienie i porównanie łącznego oddziaływania zmian powyższych parametrów na właściwości metod autokalibracji i korekcji, wymaga analizy wielowymiarowej. Na rysunku 4.17 przedstawiono łączne oddziaływanie zmian δC_0 i A_{Ta} na dokładność wyników ważenia. Charakterystyki te, będące w zasadzie „złożeniem” charakterystyk z rysunków 4.11 i 4.16, dobrze obrazują rozłączność oddziaływania zmian parametrów na właściwości metod autokalibracji i korekcji temperaturowej.



Rys. 4.17 Łączny wpływ zmiany δC_0 i A_{Ta} na względny błąd skuteczny wyników ważenia w systemie ważącym **A)** z autokalibracją, **B)** z korekcją temperaturową

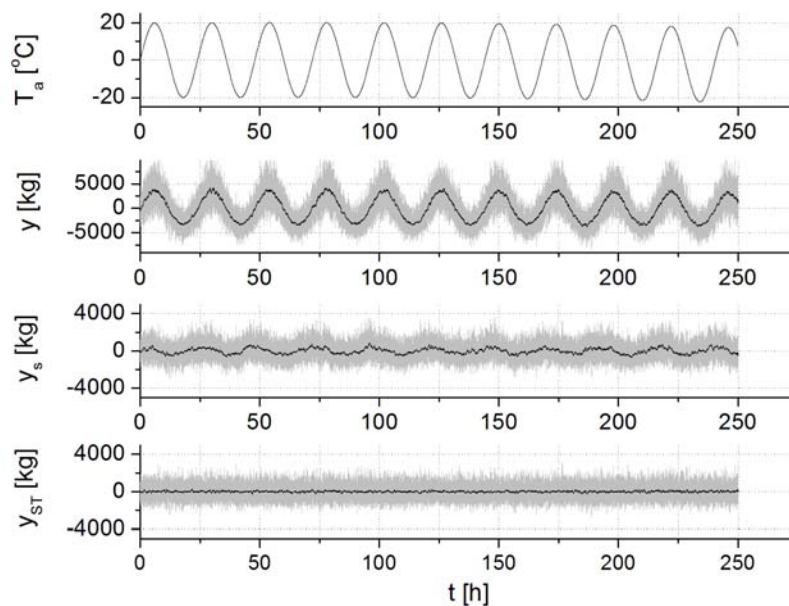
Warto zwrócić uwagę na fakt, że w przypadku wyznaczenia współczynnika kalibracji C_0 z dużą dokładnością, to niezależnie od stopnia niestacjonarności systemu, dokładność metody korekcji temperaturowej jest lepsza niż autokalibracji. Największe różnice występują dla dużej amplitudy temperatury asfaltu, a więc dla systemów mocno niestacjonarnych, dla których błąd autokalibrowanych wyników osiąga duże wartości. Na kolejnych rysunkach przedstawiono charakterystykę $\delta = g(\Delta t_n, A_{Ta})$, dla obydwu algorytmów korekcji, przy czym przyjęto $\delta C_0 = 0$, a więc założono że współczynnik kalibracji C_0 został wyznaczony bezbłędnie.



Rys. 4.18 Łączny wpływ zmiany Δt_n i A_{Ta} na względny błąd skuteczny wyników ważenia w systemie ważącym **A)** z autokalibracją, **B)** z korekcją temperaturową

Metoda autokalibracji wykazuje dużą, względem metody korekcji temperaturowej, wrażliwość na zmiany odległości czasowych między pojazdami odniesienia Δt_n i zmiany amplitudy temperatury asfaltu A_{Ta} . Cechę tę należy uznać za wadę tej metody. Korekcja temperaturowa jest natomiast niewrażliwa na zmiany Δt_n i A_{Ta} co jest zdecydowaną zaletą. Rozważania te prowadzą do wniosku, iż w pewnych okolicznościach (mały błąd wyznaczenia C_0 , duża amplituda zmian T_a) metoda korekcji temperaturowej jest bardziej skuteczna niż metoda autokalibracji. Jeżeli jednak wyznaczenie współczynnika kalibracji C_0 jest obciążone dużym błędem (powyżej 10%) to metoda autokalibracji daje lepsze rezultaty.

Zaobserwowane cechy wynikają głównie ze skuteczności z jaką obydwa algorytmy eliminują wpływ niestacjonarności systemu na zmienność wyników ważenia. Pełny obraz właściwości algorytmów wymaga oceny tej skuteczności na podstawie analizy przebiegów czasowych i analizy korelacyjnej. Na rysunku 4.19 przedstawiono przykładowe symulowane sygnały temperatury asfaltu T_a , niekorygowanych wyników ważenia y oraz wyników po autokalibracji y_s i korekcji temperaturowej y_{ST} . We wszystkich przypadkach usunięto wartość średnią sygnałów. Dodatkowo aby na tle losowej zmienności wyników ważenia lepiej wyeksponować trend związany z niestacjonarnością systemu, dane poddano wygładzaniu metodą średniej ruchomej (3.1) z parametrem $N_s=150$.



Rys. 4.19 Przebiegi czasowe T_a , y , y_s , y_{ST}

Zmienność wyników ważenia nie poddanych żadnej korekcie (y) wynika z wpływu zmian temperatury asfaltu T_a na parametry systemu WIM. To niekorzystne zjawisko jest zdecydowanie ograniczone po zastosowaniu algorytmu autokalibracji (y_s), jednak nawet wizualnie można stwierdzić, iż zmienność y_s wywołana niestacjonarnością nie została w pełni usunięta. Metoda korekcji temperaturowej radzi sobie najlepiej (y_{ST}) i niemal w pełni niweluje omawiany efekt. Ilościowa ocena tego zjawiska wymaga analizy macierzy kowariancji sygnałów T_a , y , y_s , y_{ST} , które wyznaczono dla różnych (skrajnych) parametrów systemu WIM (tabele 4.3a – 4.3d).

Tabela 4.3a $\Delta t_n = 0.05$, $A_{T_a} = 8$

	T_a	y	y_s	y_{ST}
T_a	1.00	0.98	0.13	0.03
y		1.00	0.21	0.22
y_s			1.00	0.39
y_{ST}				1.00

Tabela 4.3b $\Delta t_n = 0.25$, $A_{T_a} = 8$

	T_a	y	y_s	y_{ST}
T_a	1.00	0.98	0.10	0.03
y		1.00	0.15	0.22
y_s			1.00	0.22
y_{ST}				1.00

Tabela 4.3c $\Delta t_n = 0.05$, $A_{T_a} = 20$

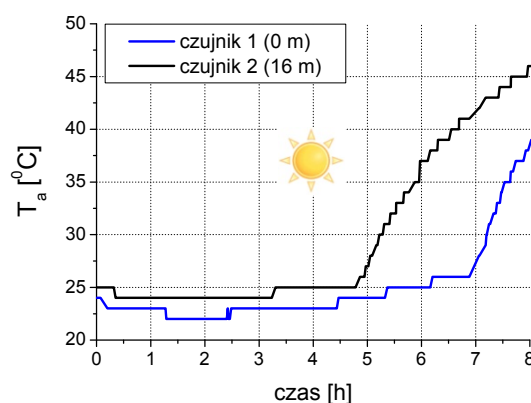
	T_a	y	y_s	y_{ST}
T_a	1.00	0.98	0.23	0.12
y		1.00	0.23	0.16
y_s			1.00	0.19
y_{ST}				1.00

Tabela 4.3d $\Delta t_n = 0.25$, $A_{T_a} = 20$

	T_a	y	y_s	y_{ST}
T_a	1.00	0.98	0.22	0.12
y		1.00	0.23	0.17
y_s			1.00	0.16
y_{ST}				1.00

W zależności od wartości parametrów Δt_n i A_{T_a} współczynnik korelacji między temperaturą asfaltu, a autokalibrowanymi wynikami ważenia zawiera się w granicach od 0.10 do 0.23 i jest kilka razy większy niż współczynnik korelacji między temperaturą asfaltu, a wynikami po korekcji temperaturowej. Niepełna kompensacja wpływu T_a na wyniki ważenia, wynika z dynamiki algorytmu LS będącego podstawą metody autokalibracji i zależy od częstotliwości występowania pojazdów odniesienia. Algorytm korekcji temperaturowej nie jest obciążony żadną inercją i w związku z tym charakteryzuje się większą skutecznością w eliminacji wpływu niestacjonarności systemu wywołanego zmianami temperatury asfaltu niż metoda autokalibracji. To tłumaczy małe błędy korygowanych temperaturowo wyników ważenia w sytuacji gdy współczynnik kalibracji C_0 jest wyznaczony dokładnie.

Należy jednak pamiętać, że w dotychczasowych badaniach symulacyjnych założono, iż mierzona temperatura asfaltu jest równa temperaturze w punkcie zainstalowania czujników nacisku i na całym stanowisku ważącym ma jednakową wartość. W praktyce tak nie jest. Stanowisko ważące należy bowiem traktować jak obiekt o parametrach rozłożonych i niejednorodnej strukturze. W asfalcie występuje przestrzenny gradient temperatury powodujący, że temperatura w punkcie zainstalowania czujnika temperatury różni się od temperatury w punkcie zainstalowania czujników nacisku. Dla przykładu na stanowisku ważącym w Gardawicach, czujniki temperatury są zainstalowane na początku i końcu stanowiska, a odległość między nimi wynosi ponad 16 metrów. W skrajnym przypadku jakim jest wschód słońca, który wywołuje intensywne lecz niejednorodne nagrzewanie nawierzchni, gradient temperatury w tym systemie przekracza 10 °C co obrazują rejestracje zamieszczone na rysunku 4.20.



Rys. 4.20 Rejestracje temperatury asfaltu w dwóch punktach stanowiska WIM (0 i 16 metrów licząc od punktu najazdu pojazdów)

Istotne znaczenie ma również głębokość zainstalowania czujnika temperatury w asfalcie, która zazwyczaj jest większa niż głębokość zainstalowania czujników nacisku. Umieszczenie czujnika temperatury w głębszych warstwach nawierzchni może wywoływać różnicę w wyniku pomiaru temperatury, względem temperatury w płytkich warstwach, w których zainstalowane są czujniki nacisku.

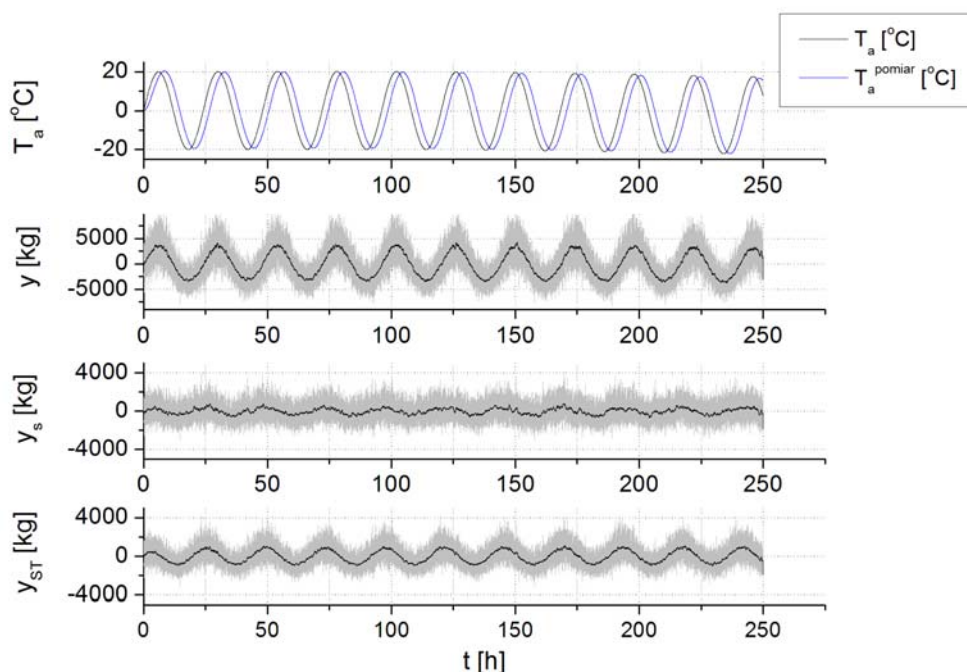
Wpływ omawianego zjawiska na wynik pomiaru temperatury asfaltu zasymulowano, poprzez wprowadzenie do toru pomiaru temperatury członu inercyjnego I-szego rzędu o transmitancji opisanej wzorem 4.21.

$$G(s) = \frac{k}{T \cdot s + 1} \quad (4.21)$$

gdzie:

k – współczynnik wzmocnienia,
 T – stała czasowa inercji.

Przyjęty model nie jest modelem fizykalnym, a dokładne opisanie zjawiska wymagałoby zastosowania modelu predykcji temperatury wewnątrz asfaltu na podstawie pomiaru rozkładu temperatury na jego powierzchni. Modele takie istnieją, jednak są bardzo skomplikowane (Lukanen, Stubstad i Briggs 2000), a ich użycie w niniejszej pracy wydaje się nie uzasadnione. Zastosowanie modelu (4.21) należy więc uznać za racjonalny kompromis, między złożonością i czasochłonnością modelowania, a oczekiwanym efektem. Na rysunku 4.21 przedstawiono przebiegi czasowe sygnałów T_a , y , y_s , y_{ST} , w sytuacji gdy pomiar temperatury T_a^{pomiar} , obarczony był inercją, wynikającą z przyjętego modelu (4.21) dla $k=1$ i $T=3h$.



Rys. 4.21 Przebiegi czasowe

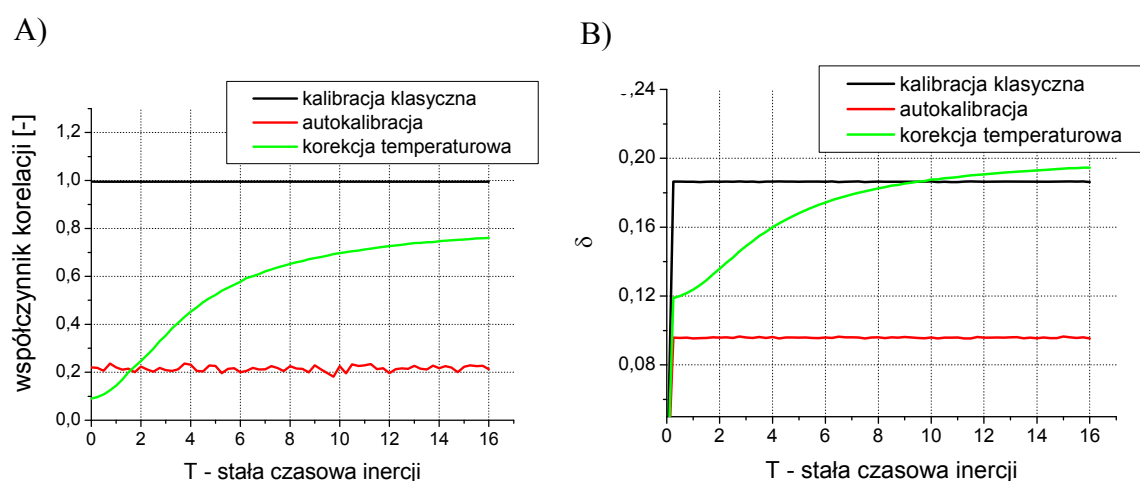
Wprowadzenie inercji do toru pomiaru temperatury asfaltu niekorzystnie wpływa na „jakość” korekcji temperaturowej, natomiast nie oddziałuje na wynik autokalibracji.

Obserwacja ta znajduje odzwierciedlenie w macierzy kowariancji zawartej w tabeli 4.4.

Tabela 4.4. $\Delta t_n = 0.05$, $A_{Ta} = 20$

	T_a	y	y_s	y_{ST}
T_a	1.00	0.98	0.23	0.35
y		1.00	0.23	0.36
y_s			1.00	0.88
y_{ST}				1.00

Współczynnik korelacji między temperaturą asfaltu, a wynikami ważenia korygowanymi temperaturowo w przypadku występowania inercji w torze pomiaru temperatury (tabela 4.4) jest niemal trzy krotnie większy niż gdy ta inercja nie występuje (tabela 4.3c). Zobrazowane jest to również na rysunku 4.22, gdzie przedstawiono zmienność współczynnika korelacji pomiędzy temperaturą asfaltu T_a , a kolejnymi wynikami ważenia y , y_s , y_{ST} .



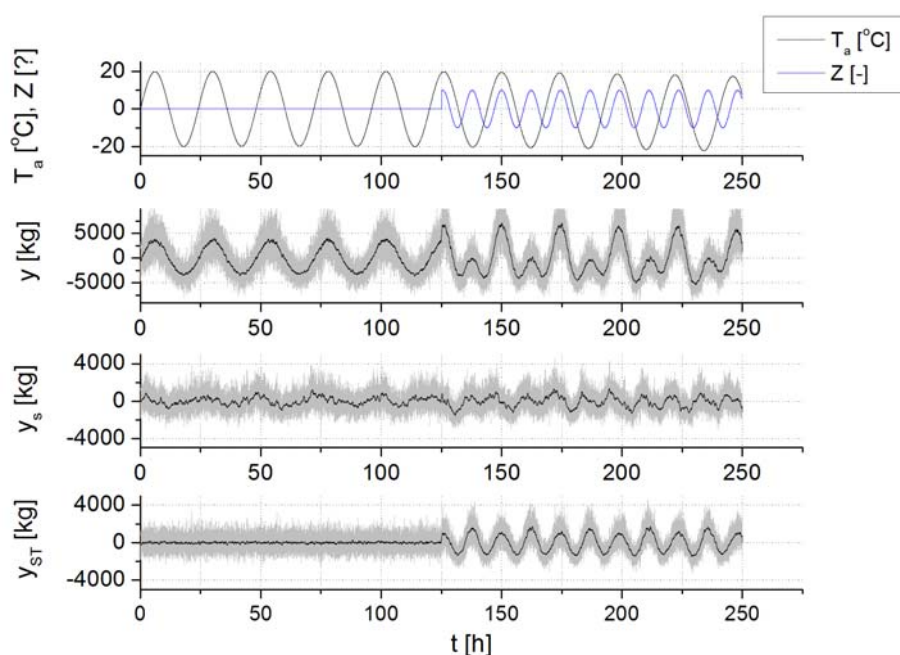
Rys. 4.22 Wpływ stałej czasowej T na **A)** współczynnik korelacji, **B)** błąd wyników ważenia

Inercja w torze pomiaru temperatury w oczywisty sposób nie wpływa na wyniki poddane autokalibracji i kalibrowane w sposób klasyczny, ma natomiast wpływ na wyniki korygowane temperaturowo. Wzrost „opóźnienia” w pomiarze T_a rozumiany jako wzrost stałej czasowej T w modelu (4.21) wywołuje istotny wzrost korelacji i błędu wyników ważenia korygowanych temperaturowo.

Ponadto korekcja temperaturowa ogranicza jedynie wpływ zmian temperatury asfaltu na wyniki ważenia i w przypadku gdy niestacjonarność systemu jest wywołana innymi czynnikami niż T_a , metoda nie sprawdza się. Dowodem na to jest wynik symulacji umieszczony na rysunku 4.23. W tym przypadku w modelu systemu WIM uwzględniono wpływ dodatkowego czynnika Z_0 , zakłócającego pomiar.

$$y_m(i) = \mu_0 \cdot \left(2.07 \cdot 10^{0.00504 \cdot T_a^m(i)} \right) + 0.05 \cdot Z_0(i) + \mu_0 \cdot \sigma_z \cdot z(i) \quad (4.22)$$

Czynnik ten może być dowolnego pochodzenia (temperatura otoczenia, wilgotność powietrza, błąd obciążenia wywołany przestrzenną powtarzalnością nacisku, itp.) i z tego powodu świadomie nie nadano mu wymiaru fizycznego.



Rys. 4.23 Wpływ czynnika Z_0 na wyniki ważenia

Pojawienie się w 125 godzinie dodatkowego czynnika wywołującego niestacjonarność systemu, powoduje znaczne zakłócenie korygowanych temperaturowo wyników ważenia. Metoda korekcji bazująca wyłącznie na charakterystyce temperaturowej stanowiska, nie ogranicza oddziaływania czynnika Z_0 . Na tym tle korzystnie wypada metoda autokalibracji, która pomimo, że nie eliminuje w pełni wpływu niestacjonarności, to w rozważonym przypadku znacznie lepiej ogranicza oddziaływanie czynników zewnętrznych na wyniki ważenia niż metoda korekcji temperaturowej.

Potwierdzeniem tego faktu jest macierz kowariancji ujęta w formę tabeli 4.5.

Tabela 4.5. $\Delta t_n = 0.25$, $A_{Ta} = 20$

	T_a	Z	y	y_s	y_{ST}
T_a	1.00	0.00	0.81	0.13	-0.05
Z		1.00	0.57	0.31	0.98
y			1.00	0.30	0.52
y_s				1.00	0.33
y_{ST}					1.00

Współczynnik korelacji pomiędzy zakłóceniem Z_0 , a autokalibrowanymi wynikami ważenia jest niemal trzykrotnie mniejszy niż między zakłóceniem Z_0 , a wynikami korygowanymi temperaturowo. Potwierdza to sformułowany już wcześniej wniosek, że metoda korekcji temperaturowej sprawdza się wyłącznie w ograniczaniu wpływu temperatury asfaltu na wynik ważenia. Zdecydowaną zaletą metody autokalibracji jest kompensacja wpływu wszystkich czynników wywołujących niestacjonarność systemu WIM.

4.4 Podsumowanie

W bieżącym rozdziale przedstawiono wyniki badań wrażliwościowych algorytmów automatycznej kalibracji (korekcji) wyników ważenia, które porównano z wynikami dla systemu kalibrowanego w sposób klasyczny.

Z przedstawionych wyników badań symulacyjnych wynika, że obydwie zaproponowane przez autora metody wnoszą istotną poprawę dokładności wyników ważenia względem klasycznej metody kalibracji systemów WIM, niezależnie od zakresu zmian parametrów systemu.

Trudno jednak jednoznacznie stwierdzić, która z opracowanych metod daje najlepsze rezultaty, gdyż ich właściwości, a tym samym zdolność do eliminacji wpływu niestacjonarności na wyniki ważenia zależy od parametrów związanych z systemem WIM. System kalibrowany wyłącznie metodą pojazdu wstępnie zważonego, powinien umożliwiać pomiar temperatury asfaltu, a wyniki ważenia powinny być poddane korekcji temperaturowej. W przeciwnym wypadku już po kilku godzinach od kalibracji systemu dokładność uzyskiwanych wyników może się drastycznie zmniejszyć w skutek zmiany warunków atmosferycznych. Zasadniczą wadą metody korekcji temperaturowej jest duża wrażliwość na dokładność wstępnej kalibracji systemu oraz konieczność wyznaczenia charakterystyki

temperaturowej stanowiska. Warunek ten jest trudny do spełnienia w nowych systemach WIM, gdyż wyznaczenie charakterystyki temperaturowej wymaga długookresowych rejestracji danych pomiarowych (co najmniej przez kilka miesięcy). Wad tych pozbawiona jest metoda autokalibracji, której autonomiczność polega na tym, że nie wymaga żadnych wstępnych czynności w systemie ważącym. Ponadto do zalet tej metody należy zaliczyć jej uniwersalność, gdyż może być stosowana niemal w każdym systemie ważącym nawet na drogach o złej jakości. Zastępuje uciążliwy i kosztowny proces klasycznej, okresowej kalibracji stanowiska, a ponadto umożliwia zwiększenie dokładności wyników ważenia o 3% do 10% względem metody pojazdu wstępnie zważonego (ponad dwukrotna poprawa dokładności – rys. 4.16). Otrzymane wyniki są optymistyczne, jednak ostateczną odpowiedź na pytanie „jak skuteczne są metody autokalibracji i korekcji temperaturowej?” można uzyskać jedynie na podstawie badań eksperymentalnych, które przedstawiono w następnym rozdziale.

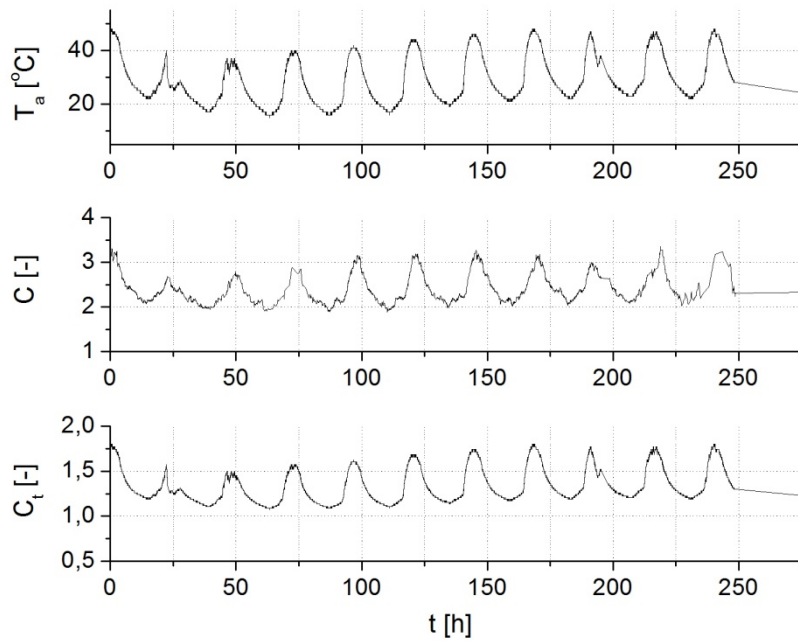
5. Badania eksperymentalne

W poprzednim rozdziale przedstawiono podstawowe właściwości metod eliminacji wpływu niestacjonarności systemu WIM na dokładność wyników ważenia, tj. metody autokalibracji i korekcji temperaturowej. Przeprowadzone badania symulacyjne, z użyciem wyznaczonego modelu matematycznego systemu WIM, wykazały istotną przewagę proponowanych metod, nad popularną, klasyczną metodą kalibracji, która zakłada stacjonarność systemu. W tym rozdziale przedstawione zostaną natomiast wyniki badań eksperymentalnych rzeczywistego dwuczujnikowego systemu WIM, który był zainstalowany na stanowisku ważącym w miejscowości Gardawice. Przeprowadzone eksperymenty można podzielić na dwie grupy. Do pierwszej z nich należą rejestracje parametrów wszystkich pojazdów przejeżdżających przez stanowisko ważące w okresie lat 2005 - 2008. Ponieważ, statyczne naciski osi tych pojazdów nie były znane, dane te posłużyły jedynie do oceny skuteczności porównywanych metod w eliminacji wpływu niestacjonarności na wyniki ważenia. Stosowne charakterystyki i wyniki obliczeń dotyczące tego zagadnienia przedstawiono w punkcie 5.1. Druga część badań eksperymentalnych polegała na ocenie dokładności systemu WIM. W tym celu wykorzystano rejestracje wyników ważenia pojazdów wstępnie zważonych, a więc o znanych naciskach na oś i masie całkowitej. Takie działanie pozwoliło ocenić dokładność badanych metod, poprzez porównanie wyników ważenia z systemu WIM z wynikami uzyskanym na wadze statycznej. Dyskusja nad oceną dokładności systemu została przedstawiona w rozdziale 5.2.

5.1 Analiza korelacyjna przebiegów czasowych

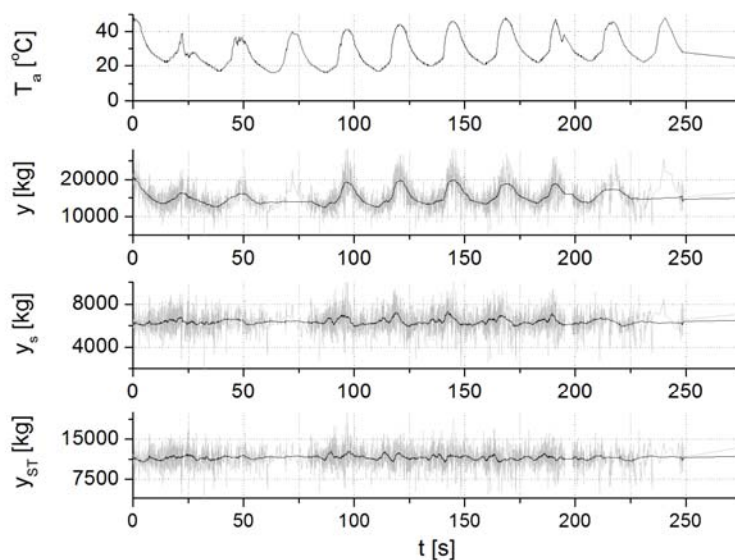
W bieżącym rozdziale przedstawiono analizę wyników ważenia pojazdów, których naciski statyczne na oś nie były znane. Badania zostały ograniczone do oceny korelacji między wynikami ważenia, a wynikami pomiaru wielkości wpływowych (temperatura asfaltu), gdyż ocena dokładności systemu WIM w takiej sytuacji nie jest możliwa.

Na rysunku 5.1 przedstawiono zmienność temperatury asfaltu, jako głównego czynnika wywołującego niestacjonarność systemu, estymatę współczynnika kalibracji C wyznaczoną zmodyfikowanym rekurencyjnym algorytmem LS, oraz zmienność współczynnika korekcji temperaturowej C_T . Widać wyraźnie, że charakter zmian temperatury asfaltu przenosi się na zmienność współczynnika kalibracji C i współczynnika korekcji temperaturowej C_T . Temperatura asfaltu, a tym samym współczynnik C_T , zostały zarejestrowane (wyznaczone), dla każdego pojazdu przejeżdżającego przez stanowisko ważące. Współczynnik kalibracji jest natomiast wyznaczany tylko w momencie przejazdu przez stanowisko pojazdu odniesienia. Tłumaczy to większą „dyskretyzację” zmienności C , w funkcji czasu.



Rys. 5.1 Zmienność T_a , C , C_T w czasie

Obydwa współczynniki, tj. C oraz C_T , można uznać za miarę niestacjonarności systemu WIM, przy czym współczynnik kalibracji C jest funkcją wszystkich czynników wywołujących tę niestacjonarność, natomiast współczynnik korekcji temperaturowej C_T , zależy wyłącznie od temperatury asfaltu. Na kolejnym rysunku, na tle zmian T_a , przedstawiono zmienność nacisku I-szej osi pojazdów odniesienia dla niekalibrowanych wyników ważenia (y), wyników w systemie z autokalibracją (y_s) i dla wyników po korekcji temperaturowej (y_{ST}). Wartości średnie y_s i y_{ST} różnią się znacznie, gdyż wyniki ważenia w systemie z korekcją temperaturową nie były poddane wstępnej kalibracji (brak znajomości nacisków statycznych).



Rys. 5.2 Zmienność T_a , y , y_s i y_{ST} w czasie

Przebiegi z rysunku 5.2 są analogiczne do tych wyznaczonych na drodze badań symulacyjnych i umieszczonych na rysunku 4.19. Zmienność niekorygowanych wyników ważenia, wynika z niestacjonarności systemu WIM. Zjawisko to jest zdecydowanie ograniczone po zastosowaniu algorytmu autokalibracji i korekcji temperaturowej co znajduje odzwierciedlenie w wyznaczonej macierzy kowariancji (tabela 5.1).

Tabela 5.1 Macierz kowariancji

	T_a	y	y_s	y_{ST}
T_a	1.00	0.95	0.25	-0.05
y		1.00	0.28	0.11
y_s			1.00	0.27
y_{ST}				1.00

Niemal pełna korelacja występuje pomiędzy temperaturą asfaltu (T_a), a wynikami ważenia uzyskanymi bezpośrednio z systemu WIM (y). Po zastosowaniu procedury autokalibracji (y_s) korelacja zmniejszyła się niemal czterokrotnie, a korekcja temperaturowa (y_{ST}) sprowadziła tę korelację prawie do zera. Potwierdza to skuteczność obydwu metod w eliminacji wpływu niestacjonarności na uzyskiwane wyniki ważenia. Należy zauważyć, że dla wybranego fragmentu rejestracji wyników ważenia, metoda korekcji temperaturowej jest bardziej skuteczna w eliminacji wpływu niestacjonarności na uzyskane wyniki niż metoda autokalibracji. Mając jednak w pamięci rezultaty badań symulacyjnych, faktu tego nie należy uogólniać na każdy możliwy przypadek, a w szczególności nie należy utożsamiać z dużą dokładnością metody korekcji, gdyż ta silnie zależy od dokładności wyznaczenia współczynnika kalibracji C_0 .

5.2 Ocena dokładności systemu WIM

Ocena dokładności systemu WIM polega na porównaniu wyników ważenia pojazdów z systemu WIM z wynikami ważenia tych samych pojazdów, które uzyskano na wadze statycznej. Wielkościami odniesienia w takim procesie są masy całkowite oraz naciski statyczne poszczególnych osi wyznaczone za pomocą wag statycznych posiadających świadectwo legalizacji. Eksperyment polegający na wykorzystaniu pojazdów wstępnie zważonych do oceny dokładności systemu WIM w Gardawicach przeprowadzono w lipcu 2008 roku. Na pojazdy wstępnie zważone wybrano trzy zespoły 5-osiowych pojazdów ciężarowych (2-osiowy ciągnik siodłowy z 3-osiową naczepą). Dwa z nich były marki Volvo a jeden marki Scania. Wszystkie pojazdy posiadały zawieszenie pneumatyczne i były w dobrym stanie technicznym.

5.2.1 Wyniki ważenia statycznego

Masy całkowite pojazdów zmierzono przy użyciu nieautomatycznej wagi platformowej typu HM-WS/50 o klasie dokładności 3, zakresie pomiarowym 50 000 kg i działce elementarnej 20kg. Waga posiadała świadectwo Okręgowego Urzędu Miar w Krakowie nr 237.261-2008. Wyniki pomiaru przedstawiono w tabeli 5.2. Zgodnie z zaleceniami raportu COST323, masy całkowite pojazdów zostały dobrane w taki sposób aby reprezentowały pojazd niezaladowany, zaladowany częściowo i w pełni zaladowany.

Tabela 5.2 Masy całkowite pojazdów

Numer pojazdu	Wynik pomiaru masy całkowitej [kg]
Pojazd 1	19 980
Pojazd 2	26 840
Pojazd 3	35 860

Statycznych nacisków osi nie można mierzyć bezpośrednio (OIML), lecz należy je estymować na podstawie wielokrotnego, statycznego ważenia każdej osi pojazdu. Wtedy, ocenę nacisku statycznego j -tej osi Ps_j wylicza się według zależności (5.1).

$$Ps_j = Ps \frac{\sum_{i=1}^n P_{ji}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k P_{ji}} \quad (5.1)$$

gdzie:

- n – liczba powtórzeń pomiaru nacisku każdej osi pojazdu,
- P_{ji} – wynik pomiaru nacisku j -tej osi w i -tym pomiarze,
- k – liczba osi pojazdu,
- Ps – masa całkowita pojazdu zmierzona na wadze platformowej.

Do oceny nacisku statycznego osi pojazdów wykorzystano wagi wykonane w klasie dokładności 4 o działce elementarnej równej 50 kg i zakresie pomiarowym 10000 kg. Pomiar nacisków poszczególnych osi został przeprowadzony metodą „oś po oś”, a liczba powtórzeń n dla poszczególnych pojazdów wyniosła:

- $n=4$ dla pojazdu 1,
- $n=3$ dla pojazdu 2,
- $n=5$ dla pojazdu 3.

Wyniki statycznego ważenia nacisków osi poszczególnych pojazdów dla kolejnych powtórzeń pomiaru zawarto w tabelach 5.3 do 5.5. W tabeli 5.6 umieszczono wyniki obliczone zgodnie z zależnością (5.1).

Tabela 5.3 Wyniki statycznego pomiaru nacisków osi pojazdu nr 1

Nr osi	Numer ważenia							
	1		2		3		4	
	Lewa [kg]	Prawa [kg]	Lewa [kg]	Prawa [kg]	Lewa [kg]	Prawa [kg]	Lewa [kg]	Prawa [kg]
I	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3050
	6000		6000		6000		6050	
II	2650	2700	2650	2700	2650	2750	2650	2700
	5350		5350		5400		5350	
III	1200	1600	1250	1600	1200	1600	1200	1600
	2800		2850		2800		2800	
IV	1300	1550	1300	1550	1300	1550	1300	1550
	2850		2850		2850		2850	
V	1400	1400	1450	1400	1450	1400	1450	1400
	2800		2850		2850		2850	
Σ	19 800		19 900		19 900		19 900	

Tabela 5.4 Wyniki statycznego pomiaru nacisków osi pojazdu nr 2

Nr osi	Numer ważenia					
	1		2		3	
	Lewa [kg]	Prawa [kg]	Lewa [kg]	Prawa [kg]	Lewa [kg]	Prawa [kg]
I	3450	3150	3450	3150	3450	3100
	6600		6600		6550	
II	4200	3650	4150	3650	4200	3600
	7850		7800		7800	
III	1750	2150	1800	2150	1750	2150
	3900		3950		3900	
IV	1650	2500	1650	2500	1650	2500
	4150		4150		4150	
V	1500	2650	1450	2650	1450	2650
	4150		4100		4100	
Σ	26 650		26 600		26 500	

Tabela 5.5 Wyniki statycznego pomiaru nacisków osi pojazdu nr 3

Nr osi	Numer ważenia									
	1		2		3		4		5	
	Lewa [kg]	Prawa [kg]	Lewa [kg]	Prawa [kg]	Lewa [kg]	Prawa [kg]	Lewa [kg]	Prawa [kg]	Lewa [kg]	Prawa [kg]
I	3400	3350	3450	3400	3450	3400	3450	3350	3450	3350
	6750		6850		6850		6800		6800	
II	3900	4450	3850	4400	3850	4350	3800	4450	3900	4400
	8350		8250		8200		8250		8300	
III	3350	3350	3200	3250	3400	3350	3250	3150	3250	3150
	6700		6450		6750		6400		6400	
IV	3350	3550	3450	3650	3450	3600	3400	3550	3450	3550
	6900		7100		7050		6950		7000	
V	3100	3800	3150	3800	3100	3800	3150	3800	3150	3800
	6900		6950		6900		6950		6950	
Σ	35 600		35 600		35 750		35 350		35 450	

Tabela 5.6 Wyniki statycznego pomiaru nacisków osi oraz masy całkowitej pojazdów nr 1, 2, 3

Numer pojazdu	Wynik pomiaru masy całkowitej Ps [kg]	Ocena nacisków statycznych osi Ps _j [kg]				
		I	II	III	IV	V
Pojazd 1	19 980	6044	5391	2827	2865	2853
Pojazd 2	26 840	6647	7892	3955	4190	4156
Pojazd 3	35 860	6869	8342	6597	7061	6990

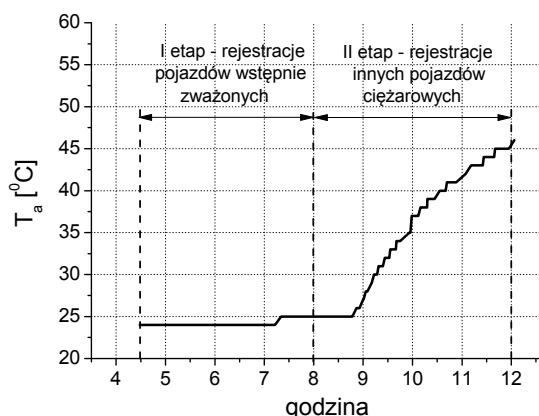
Zawarte w tabeli 5.6 wyniki ważenia statycznego należy traktować jako wartości odniesienia wykorzystywane w ocenie dokładności systemu WIM.

5.2.2 Ocena dokładności systemu WIM metodą pojazdów wstępnie zważonych

Ocena dokładności wyników ważenia z systemu WIM wyposażonego w dwa polimerowe czujniki nacisku wymaga zaplanowanego eksperymentu pomiarowego z wykorzystaniem pojazdów wstępnie zważonych. Eksperyment został przeprowadzony 2 lipca 2008 roku i polegał na wielokrotnym przejeździe takich pojazdów przez stanowisko WIM z różnymi prędkościami. Aby ocenić dokładność algorytmów korekcji w sytuacji gdy parametry systemu WIM zmieniają się w znaczny sposób, eksperyment przeprowadzono pomiędzy godziną 4:30 a 8:00 rano, gdyż podczas wschodu słońca występują największe zmiany temperatury asfaltu. W czasie 3.5 godzin trwania eksperymentu zarejestrowano łącznie 122 wyniki ważenia pojazdów wstępnie zważonych. Aby na zgromadzonych danych możliwe

było zastosowanie algorytmów autokalibracji oraz korekcji temperaturowej w systemie zapisywano również wyniki ważenia innych pojazdów pięcioosiowych (m.in. pojazdów odniesienia) przejeżdżających przez stanowisko WIM oraz temperaturę asfaltu. Niestety z powodu wyjątkowo niekorzystnych warunków atmosferycznych w tym dniu (szczególnie duże zachmurzenie), temperatura asfaltu na stanowisku ważącym do godziny 8:00 nie uległa istotnym zmianom. Ze względów logistyczno – organizacyjnych wykorzystanie pojazdów wstępnie zważonych po godzinie 8:00 nie było możliwe i o tej godzinie zakończono I etap eksperymentu. Mimo to pomiary prowadzono do godziny 12:00, rejestrując kilkaset wyników ważenia innych pojazdów ciężarowych. Przeprowadzony eksperyment można więc podzielić na dwa etapy:

- Etap I - godziny 4:30 – 8:00 – rejestracje wyników ważenia pojazdów wstępnie zważonych oraz innych pojazdów ciężarowych przejeżdżających przez stanowisko WIM. Rejestracje te wykorzystano do oceny dokładności wyników ważenia w systemie kalibrowanym w sposób klasyczny, w systemie z autokalibracją i korekcją temperaturową. Ze względu na duże zachmurzenie temperatura asfaltu w tym czasie nie ulegała dużym zmianom.
- Etap II - godziny 8:00 – 12:00 – rejestracje wyników ważenia innych pojazdów ciężarowych przejeżdżających przez stanowisko WIM. Ze względu na brak w tym czasie wyników ważenia pojazdów wstępnie zważonych ocena dokładności systemu ważącego na tym etapie została wykonana w oparciu o pomiar nacisków I-szej osi „innych” pojazdów ciężarowych przyjętych za pojazdy odniesienia. W czasie II etapu eksperymentu ze względu na roz pogodzenie temperatura asfaltu gwałtownie wzrosła. Efekt ten, jak również podział na dwa etapy rejestracji danych pomiarowych ilustruje rysunek 5.3.



Rys. 5.3 Zmienność temperatury asfaltu podczas trwania eksperymentu

Etap I

Wyniki ważenia pojazdów wstępnie zważonych poddano kalibracji klasycznej, autokalibracji oraz korekcji temperaturowej, a następnie porównano z wynikami ważenia statycznego co

pozwoiliło ocenić dokładność kaŹdej z metod. Wszystkie obliczenia wykonano „offline” na komputerze stacjonarnym, to znaczy po zakończenu eksperymentu pomiarowego i zapisaniu danych na dysku. Ideę klasycznej metody kalibracji, autokalibracji oraz korekcji temperaturowej przedstawiono szczególowo w rozdziałach 2.6.1, 4.1 oraz 4.2. Poniżej w skrócie opisano zastosowanie tych metod w przeprowadzonym eksperymencie.

- **Kalibracja klasyczna**

Kalibrację wyników waŹenia metodą „klasyczną” wykonano zgodnie z procedurą opisaną w rozdziale 2.6.1. Do obliczenia współczynnika kalibracji wykorzystano estymator (5.2), który został wyznaczony przy założeniu minimalizacji błędu średniokwadratowego wyników waŹenia (Gajda, Sroka i Źegleń 2007):

$$C = \frac{\sum_{k=1}^K N_k \cdot (Ps_k)^2}{\sum_{k=1}^K \left(Ps_k \cdot \sum_{i=1}^{N_k} y_{i,k} \right)} \quad (5.2)$$

gdzie:

N_k – liczba przejazdów k -tego pojazdu,

Ps_k – masa całkowita k -tego pojazdu zmierzona na wadze platformowej,

$y_{i,k}$ – wynik waŹenia k -tego pojazdu w i -tym przejeździe przez stanowisko WIM.

Do obliczenia współczynnika kalibracji wykorzystano wyniki waŹenia wszystkich pojazdów wstępnie zwaŹonych, które zostały zarejestrowane w systemie. Dla badanego stanowiska WIM współczynnik kalibracji wyniósł $C=0.739$.

- **Autokalibracja**

Podstawą aktualizacji współczynnika kalibracji były wyniki waŹenia I-szej osi pojazdów odniesienia, które przejechały przez stanowisko WIM w trakcie trwania eksperymentu. Kalibracja wyników waŹenia pojazdów wstępnie zwaŹonych następowała zgodnie z aktualnie wyznaczoną estymatą.

- **Korekcja temperaturowa**

Ciągły pomiar temperatury asfaltu, umożliwił zastosowanie metody korekcji temperaturowej. Współczynnik korekcji C_T obliczono w oparciu o model (4.11), który obowiązuje w szerokim zakresie temperatur. Za współczynnik C_0 przyjęto współczynnik kalibracji wyznaczony metoda klasyczną. KaŹdy wynik waŹenia pojazdów wstępnie zwaŹonych został skorygowany z uwzględnieniem zmian temperatury asfaltu T_a .

Za kryterium oceny dokładności systemu WIM, podobnie jak w badaniach symulacyjnych przyjęto skuteczny błąd względny wyników ważenia:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - Ps_i}{Ps_i} \right)^2} \quad (5.3)$$

gdzie:

N – liczba wykonanych pomiarów,

y_i – i -ty wynik ważenia danej osi pojazdu (lub masy całkowitej) z systemu WIM,

Ps_i – i -ty statyczny wynik ważenia danej osi pojazdu (lub masy całkowitej).

Dodatkowo, celem zobrazowania prawdopodobieństwa wystąpienia określonej wartości błędu względnego wyników ważenia wyznaczono charakterystykę niezawodności (Burnos, Gajda, i inni, Accurate Weighing of Moving Vehicles 2007) zdefiniowaną zależnością (5.4)

$$\Pr(\gamma) = 1 - P(\gamma) \quad (5.4)$$

gdzie:

$\gamma = \left| \frac{y_i - Ps_i}{Ps_i} \right|$ – bezwzględna wartość względnego błędu ważenia,

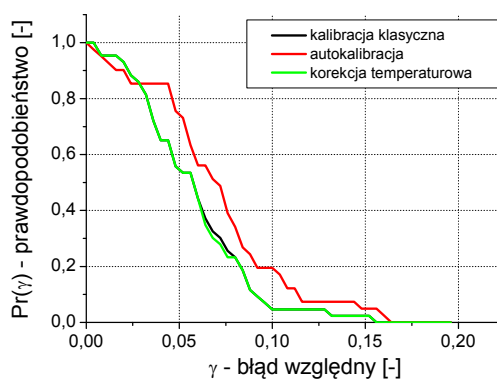
$P(\gamma)$ – dystrybucja błędów γ .

Dokładność ważenia każdego pojazdu oceniono indywidualnie, wyznaczając charakterystyki (5.3) i (5.4) dla każdej osi oraz masy całkowitej. Symbole δ_{klas} , δ_{auto} , δ_{kor} oznaczają odpowiednio skuteczny błąd względny (5.3) wyznaczony dla wyników ważenia w systemie kalibrowanym metodą klasyczną, w systemie z autokalibracją i korekcją temperaturową. Wyniki dla pojazdu numer 1 zawarto w tabeli 5.7.

Tabela 5.7 Ocena dokładności wyników ważenia dla pojazdu numer 1

Pojazd 1	Wynik ważenia statycznego [kg]	δ_{klas} [%]	δ_{auto} [%]	δ_{kor} [%]
I oś	6044	6.9	8.7	6.9
II oś	5391	9.3	11.0	9.3
III oś	2827	8.4	7.9	8.3
IV oś	2865	7.7	7.9	7.6
V oś	2853	7.8	8.1	7.8
masa całkowita	19 980	6.5	7.9	6.4

Dokładność wyników ważenia pojazdu numer 1 z systemu kalibrowanego w sposób klasyczny oraz z systemu z korekcją temperaturową jest niemal taka sama. Zbieżność ta wynika z dwóch przyczyn. Po pierwsze potwierdza się zaobserwowana w badaniach symulacyjnych zależność dokładności metody korekcji temperaturowej od dokładności wyznaczenia współczynnika kalibracji systemu. Jeżeli dokładność wyznaczenia współczynnika C_0 jest mała, to ma ona decydujący wpływ na dokładność metody korekcji temperaturowej. Po drugie należy pamiętać, że na tym etapie eksperymentu temperatura asfaltu nie ulegała istotnym zmianom, a tym samym wprowadzona korekcja wyników ważenia nie była duża. Pod względem ilościowym, otrzymane rezultaty należy uznać za satysfakcjonujące. Skuteczny błąd względny wyników ważenia wszystkich osi pojazdu numer 1 nie przekroczył 10 %, a dokładność wyznaczenia masy całkowitej wyniosła 6.45%. Na tym tle niewiele gorzej wypada dokładność wyników w systemie z autokalibracją. Dokładność ważenia po autokalibracji jest średnio o 1.5% gorsza niż w metodzie korekcji i tylko w przypadku II osi przekracza barierę 11 %. Rysunek 5.4 przedstawia charakterystykę (5.4) błędu względnego γ wyznaczenia masy całkowitej pojazdu numer 1, dla trzech badanych metod.



Rys. 5.4 Charakterystyka niezawodności – pojazd 1, masa całkowita

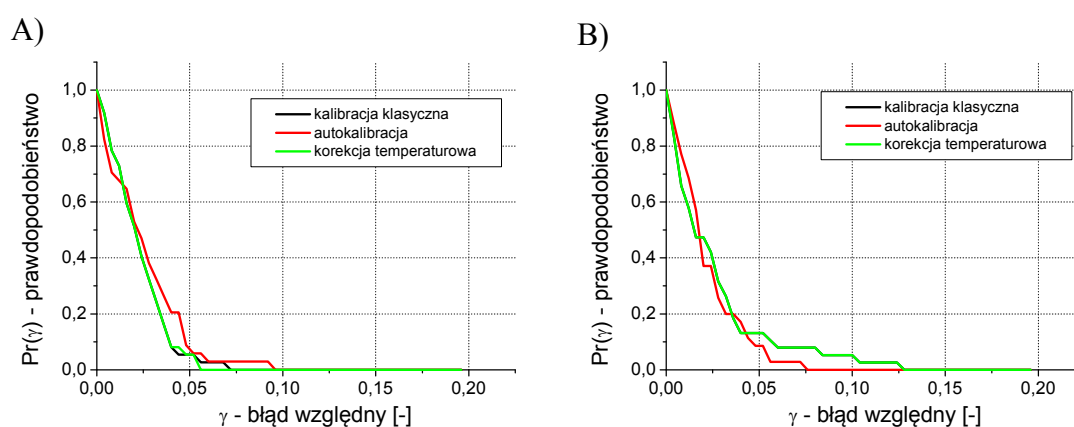
Ze względu na zbliżone wartości błędów względnych dla metody kalibracji klasycznej i korekcji temperaturowej, charakterystyki niezawodności tych metod pokrywają się. Z powyższego rysunku wynika, że prawdopodobieństwo wystąpienia błędu względnego o wartości większej niż 0.05 dla metody kalibracji klasycznej i korekcji temperaturowej wynosi 0.55, a dla metody autokalibracji 0.75. Jednocześnie żaden pojazd w systemie poddanym korekcji temperaturowej nie został zważony z błędem względnym większym niż 0.15, a w metodzie autokalibracji z błędem większym niż 0.16. Kolejne tabele i rysunki zawierają analogiczne wyniki dla pojazdu numer 2 i 3.

Tabela 5.8 Ocena dokładności wyników ważenia dla pojazdu numer 2

Pojazd 1	Wynik ważenia statycznego [kg]	δ_{klas} [%]	δ_{auto} [%]	δ_{kor} [%]
I oś	6647	10.1	10.3	10.1
II oś	7892	5.3	6.7	5.3
III oś	3955	16.1	13.4	16.1
IV oś	4190	6.7	5.2	6.6
V oś	4156	3.4	4.0	3.4
masa całkowita	26840	2.7	3.2	2.6

Tabela 5.9 Ocena dokładności wyników ważenia dla pojazdu numer 3

Pojazd 1	Wynik ważenia statycznego [kg]	δ_{klas} [%]	δ_{auto} [%]	δ_{kor} [%]
I oś	6869	4.9	5.8	4.9
II oś	8342	7.4	7.5	7.4
III oś	6597	5.3	3.4	5.3
IV oś	7061	3.0	3.4	3.0
V oś	6990	8.7	6.2	8.7
masa całkowita	35860	3.7	2.7	3.7

**Rys. 5.5** Charakterystyka wiarygodności – A) pojazd 2, B) pojazd 3

Analiza dokładności wyników ważenia dla pojazdu numer 2 i 3, prowadzi do podobnych wniosków jak dla pojazdu numer 1. Zauważalny jest natomiast trend polegający na tym, że wraz ze wzrostem masy całkowitej pojazdu, dokładność metody autokalibracji zwiększa się i dla pojazdu numer 3, który był najcięższy, dokładność wyznaczenia masy całkowitej w systemie z autokalibracją jest lepsza niż w systemie z korekcją temperaturową. Nieco inaczej wygląda sytuacja w przypadku oceny dokładności wyników ważenia poszczególnych osi badanych pojazdów, gdyż nie da się jednoznacznie stwierdzić, która z analizowanych metod daje najlepsze rezultaty. Wyniki ważenia osi pojazdu numer 1 (najlżejszy), są najdokładniejsze w systemie z korekcją temperaturową. W przypadku pojazdu numer 2, oś trzecia i czwarta są dokładniej ważone w systemie z autokalibracją niż w systemie z korekcją

temperaturową. Natomiast w przypadku pojazdu numer 3 (najcięższy) w systemie z autokalibracją dokładniej ważone są osie trzecia i piąta, a dokładność pomiaru nacisków pozostałych osi jest zbliżona dla obydwu metod. Poniżej przedstawiono ocenę dokładności wyników ważenia, obliczoną łącznie dla wszystkich pojazdów wstępnie zważonych biorących udział w teście (tab. 5.10) i dla dwóch pojazdów najcięższych (tab. 5.11).

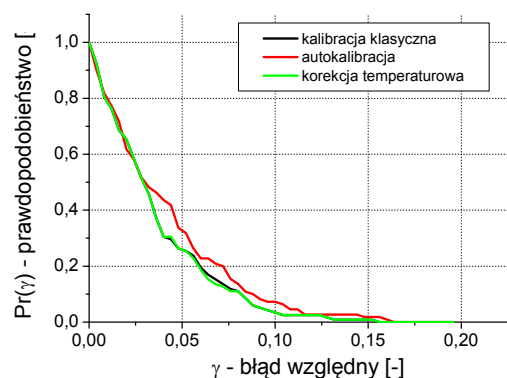
Tabela 5.10 Ocena dokładności wyników ważenia łącznie dla pojazdów 1,2,3

Pojazd 1	Wynik ważenia statycznego [kg]	δ_{klas} [%]	δ_{auto} [%]	δ_{kor} [%]
I oś	-	7.5	8.5	7.5
II oś	-	7.6	8.8	7.6
III oś	-	10.8	9.1	10.7
IV oś	-	6.2	5.9	6.1
V oś	-	7.1	6.4	7.1
masa całkowita	-	4.7	5.4	4.7

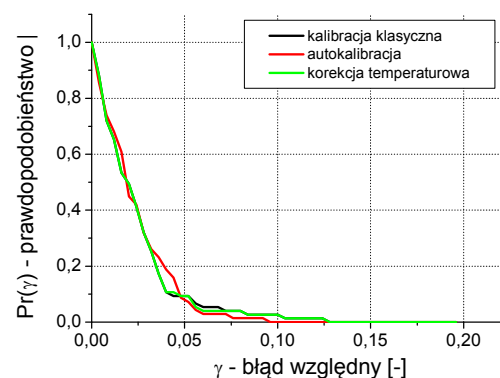
Tabela 5.11 Ocena dokładności wyników ważenia łącznie dla pojazdów 2,3

Pojazd 1	Wynik ważenia statycznego [kg]	δ_{klas} [%]	δ_{auto} [%]	δ_{kor} [%]
I oś	-	7.9	8.4	7.9
II oś	-	6.5	7.1	6.5
III oś	-	11.9	9.7	11.9
IV oś	-	5.2	4.4	5.1
V oś	-	6.6	5.2	6.6
masa całkowita	-	3.3	3.0	3.2

A)



B)



Rys. 5.6 Charakterystyka wiarygodności – A) pojazdy 1, 2, 3, B) pojazdy 2, 3

Otrzymane rezultaty wskazują na porównywalną dokładność wyników ważenia z systemu kalibrowanego w sposób klasyczny, z systemu z autokalibracją i korekcją temperaturową. Należy jednak pamiętać, że w trakcie trwania tego etapu eksperymentu temperatura asfaltu nie zmieniała się, trudno więc uogólniać wnioski na przypadek systemu niestacjonarnego.

Wyniki dowiodły jednak ponad wszelką wątpliwość użyteczność metody autokalibracji jako alternatywy dla klasycznej metody kalibracji systemów WIM. Bez konieczności kosztownej i czasochłonnej procedury wynajęcia pojazdów wstępnie zważonych można w prosty i ciągły sposób kalibrować system WIM, sprowadzając dokładność wyników ważenia do poziomu około 5% (dla pojazdów najcięższych 3.0%).

Dokładność ważenia zależy jednak od jakości nawierzchni w miejscu zainstalowania czujników nacisku (pionowych wahań pojazdów) i na stanowiskach WIM o gorszej jakości drogi dokładność ważenia może być mniejsza niż ta otrzymana na stanowisku w Gardawicach.

Etap II

W godzinach od 4:30 do 12:00 na stanowisku WIM zarejestrowano kilkaset wyników ważenia pojazdów pięcioosiowych. Dla odróżnienia tych pojazdów od wstępnie zważonych dalej będą one nazywane „innymi” pojazdami ciężarowymi. W zbiorze innych pojazdów ciężarowych znalazło się również kilkadziesiąt pojazdów odniesienia co umożliwiło zastosowanie procedury autokalibracji. Z oczywistych względów naciski statyczne osi innych pojazdów ciężarowych nie były znane, zaproponowano więc alternatywny sposób oceny dokładności systemu w II etapie eksperymentu:

- wyniki ważenia innych pojazdów ciężarowych skalibrowano metodą klasyczną, wykorzystując wyznaczony w I etapie współczynnik kalibracji,
- obliczono wartość średnią skalibrowanych wyników ważenia I-szej osi innych pojazdów ciężarowych w I-szym etapie eksperymentu. Ponieważ w okresie tym temperatura asfaltu nie ulegała zmianom, a system był stacjonarny to obliczona wartość średnia może posłużyć za wielkość odniesienia i być wykorzystana do oceny dokładności systemu w okresach późniejszych,
- rejestracje wyników ważenia innych pojazdów ciężarowych wykonane w II-gim etapie eksperymentu (system niestacjonarny) poddano kalibracji klasycznej, autokalibracji i korekcji temperaturowej. Uzyskane w ten sposób wyniki ważenia I-szej osi porównano z wyznaczoną w I-szym etapie wielkością odniesienia.

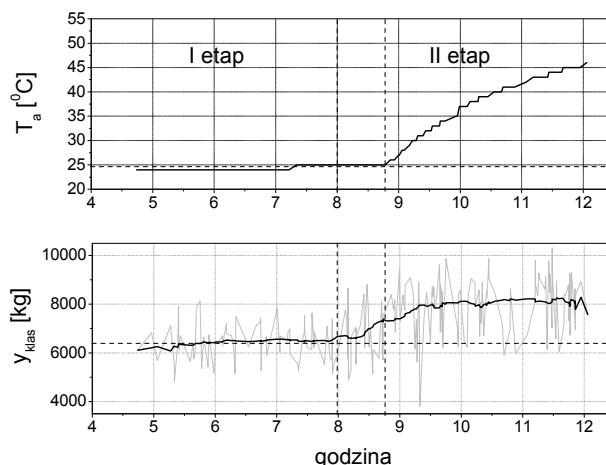
Metoda ta umożliwia więc zgrubną ocenę dokładności systemu WIM w sytuacji gdy statyczne naciski osi ważonych pojazdów nie są znane.

Sposób ten ma jednak zasadniczą wadę polegającą na tym, że końcowy wyniki oceny dokładności systemu WIM jest obarczony skumulowanymi błędami wynikającymi z:

- użycia wartości średniej wyników ważenia I-szej osi pojazdów ciężarowych za wielkość odniesienia zamiast nacisków statycznych wyznaczonych na wagach stacjonarnych,
- niedokładności kalibracji wyników ważenia, na podstawie których wyznaczana jest wielkość odniesienia,
- faktu, że każdy pojazd przejeżdża przez stanowisko ważące tylko raz (brak ograniczenia losowej zmienności nacisku dla danego pojazdu).

Ocenę ilościową (bezwzględną) wyników uzyskanych w II etapie eksperymentu należy więc traktować z rozsądnym dystansem, skupiając się raczej na ocenie jakościowej polegającej na porównaniu wyników między sobą (względnie).

Na poniższym rysunku na tle zmian temperatury asfaltu T_a , przedstawiono zmienność nacisku wyników ważenia I-szej osi innych pojazdów ciężarowych y_{klas} . Poziomą linią przerywaną zaznaczono wartość średnią nacisku wyznaczoną w I-szym etapie eksperymentu (6429 kg).



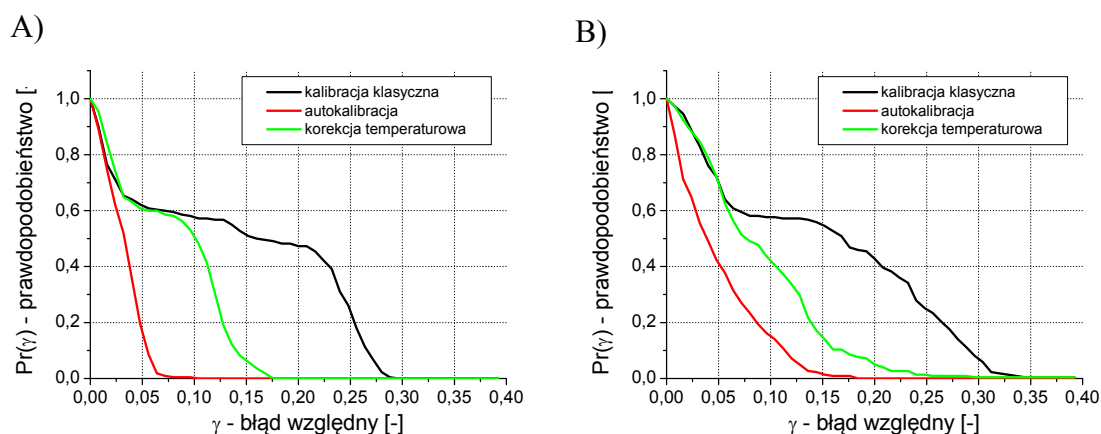
Rys. 5.7 Zmienność temperatury asfaltu oraz nacisku I-szej osi innych pojazdów ciężarowych podczas trwania eksperymentu

Z rysunku 5.7 wynika, że temperatura asfaltu w miejscu zainstalowania czujnika temperatury, jest inna niż w miejscu zainstalowania czujników nacisku. Nacisk I-szej osi pojazdów ciężarowych w skutek niestacjonarności systemu zaczyna rosnąć wcześniej (godz. 8:00) niż zmierzona przez czujnik temperatura asfaltu (godz. 8:45), co może mieć wpływ na dokładność metody korekcji temperaturowej. Wy tłumaczeniem tego zjawiska jest inne miejsce i głębokość zainstalowania czujnika temperatury niż czujników nacisku.

Tabela 5.12 zawiera ocenę dokładności wyników ważenia w II-gim etapie eksperymentu w systemie kalibrowanym metodą klasyczną, w systemie z autokalibracją i korekcją temperaturową. Na rysunku 5.8 przedstawiono charakterystykę niezawodności dla wyników ważenia I-szej osi oraz masy całkowitej innych pojazdów ciężarowych.

Tabela 5.12 Ocena dokładności wyników ważenia innych pojazdów ciężarowych – II etap

Pojazd 1	Wynik ważenia statycznego [kg]	δ_{klas} [%]	δ_{auto} [%]	δ_{kor} [%]
I oś	-	18.0	3.6	9.6
II oś	-	14.9	7.9	7.8
III oś	-	21.5	8.0	13.6
IV oś	-	22.0	8.8	14.2
V oś	-	22.7	9.1	14.9
masa całkowita	-	19.1	6.7	11.2

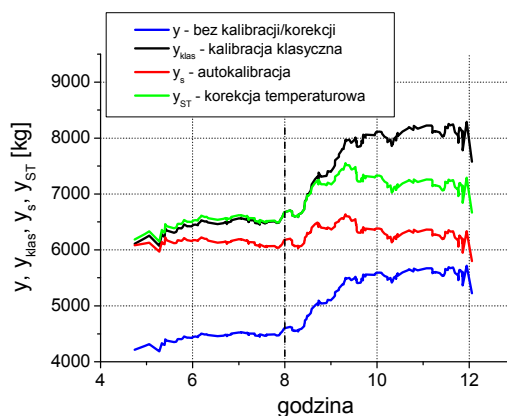


Rys. 5.8 Charakterystyka wiarygodności dla wyników ważenia **A)** I-szej osi, **B)** masy całkowitej innych pojazdów ciężarowych.

W I-szym etapie eksperymentu, gdy temperatura asfaltu nie zmieniała się, a system był stacjonarny, wszystkie metody kalibracji/korekcji cechowała zbliżona dokładność.

W II-gim etapie, gdy temperatura asfaltu wzrosła o 20 °C, a system był niestacjonarny, wyraźnie uwidacznia się przewaga metody autokalibracji i korekcji temperaturowej nad klasyczną metodą kalibracji systemów WIM. Zdecydowanie najdokładniejsze wyniki ważenia I-szej osi innych pojazdów ciężarowych uzyskano w systemie z autokalibracją (3.6%), a następnie z korekcją temperaturową (9.6%). Metoda kalibracji klasycznej dla systemu niestacjonarnego nie sprawdza się, a dokładność wyników ważenia w tej metodzie jest pięciokrotnie gorsza (18.0%) niż w przypadku autokalibracji.

Na rysunku 5.9 przedstawiono uśrednione wyniki ważenia (średnia ruchoma) I-szej osi innych pojazdów ciężarowych bez kalibracji (y), po kalibracji klasycznej (y_{klas}), po autokalibracji (y_s) i po korekcji temperaturowej (y_{ST}). Tabela 5.13 zawiera macierz kowariancji wyznaczoną dla tych wielkości.



Rys. 5.9 Zmienność wyników ważenia w czasie

Tabela 5.13 Macierz kowariancji

	T_a	y	y_{klas}	y_s	y_{ST}
T_a	1.00	0.87	0.87	0.17	0.62
y	0.87	1.00	1.00	0.57	0.91
y_{klas}	0.87	1.00	1.00	0.57	0.91
y_s	0.17	0.57	0.57	1.00	0.82
y_{ST}	0.62	0.91	0.91	0.82	1.00

Do skalibrowanych metodą klasyczną wyników ważenia nie jest wnoszona żadna korekta względem temperatury – stąd współczynnik korelacji między wynikami z systemu kalibrowanego w sposób klasyczny a systemu bez jakiegokolwiek korekty wynosi 1. Wyniki ważenia po korekcji temperaturowej, również cechuje duża korelacja z wynikami bez korekty. Mała efektywność metody korekcji temperaturowej może wynikać z błędnego pomiaru temperatury – czujnik temperatury jest zainstalowany w innym miejscu niż czujniki nacisku. Autokalibracja, choć nie kompensuje w pełni wpływu niestacjonarności systemu na wyniki ważenia, to daje zdecydowanie najlepsze rezultaty. Brak pełnej kompensacji, może wynikać z dynamiki algorytmu, oraz faktu że pojazdy odniesienia przejeżdżają przez stanowisko WIM w nieregularnych odstępach czasu.

5.3 Podsumowanie

Przedstawione w tym rozdziale wyniki badań eksperymentalnych podzielono na dwie grupy. Do pierwszej z nich należy zaliczyć analizę wyników ważenia pojazdów, których naciski statyczne na oś nie były znane. Otrzymane wyniki dowiodły jednoznacznie, że obydwie metody tj. autokalibracja i korekcja temperaturowa w istotny sposób ograniczają wpływ niestacjonarności systemu na uzyskiwane wyniki ważenia. Obliczona korelacja między wynikami ważenia w systemie z autokalibracją (korekcją temperaturową), a temperaturą asfaltu jest kilkukrotnie mniejsza niż w takim samym systemie bez algorytmów korekcji. Znajduje to odzwierciedlenie w wynikach eksperymentów z drugiej grupy, które miały na celu ocenę dokładności systemu WIM. W przypadku systemu niestacjonarnego (wzrost temperatury asfaltu o 20 °C w ciągu 3 godzin), przewaga metod autokalibracji i korekcji temperaturowej nad klasyczną metodą kalibracji systemów WIM jest bardzo wyraźna. Zwiększenie dokładności wyników ważenia o około 15% w systemie z autokalibracją i o około 10% w systemie z korekcją temperaturą względem klasycznej metody kalibracji jest ostatecznym dowodem na skuteczność tych metod w eliminacji wpływu niestacjonarności systemu WIM na dokładność wyników ważenia. Oczywiście należy zdawać sobie sprawę, że przedstawione rozważania dotyczą konkretnego stanowiska WIM wyposażonego w oryginalne rozwiązania sprzętowe zbudowane w Katedrze Metrologii AGH co ogranicza możliwość uogólnienia otrzymanych wniosków.

6. Zakończenie

W pracy zwrócono uwagę na problem ruchu pojazdów najcięższych i związane z tym zjawisko niszczenia nawierzchni drogowej, które na przestrzeni ostatnich dwudziestu lat mocno się nasiliło, pociągając za sobą konieczność skutecznej ochrony infrastruktury drogowej. W tym świetle ważenie pojazdów z wykorzystaniem wag statycznych nie jest już wystarczająco efektywne. Z drugiej strony wykorzystanie systemów WIM w tym celu jest ograniczone dużą niepewnością pomiaru. Przeprowadzona w pracy analiza danych pomiarowych z systemu WIM jednoznacznie dowiodła, że jedną z przyczyn odpowiedzialnych za dużą niepewność wyników ważenia jest niestacjonarność systemu. Zjawisko to polega na zmianie właściwości systemu w czasie w skutek zmian konsystencji asfaltu wywołanej zmianami temperatury. Jednocześnie potwierdzono brak wpływu zmian temperatury i wilgotności na układ kondycjonowania sygnałów pomiarowych.

Dzięki zastosowaniu oryginalnej metody identyfikacji niestacjonarności systemu WIM wyznaczono model współpracy czujników nacisku z nawierzchnią asfaltową dla systemu ważącego w Gardawicach. Podejście do problemu z punktu widzenia metrologii i wyznaczenie struktury modelu systemu ważącego pozwoliło na jakościowe i ilościowe opisanie zjawiska niestacjonarności. Oryginalność metody identyfikacji polega na wykorzystaniu jako wymuszenia wartości oczekiwanej nacisku I-szej osi pojazdów odniesienia, oraz sygnałów, które normalnie uznano by za zakłócające tj.: temperatury asfaltu oraz układu kondycjonowania. Dzięki temu wyznaczony model posiada stałe współczynniki $k=2.07$ i $w=0.005$. Dopasowanie wyznaczonego modelu do systemu WIM, rozumiane jako skuteczny błąd względny zdefiniowany na wynikach ważenia I-szej osi pojazdów odniesienia wyniósł 1.14% co należy uznać za bardzo dobry wynik, warunkujący uznanie modelu za wiarygodny. Z wyznaczonego modelu (jak również z charakterystyki temperaturowej stanowiska WIM w Gardawicach) wynika, że zmiana temperatury asfaltu o 30 °C, wywołuje zmianę wyników ważenia o około 40%. Z tego powodu klasyczne metody kalibracji systemów WIM, nie tylko są mało efektywne, ale wręcz bezużyteczne ze względu na zbyt małą częstotliwość kalibracji systemu. W poszukiwaniu nowych, bardziej efektywnych metod, rozwinięto ideę kalibracji metodą pojazdów odniesienia. Bazując na opracowanej przez autora automatycznej klasyfikacji pojazdów samochodowych oraz statystycznej analizie nacisków osi, na pojazdy odniesienia wybrano pięcioosiowe pojazdy członowe, w skład których wchodzi dwuosiowy ciągnik siodłowy i trzyosiowa naczepa. Wartość średnią nacisku I-szej osi tych pojazdów przyjęto za wielkość odniesienia równą $\mu_0=61.670$ kN.

Jako alternatywne metody eliminacji wpływu niestacjonarności na wyniki pomiarowe w systemach WIM zaproponowano autokalibrację systemów ważących i korekcję temperaturową wyników ważenia. Obydwie metody, w przeciwieństwie do klasycznych metod kalibracji, umożliwiają samoczynną kalibrację (korekcję) wyników ważenia, która jest realizowana w sposób ciągły przez system w trakcie jego pracy kilkadziesiąt razy w ciągu doby. Metoda autokalibracji wykorzystuje nacisk I-szej osi pojazdów odniesienia do ciągłej aktualizacji współczynnika kalibracji systemu C . Zadanie to jest realizowane przez

rekurencyjny algorytm LS z wykładniczym zapominaniem. Wprowadzona przez autora modyfikacja tego algorytmu, polegająca na uzmiennieniu wartości współczynnika zapominania od odległości czasowych między pojazdami odniesienia, pozwala na istotną poprawę dokładności estymacji współczynnika C , szczególnie w systemach mocno niestacjonarnych (nawet o 66%). Na marginesie należy zaznaczyć, że zastosowanie modyfikacji algorytmu, nie jest ograniczone do systemów WIM i z powodzeniem może być stosowane w innych zadaniach identyfikacji. Druga metoda pozwalająca ograniczyć wpływ niestacjonarności na wyniki ważenia to korekcja temperaturowa, bazująca na modelu charakterystyki temperaturowej danego stanowiska WIM. Model taki można wyznaczyć analizując wyniki ważenia I-szej osi pojazdów odniesienia w czasie gdy występują duże zmiany temperatury asfaltu. W pracy wyznaczono dwa modele charakterystyki temperaturowej, jeden fizyczny w węższym zakresie zmian temperatur i drugi przyjęty a priori w szerszym zakresie zmian temperatury asfaltu.

W pracy przeanalizowano ponadto wpływ zmiany parametrów systemu ważącego na dokładność wyników ważenia w systemie kalibrowanym w sposób klasyczny oraz w systemie z autokalibracją i korekcją temperaturową. Z przedstawionych wyników badań symulacyjnych, które oparto o wyznaczony wcześniej model systemu WIM wynika, że obydwie zaproponowane przez autora metody wnoszą istotną poprawę dokładności wyników ważenia względem klasycznej metody kalibracji systemów WIM. Na podstawie otrzymanych charakterystyk, można również wyciągnąć wnioski co do właściwości badanych metod. Istotną wadą metody korekcji temperaturowej jest wrażliwość na dokładność obliczenia wartości współczynnika C_0 oraz konieczność wyznaczenia charakterystyki temperaturowej stanowiska. Ostatni warunek jest trudny do realizacji, gdyż wymaga długookresowych rejestracji danych pomiarowych (co najmniej przez kilka miesięcy). Wad, o których mowa pozbawiona jest metoda autokalibracji, która nie wymaga żadnych wstępnych czynności w systemie ważącym. Do niewątpliwych zalet metody należy zaliczyć uniwersalność, gdyż autokalibracja może być stosowana niemal w każdym systemie ważącym nawet na drogach o złej jakości. Co istotne zastępuje uciążliwy i kosztowny proces klasycznej kalibracji stanowiska, a ponadto umożliwia zwiększenie dokładności wyników ważenia o 3% do 10% względem metody pojazdu wstępnie zważonego (wg wyników symulacji).

Wyniki badań eksperymentalnych, które przedstawiono w rozdziale piątym, były najistotniejsze z punktu widzenia udowodnienia postawionych w pracy tez. Przede wszystkim dowiedziono, że metoda autokalibracji może zastąpić klasyczne metody kalibracji systemów WIM, a dzięki ciągłej aktualizacji współczynnika C błędy wyników ważenia nie przekraczają (średnio) 5%. Ponadto obydwie opracowane przez autora metody, w przypadku systemu niestacjonarnego (II-gi etap badań eksperymentalnych) pozwalają na zwiększenie dokładności ważenia w stosunku do systemu kalibrowanego w sposób klasyczny. Względem metody pojazdów wstępnie zważonych, metoda korekcji temperaturowej pozwala na niemal dwukrotne, a metoda autokalibracji na niemal sześciokrotne zwiększenie dokładności. Wyniki te potwierdzają postawione na wstępie pracy tezy, mówiące o tym, że obydwie metody umożliwiają skuteczną, bieżącą korekcję wyników ważenia, a tym samym eliminację wpływu niestacjonarności na dokładność uzyskiwanych wyników ważenia.

DODATEK A – Automatyczna Klasyfikacja Pojazdów ALT

A1. Przegląd istniejących schematów klasyfikacji.

Ważenie pojazdów, a w szczególności automatyczna realizacja tego zadania przez systemy WIM wymaga równolegle jednoznacznej klasyfikacji pojazdu ważonego ze względu na jego rodzaj, oraz charakterystykę podwozia. Potrzeba ta wynika z uregulowań prawnych, które określają dopuszczalne naciski na oś w zależności od ich konfiguracji i odległości między nimi.

Dotychczasowe działania w tym kierunku doprowadziły do powstania kilku różnych schematów klasyfikacji oraz algorytmów klasyfikacji automatycznej. Schematy te różnią się liczbą kategorii pojazdów, które wyłoniono głównie w oparciu o cechy użytkowe i masy całkowite, ignorując często charakterystykę podwozia. Informacja o liczbie i odległościach między osiami jest wykorzystywana jedynie przez algorytmy klasyfikacji automatycznej.

W zastosowaniu praktycznym funkcjonuje co najmniej kilka schematów klasyfikacji pojazdów oraz duża liczba specyficznych metod tworzonych na zamówienie końcowego odbiorcy. Do najpopularniejszych należy zaliczyć amerykańską klasyfikację FHWA (FHWA 2009) oraz europejskie EURO-13 i COST 323 (COST 323 1999). Rozwiązanie zaproponowane w sprawozdaniu COST 323 jest najmniej selektywne i liczy tylko 8 kategorii pojazdów: jedną samochodów osobowych, jedną autobusów oraz 5 kategorii pojazdów ciężarowych. Na przykład, do jednej grupy zaliczono ciągniki siodłowe dwu jak i trzy osiowe z naczepami jedno lub dwu osiowymi. Klasyfikacja EURO-13 jest bardziej szczegółowa, a daną kategorię reprezentują pojazdy o zbliżonych gabarytach i masie całkowitej. Zignorowano jednak podział ze względu na rodzaj podwozia co uniemożliwia wykorzystanie tego schematu w praktyce. Najbardziej selektywna z punktu widzenia konfiguracji osi wydaje się być klasyfikacja FHWA. Pojazdy dwuosiowe rozróżniono na osobowe, dostawcze i ciężarowe, a trzyosiowe pojedyncze oddzielono od zespołu pojazdów. Podziału pojazdów członowych dokonano jednak w sposób uniemożliwiający ich jednoznaczną klasyfikację, co więcej schemat ten obejmuje również pojazdy nie spotykane na drogach w Polsce i Europie.

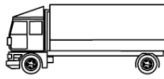
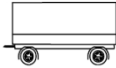
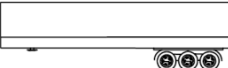
Mając na uwadze, że sylwetki samochodów różnicuje nie tylko przeznaczenie użytkowe lecz przede wszystkim liczba i konfiguracja osi, należy stwierdzić iż powyższe schematy klasyfikacji nie spełniają wymogów selektywności. Zgrubny podział jest wystarczający podczas analiz parametrów ruchu drogowego, przy tworzeniu prognoz długoterminowych czy wymiarowaniu konstrukcji nawierzchni. Wolno przejazdowe wagi administracyjne, a w niedalekiej perspektywie również administracyjne systemy WIM, wymagają bardziej selektywnych i niezawodnych metod klasyfikacji automatycznej. Niestety utworzenie jednego uniwersalnego schematu klasyfikacji, który spełniałby oczekiwania różnych grup odbiorców jest trudne, a ze względu na niejednorodność pojazdów w skali makro często nie wykonalne. Na terenie Europy struktura rodzajowa ruchu samochodowego zmienia się w zależności od położenia geograficznego i jest różna w różnych krajach. Uniwersalna klasyfikacja pojazdów nie może więc mieć struktury zamkniętej i powinna charakteryzować się:

- dużą selektywnością – związaną z zastosowanym schematem klasyfikacji pojazdów,
- dużą efektywnością klasyfikacji – związaną z zastosowanym algorytmem,
- dużą elastycznością – tzn. możliwością dostosowania kategorii pojazdów do charakteru ruchu na danym obszarze.

A2. ALTERNatywna klasyfikacja pojazdów

Aby sprostać wymogom stawianym klasyfikacji pojazdów na potrzeby ważenia automatycznego autor proponuje nowe rozwiązanie bazujące na klasyfikacji ALT i algorytmie automatycznego rozpoznawania pojazdów wykorzystującym metody fuzji danych oraz zbiory rozmyte. Podstawą klasyfikacji ALT jest konfiguracja elementów składowych pojazdu (pojedynczy, członowy lub zespół pojazdów) oraz liczba i konfiguracja osi. W pierwszej kolejności wyłoniono 8 podstawowych grup elementów składowych pojazdów. Niektóre z nich mogą występować pojedynczo, np.: samochody osobowe, a niektóre tylko w konfiguracji z innymi elementami jak np. przyczepa. Każdą grupę oznaczono symbolem literowym:

Tabela 1: Podstawowa grupa elementów składowych pojazdów

Rodzaj pojazdu:	Oznaczenie kategorii:	Sylwetka:
Motocykl	M (Motorbikes)	
Samochód osobowy	C (Car)	
Samochód dostawczy	D (Delivery)	
Samochód ciężarowy	L (Lorry)	
Ciągnik siodłowy	T (Tractor)	
Przyczepa	R (Trailer)	
Naczepa	S (Semi-trailer)	
Autobus	B (Bus)	

Uzupełnienie symbolu liczbą umożliwi określenie liczby osi pojazdu. Na przykład samochód ciężarowy trzy osiowy będzie oznaczony jako 3L, a dwuosiowa przyczepa jako 2R.



Rys. 1 Oznaczenie pojazdów w zależności od liczby osi

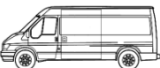
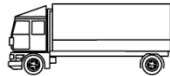
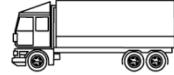
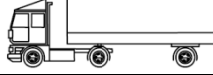
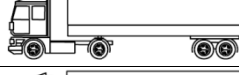
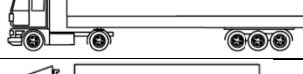
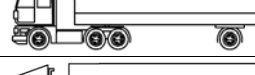
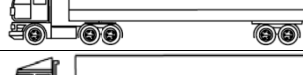
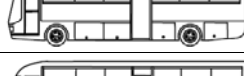
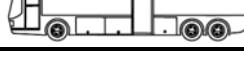
Następnie na podstawie analizy struktury rodzajowej pojazdów w Polsce, utworzono odpowiednie kombinacje elementów z tabeli 1, odpowiadające najczęściej spotykanym sylwetkom samochodów. W ten sposób są tworzone symbole odpowiadające wyróżnionym kategoriom. Dla przykładu, pojazd członowy w skład którego wchodzi dwuosiowy ciągnik siodłowy oraz trzyosiowa naczepa należy do kategorii o symbolu 2T+3S, a zespół pojazdów złożony z dwuosiowej ciężarówki i dwuosiowej przyczepy do kategorii 2L+2R. Tabela 2 (strona 125) zawiera podział na 20 najczęściej spotykanych kategorii pojazdów w Polsce.

Wyłonione kategorie w jednoznaczny sposób charakteryzują pojazd o danej konfiguracji elementów składowych oraz liczbie osi. Liczba utworzonych kategorii nie jest stała i w razie potrzeb można ją dostosować do specyfiki ruchu drogowego na danym obszarze co jest niewątpliwą zaletą metody.

A3. Systemy automatycznej klasyfikacji pojazdów

Potencjał użytkowy przedstawionych metod klasyfikacji jest wykorzystywany w procesach automatycznej klasyfikacji pojazdów. Podstawą takiego działania jest pomiar parametrów charakteryzujących pojazd, takich jak: liczba osi, ich rozstaw, długość, masa całkowita, czy profil magnetyczny, które tworzą tzw. wektor parametrów charakterystycznych. Liczba mierzonych parametrów zależy od konstrukcji i przeznaczenia systemu automatycznej klasyfikacji. Decyzja o przynależności pojazdu do odpowiedniej kategorii jest podejmowana poprzez porównanie wartości wektora charakterystycznego z wektorem będącym modelem tej kategorii. Najprostszy przypadek to podział zgrubny na pojazdy małe i duże, bazujący na pomiarze jednego parametru tj. ich długości. Zwiększenie selektywności podziału można uzyskać poprzez zwiększenie liczby parametrów. Np. w przypadku podziału ze względu na liczbę osi, lepszą selektywność uzyskuje się poprzez pomiar drugiego parametru jakim jest ich rozstaw. Proces klasyfikacji jest wtedy wieloetapowy i hierarchiczny. Po zakwalifikowaniu pojazdu do grupy o danej liczbie osi, porównuje się wartość drugiego parametru tj. ich rozstawu z przyjętym apriori modelem. Decyzja jest podejmowana na gruncie logiki klasycznej („należy” lub „nie należy”), co jak zostanie dalej wykazane jest przyczyną niskiej efektywności takich algorytmów klasyfikacji. Pomimo wad, przedstawiony algorytm znajduje szerokie zastosowanie w systemach automatycznej klasyfikacji, które wykorzystują schematy EURO-13 i FHWA.

Tabela 2: Klasyfikacja ALT pojazdów samochodowych

Rodzaj pojazdu	Numer kategorii	Symbol Kategorii	Sylwetka
pojazdy pojedyncze	1	M	
	2	2C	
zespół pojazdów	3	2C+1R	
	4	2C+2R	
pojazdy pojedyncze	5	2D	
	6	2L	
	7	3L	
	8	4L	
zespół pojazdów	9	2L+2R	
	10	2L+3R	
	11	3L+2R	
	12	3L+3R	
pojazdy członowe	13	2T+1S	
	14	2T+2S	
	15	2T+3S	
	16	3T+1S	
	17	3T+2S	
	18	3T+3S	
pojazdy pojedyncze	19	2A	
	20	3A	

A3.1 Logika klasyczna, a zbiory rozmyte.

Funkcjonując w dziedzinie logiki klasycznej, znane algorytmy klasyfikacji automatycznej bazują na definicji zbioru konwencjonalnego, który można zapisać jako zbiór par:

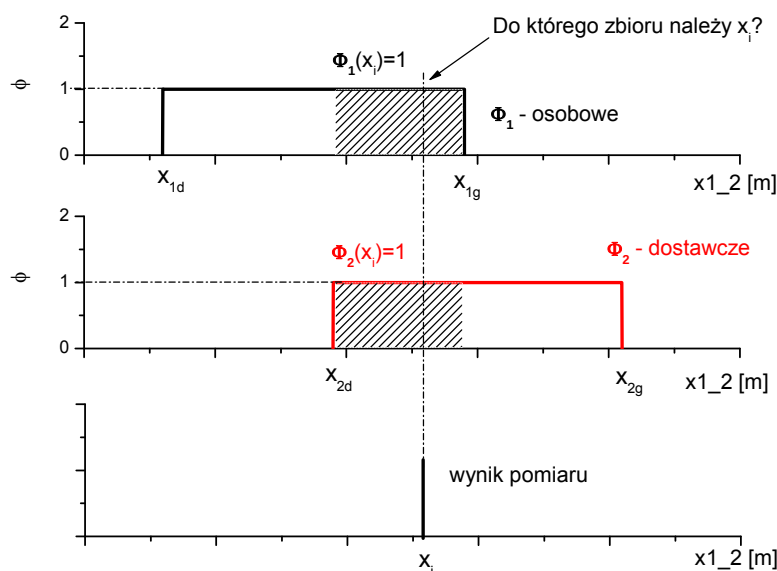
$$A = \{(x, \varphi_A(x))\} \quad (1)$$

gdzie:

$X = \{x\}$ - jest pewnym szerszym zbiorem wartości (w tym przypadku: odległość między osiami lub długość pojazdu),

$\varphi_A(x): X \rightarrow \{0,1\}$ jest zwane klasyczną funkcją przynależności, która każdemu elementowi przestrzeni X przypisuje liczbę „0” oznaczającą nieprzynależność lub „1” - przynależność.

W grupie pojazdów o tej samej liczbie osi można wyszczególnić różne typy pojazdów o zbliżonych rozstawach między osiami. Zdefiniowanie rozłącznych kryteriów klasyfikacji nie jest więc możliwe, a wnioskowanie o przynależności pojazdu do danej kategorii na bazie logiki klasycznej traci sens, co dla parametru x_{1_2} – rozstaw osi 1-2, ilustruje rysunek 2:



Rys. 2 Przykład obrazujący budowę modeli kategorii pojazdów dla prostokątnych (klasycznych) funkcji przynależności i sposób postępowania w przypadku uzyskania nowego wyniku pomiaru x_i

Wpływa to na obniżenie efektywności klasyfikacji, która w przedstawionej postaci nie przekracza 60 – 70%. Wynik na tym poziomie jest niedopuszczalny w przypadku systemów ważących, gdyż podjęcie błędnej decyzji o kategorii pojazdu może skutkować nieuzasadnionym nałożeniem kary na przewoźnika. Ponieważ nie występuje tutaj bezwzględne przyporządkowanie elementu do zbioru należy posłużyć się logiką rozmytą jako

miarą pojęć nieostrych, wieloznacznych i nieprecyzyjnych. Zbiór rozmyty B określony w X można przedstawić jako zbiór par (Kacprzyk 1986):

$$B = \{(\mu_B(x), x)\} \quad \forall x \in X \quad (2)$$

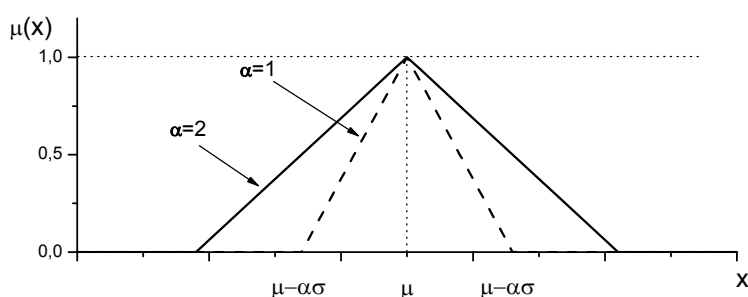
gdzie:

$X = \{x\}$ - j.w.,

$\mu_B : X \rightarrow [0,1]$ - jest funkcją przynależności, która każdemu elementowi z przestrzeni X przyporządkowuje stopień przynależności do danego zbioru rozmytego: od nieprzynależności ($\mu_B(x)=0$) przez przynależność częściową ($0 < \mu_B(x) < 1$) do całkowitej przynależności ($\mu_B(x)=1$).

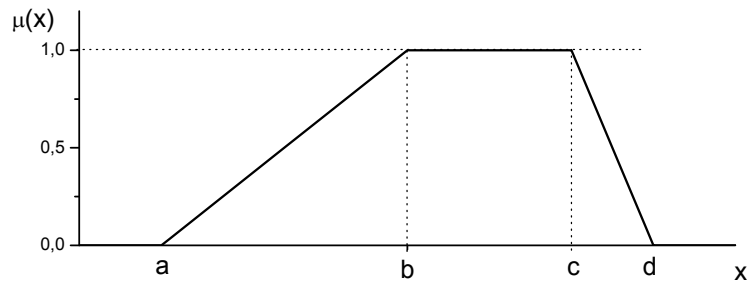
Przejście od przynależności do nieprzynależności w teorii zbiorów rozmytych nie ma więc charakteru skokowego, jak w zbiorach konwencjonalnych, ale jest stopniowe. Kształt funkcji przynależności jest uzależniony od rozpatrywanego problemu i może przyjąć postać od prostych funkcji analitycznych (funkcja trójkątna, gaussa, itp) po złożone zależności będące kombinacją wielu funkcji prostych (Mathworks). Jednocześnie nie istnieją ścisłe reguły określające wybór optymalnego kształtu tej funkcji. Postępowanie to jest bardzo subiektywne i niesformalizowane. Dla potrzeb algorytmu automatycznej klasyfikacji pojazdów wybrano trójkątny (3) oraz trapezoidalny (4) kształt funkcji przynależności.

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 - \frac{|x - \mu|}{\alpha \cdot \sigma} & \text{dla } |x - \mu| < \alpha \cdot \sigma \\ 0 & \text{dla } |x - \mu| \geq \alpha \cdot \sigma \end{cases} \quad (3)$$



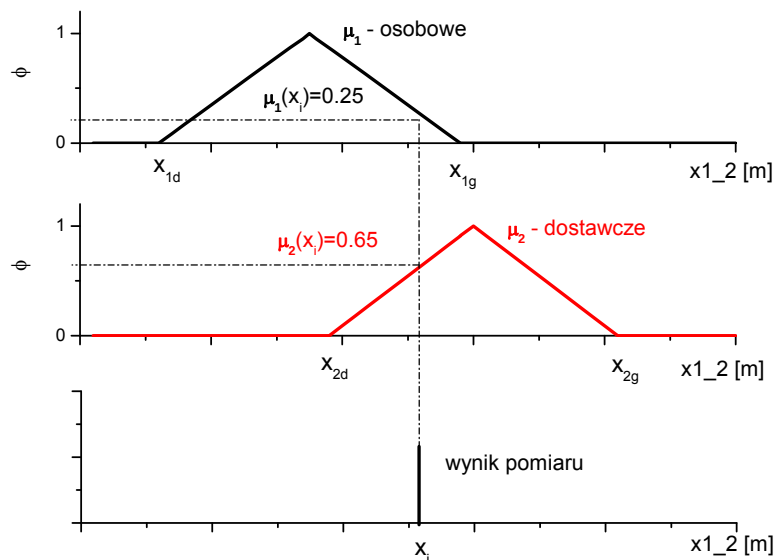
Rys. 3 Interpretacja parametrów trójkątnej funkcji przynależności

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{dla } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{dla } a \leq x \leq b \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{dla } c \leq x \leq d \\ 0, & \text{dla } d \leq x \end{cases} \quad (4)$$



Rys. 4 Interpretacja parametrów trapezoidalnej funkcji przynależności

Oprócz alternatywy „przynależność – nieprzynależność” charakterystycznej dla logiki klasycznej, występują tu przypadki przynależności częściowej. Przykład trójkątnych funkcji przynależności zbioru rozmytego „odległość między osiami” - x_{1_2} pokazano na rysunku 5. W praktyce pojęcie zbioru rozmytego utożsamia się z jego funkcją przynależności i taką konwencję przyjmuje autor w dalszej części pracy.



Rys. 5 Przykład obrazujący budowę modeli kategorii pojazdów dla trójkątnych funkcji przynależności i sposób postępowania w przypadku uzyskania nowego wyniku pomiaru x_i

Dzięki zastosowaniu trójkątnych funkcji przynależności udało się wyeliminować niejednoznaczność charakterystyczną dla zbiorów konwencjonalnych (nierozmytych).

Otrzymane w tym przykładzie wartości funkcji przynależności μ_1 i μ_2 należy interpretować jako miarę przynależności pojazdu o rozstawie osi x_{1_2} do jednej z dwóch kategorii: samochód osobowy lub dostawczy. Wartość $(\mu_1(x_i)=0.65) > (\mu_2(x_i)=0.25)$ wskazuje, iż pojazd o zmierzonym rozstawie osi x_i , „lepiej” pasuje do kategorii samochodów dostawczych niż osobowych. Przedstawione rozważania można uogólnić dla dowolnej k liczby kategorii pojazdów oraz n liczby mierzonych parametrów.

Każda funkcja powinna wiernie odzwierciedlać relację pomiędzy wartością parametru, a stopniem przynależności tworząc model danej kategorii pojazdów. Do budowy modeli wykorzystano dane referencyjne pochodzące z trzech źródeł:

- specyfikacje techniczne producentów samochodów – pojazdy osobowe oraz dwuosiowe i trzyosiowe ciężarowe,
- Inspekcja Transportu Drogowego - wyniki ważenia oraz wymiary geometryczne pojazdów ciężarowych (głównie pięcioosiowych),
- dane z systemu WIM – pomiar odległości między osiami oraz długości elektrycznej zastępczej pojazdu.

Model k -tej kategorii składa się z zestawu funkcji przynależności określonych dla 3 wybranych parametrów pojazdu:

- rozstawu osi,
- długości,
- różnicy pomiędzy długością pojazdu, a rozstawem dwóch skrajnych osi.

Współczynniki funkcji (3) i (4) wyznaczono wykorzystując metody analizy statystycznej na referencyjnej bazie danych. W ten sposób zbudowano modele każdej kategorii pojazdów klasyfikacji ALT.

A3.2 Fuzja danych

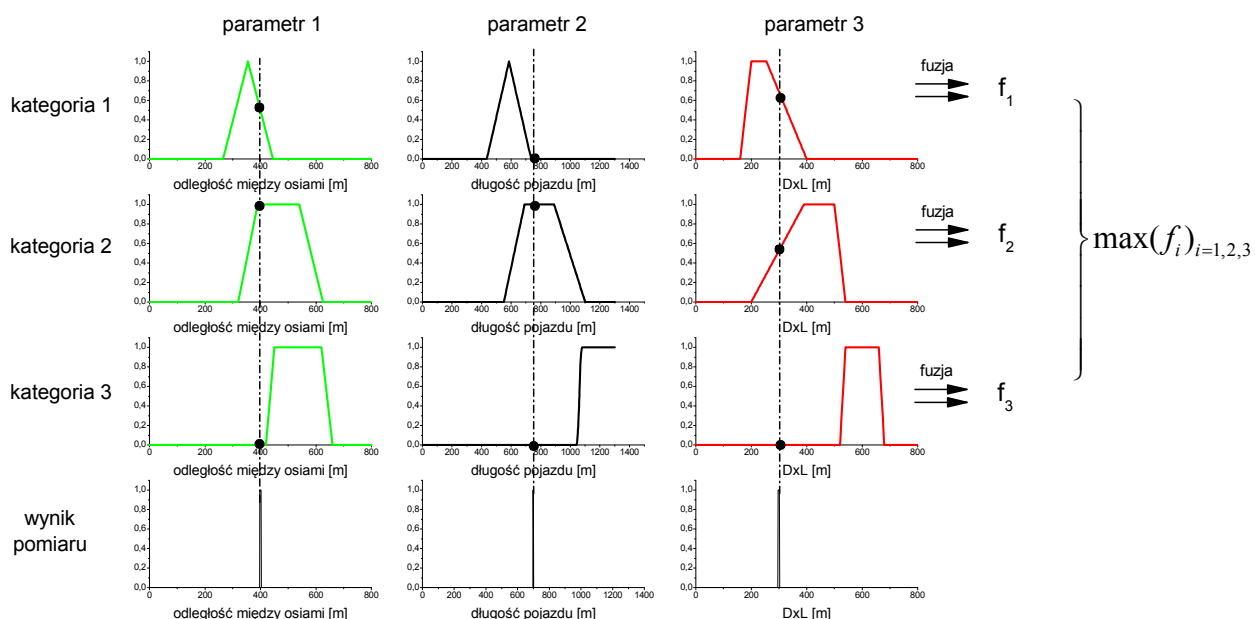
Na podstawie pomiaru kilku parametrów pojazdu można zbudować różne scenariusze działania algorytmu klasyfikacji. Po pierwsze informacje zawartą w pomiarze każdego parametru można analizować oddzielnie i tylko na tej podstawie podejmować decyzje o przynależności pojazdu do danej kategorii. Jednak jak wykazano wcześniej takie działanie jest mało selektywne oraz nieefektywne. Alternatywą jest klasyfikacja dwustopniowa polegająca na selekcji pojazdów ze względu na liczbę osi, a następnie jeden z mierzonych parametrów: rozstaw osi lub długość pojazdu. Selektywność takiej klasyfikacji wzrasta jednak efektywność, w przypadku klasycznych algorytmów identyfikacji jest nadal niezadowolająca. Trzecia możliwość to zastosowanie metod fuzji danych. Pod tym pojęciem

będziemy rozumieć ogół działań mających na celu łączenie danych pochodzących z wielu źródeł celem uzyskania decyzji lub wyników lepszych w sensie jakościowym lub ilościowym niż podczas indywidualnej analizy danych z każdego źródła z osobna (Sroka 2008). Wykorzystanie wspólnej informacji „ukrytej” w oryginalnych danych pomiarowych pozwala uzyskać nowe lub pełniejsze wyniki, nie możliwe do osiągnięcia innymi metodami. Łączenie danych w procesie fuzji wydaje się być metodą odpowiednią do zastosowania w procesie automatycznej klasyfikacji pojazdów.

Otrzymany w wyniku pomiaru wektor parametrów charakterystycznych ma długość N zależną od liczby osi pojazdu:

$$\text{param}=[\text{długość_pojazdu}, D_{xL}, x1_2, x2_3, \dots]_{(1 \times N)}$$

gdzie $x1_2$ to rozstaw pomiędzy osiami 1 i 2, $x2_3$ między osiami 2 i 3, itd., a D_{xL} różnica pomiędzy długością pojazdu, a rozstawem dwóch skrajnych osi. Pierwszy etap klasyfikacji to kwalifikacja pojazdu do grupy o danej liczbie osi. Następnie wyniki pomiaru N parametrów pojazdu są porównywane z K funkcjami przynależności tworzącymi modele poszczególnych kategorii. W wyniku porównania, otrzymujemy N wartości funkcji przynależności dla każdej z K kategorii:



Rys. 6 Przykład obrazujący modele 3 kategorii pojazdów, sposób postępowania w przypadku uzyskania nowego wyniku, oraz fuzja danych.

Otrzymane N wartości funkcji przynależności dla danej kategorii, kojarzonych jest ze sobą za pomocą funkcji realizujących fuzję danych. Testy wyłoniły dwie funkcje dające najlepsze rezultaty:

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu_i(x_i) \\ f_2 &= \bigcap_{i=1}^N \mu_i(x_i) = \min(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N) \end{aligned} \quad (5a, 5b)$$

Wybór funkcji jest uzależniony od liczby osi pojazdu. Jako wynik fuzji otrzymujemy jedną liczbę dla każdej rozpatrywanej kategorii. Największa wartość wskazuje na kategorię do której powinien zostać przyporządkowany rozważany aktualnie pojazd.

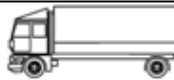
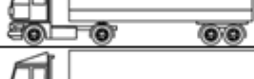
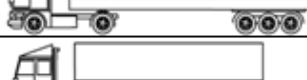
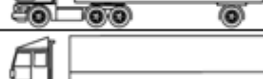
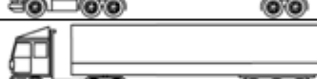
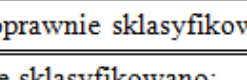
A4. Wyniki testów.

Celem przeprowadzonych testów było porównanie efektywności dwóch algorytmów automatycznej klasyfikacji pojazdów:

- klasyczny algorytm klasyfikacji wykorzystujący schemat FHWA,
- algorytm wykorzystujący metody fuzji danych oraz zbiory rozmyte dla klasyfikacji ALT.

Do porównania wykorzystano dane pomiarowe z 16 czujnikowego systemu MS-WIM zainstalowanego w miejscowości Gardawice. System wyposażony jest w piezoelektryczne czujniki nacisku, które rozmieszczone są równomiernie, w odległości 1m od siebie. Każdą parę czujników nacisku obejmuje jeden indukcyjny czujnik pętlowy, a na początku i końcu stanowiska umieszczono dwa czujniki temperatury. Konfiguracja czujników piezoelektrycznych pozwala na pomiar takich parametrów jak: liczba osi i odległości między nimi, nacisk osi na podłoże, masa całkowita oraz prędkość. Dzięki zastosowaniu pętli indukcyjnych możliwy był ponadto pomiar profilu magnetycznego pojazdu, związanego z konstrukcyjnym ukształtowaniem podwozia oraz zastępczej długości elektrycznej pojazdu. Dokonano rejestracji 1097 pojazdów, które przyporządkowano do odpowiednich kategorii na podstawie oceny wizualnej. Zarejestrowane dane przetworzono następnie z wykorzystaniem opisanych metod klasyfikacji. Wynik klasyfikacji automatycznej porównano z wynikiem wizualnej oceny rodzaju pojazdu. Jako miarę efektywności przyjęto stosunek poprawnie sklasyfikowanych pojazdów do ogólnej liczby pojazdów testowych w danej kategorii.

Tabela 3: Efektywność klasyfikacji ALT i FHWA

Rodzaj pojazdu	Numer kategorii	Sylwetka	Efektywność [%]:		Liczba pojazdów:
			ALT	FHWA	
pojazdy pojedyncze	1		-	-	0
	2		99.26	98.8	673
zespół pojazdów	3		100	80.0	5
	4		100	0	3
pojazdy pojedyncze	5		75.6	76.9	156
	6		89.7	43.8	57
	7		100	100	14
	8		100	0	7
zespół pojazdów	9		100	Brak kategorii	8
	10		100	Brak kategorii	1
	11		100	Brak kategorii	5
	12		-	Brak kategorii	0
pojazdy członowe	13		-	-	0
	14		100	0	45
	15		100	100	109
	16		-	-	0
	17		100	0	1
	18		100	100	2
Pojazdy pojedyncze	19		72.7	90.9	11
	20		-	-	0
Łącznie poprawnie sklasyfikowano:			95.0	85.0	1097 poj. łącznie
Łącznie nie sklasyfikowano:			0.0	9.0	

Efektywność klasyfikacji algorytmu opartego na miarach rozmytych i fuzji danych, jest zdecydowanie lepsza niż dla algorytmu klasycznego. Szczególną uwagę zwraca brak pojazdów nie sklasyfikowanych, co w przypadku algorytmu FHWA stanowi niemal 10% wszystkich wyników. Co więcej, mimo iż klasyfikacja ALT jest bardziej selektywna niż FHWA, łączna efektywność klasyfikacji dla schematu ALT jest o 10% większa niż dla FHWA. Dowodzi to słuszności koncepcji wykorzystania logiki rozmytej oraz fuzji danych do automatycznej klasyfikacji pojazdów.

A5. Podsumowanie.

W dodatku A przedstawiono alternatywny schemat klasyfikacji pojazdów ALT. Cechuje go uniwersalność wynikająca z otwartej struktury podziału. Odbiorca może dostosować liczbę i rodzaj kategorii pojazdów w zależności od indywidualnych potrzeb. Uzupełnienie klasyfikacji ALT o algorytm oparty o miary rozmyte oraz fuzję danych pozwala, przy zachowaniu wysokiej selektywności podziału, uzyskać wysoką efektywność klasyfikacji. Dowodzą tego wyniki otrzymane na podstawie przeprowadzonych testów. Efektywność klasyfikacji wszystkich pojazdów na poziomie 95%, a pojazdów ciężarowych na poziomie 100% jest więcej niż zadowalająca. Prostota metody (pomiar odległości między osiami i długości pojazdu), jej uniwersalność, a jednocześnie wysoka efektywność pozwalają na jej implementację w autonomicznych systemach WIM.

Bibliografia

Bajor, Mirosław, i Andrzej Zygmunt. „Projekt i realizacja stałej stacji ważenia pojazdów.” *Projektowanie i Budowa Dróg - Teoria i Praktyka*. Kazimierz Dolny: Norbertinum, 1999. 275-284.

Bendat, Julius, i Allan Piersol. *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych*. Warszawa: PWN, 1976.

Bergan, A.T., Norm Lindgren, Curtis Berthelot, i Bob Woytowich. „Preserving Highway Infrastructure Using Weigh-In-Motion (WIM).” *International Road Dynamics INC*, Listopad 1998.

Bhatti, Asghar, Idelin Molinas-Vega, i James Stoner. „Nonlinear Finite Element Based Model for Simulation of Performance of Concrete Pavements.” *Semisequicentennial Transportation Conference Proceedings*. Ames: Iowa State University, 1996.

Błażejowski, Krzysztof. „Asfalty drogowe w nawierzchniach bitumicznych. Drogowa nawierzchnia asfaltowa, sposób pracy i zniszczenia.” *Drogownictwo*, lipiec 1998.

Botwinowski, Tomasz, Ryszard Piotrowski, i Ryszard Sroka. „Zastosowanie sieci neuronowych w procesie estymacji nacisku statycznego osi poruszających się pojazdów.” *XVI symposium Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych*. Krynica: PAK 10bis/06, 2006. 66-71.

Bukowski, Zbigniew. „Co kryje asfalt?” *Magazyn Autostrady*, lipiec 2005: 28 - 29.

Burnos, Piotr. „Analiza niestacjonarności systemów WIM.” *Materiały XVI Symposium Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych*. Krynica: PAK 10bis/06, 2006. 72-76.

Burnos, Piotr, i Janusz Gajda. „Autokalibracja Systemów Ważenia Pojazdów Samochodowych w Ruchu.” *Materiały XV Symposium Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych*. Krynica, 2005. 123-132.

Burnos, Piotr. "Autokalibracja systemów WIM, a korekta temperaturowa wyników ważenia" *Metrologia - narzędzie poznania i rozwoju, KONGRES METROLOGII*. Kraków: Agencja Wydawnicza SIMP, 2007.

Burnos, Piotr, Janusz Gajda, Piotr Piwowar, Ryszard Sroka, Marek Stencel, i Tadeusz Żegleń. "Measurements of Road Traffic Parameters Using Inductive Loops and Piezoelectric Sensors." *Metrology and Measurement Systems*, vol. XIV, number 2, 2007: 187-203.

Burnos, Piotr, Janusz Gajda, Piotr Piwowar, Ryszard Sroka, Marek Stencel, i Tadeusz Żegleń. "WieloczuJNIKOWY system ważenia pojazdów samochodowych w ruchu", *Metrologia - narzędzie poznania i rozwoju, KONGRES METROLOGII*. Kraków: Agencja Wydawnicza SIMP, 2007.

Burnos, Piotr, Janusz Gajda, Piotr Piwowar, Ryszard Sroka, Marek Stencel, i Tadeusz Żegleń. „Accurate Weighing of moving Vehicles.” *Metrology and Measurement Systems*, vol. XIV, number 4, 2007: 507-516.

Burnos, Piotr "Auto-Calibration and Temperature Correction of WIM Systems" *Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles, 5th International Conference on Weigh-in-Motion of Heavy Vehicles*. Paryż: Wiley, 2008. 300 -307.

Burnos, Piotr "Czujniki Nacisku Stosowane w Systemach WIM" *Kierunki działalności i współpraca naukowa Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki : materiały konferencji zorganizowanej z okazji Jubileuszu 90-lecia AGH : Kraków, 28–29 maja 2009*

Caussignac, Jean Marie, i Jean Claude Rougier. „Fibre Optic WIM Sensor and Optoelectronic System – Preliminary Tests.” *Proceedings of the Final Symposium of the project Wave (1996 - 99)*. Paryż: Hermes Science Publication, 1999.

Cebon, David. *Handbook of Vehicle – Road Interaction*. Lisse: Swets&Zeitlinger Publishers, 1999.

—. „Design of multiple-sensor weigh-in-motion systems.” *Proceedings of the I MECH E Part D Journal of Automobile Engineering, Volume 204, Number 8*, 1990: 133 - 144.

Cebon, David, i D Cole. „Capacitative Strip Sensor for Measuring Dynamic Tyre Forces.” *Second International Conference on Road Traffic Monitoring, Conf. Publ. No. 299*. Londyn, 1989.

—. „Performance and Application of a Capacitative Strip Tyre Force Sensor.” *Proceedings of the 6th Conference on Road Traffic Monitoring and Control*. Londyn, 1992.

Chatti, Karim, Anshu Manik, i Nicholas Brake. „Effect of axle configurations on fatigue and faulting of concrete pavements.” *Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles, 10th International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technologies*. Paryż: Wiley, 2008. 117 - 126.

Chatti, Karim, John Lysmer, i Carl Monismith. „Dynamic Finite-Element Analysis of Jointed Concrete Pavements.” *Transportation Research Record vol. 1449*, 1994: 79-90.

CORDIS. *Technologies for Optimizing the Precision of MS-WIM of Road Transports to Improve Automatic Overload Control and European Procedures for Enforcement*. 2009. <http://cordis.europa.eu/>.

„COST 323.” *Weigh-in-Motion of Road Vehicles*, 1999.

„COST 334.” *Effects of Wide Single Tyres and Dual Tyres*, 2001.

„COST 347.” *Improvements in Pavement Research with Accelerated Load Testing*, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne, 2003.

Daehyeon, Kim, Rodrigo Salgado, i Adolph Altschaeffl. „Effects of Supersingle Tire Loadings on Pavements.” *Journal of Transportation Engineering, Vol. 131, No. 10*, 2005: 732 - 743.

Dijk, Rein. „Enforcement of Regulations Concerning Overloading by the Introduction of a WIM-VID Network on the Motorways in the Netherlands.” *Proceedings of the Final Symposium of the project Wave (1996 - 99)*. Paris: Hermes Science Publications, 1999. 69 - 72.

Dolcemascolo, Victor, i Bernard Jacob. „Use of Multiple Sensor Weigh In Motion for Enforcement and Road Pricing.” *Proceedings of the Final Symposium of the project Wave (1996 - 99)*. Paryż: Hermes Science Publications, 1999. 33 - 44.

„Dyrektywa 92/21/EWG.” z dnia 31 marca 1992 r. w sprawie mas i wymiarów pojazdów silnikowych kategorii M1 (Dz. Urz. WE L 129 z 14.05.1992, z późn. zm.). 1992.

„Dyrektywa 93/93/EWG.” z dnia 29 października 1993 r. w sprawie mas i wymiarów dwu- i trzykołowych pojazdów silnikowych (Dz. Urz. WE L 311 z 14.12.1993). 1993.

„Dyrektywa 96/53/WE.” z dnia 25 lipca 1996 r. ustanawiająca dla niektórych pojazdów kołowych poruszających się na terytorium Wspólnoty maksymalne dopuszczalne wymiary w ruchu krajowym i międzynarodowym oraz maksymalne dopuszczalne obciążenia w ruchu międzynarodowym . 1996.

Dz.U. RP Nr 103, poz. 1085. *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 30 kwietnia 2004 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia*. 1 Maj 2004.

„Dz.U. RP. Nr 102.” , poz. 1077, z dnia 31 października 2005 r. *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 19 października 2005 r. w sprawie wykazu dróg krajowych, po których mogą się poruszać pojazdy o dopuszczalnym nacisku pojedynczej osi napędowej do 11,5 t*. 2005.

Dz.U. RP. Nr 169, poz. 1773. *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 26 lipca 2004 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia*. 30 Lipiec 2004.

Dz.U. RP. Nr 188, poz. 1345. „*Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 25 września 2007 r. w sprawie wymagań, którym powinny odpowiadać wagi samochodowe do ważenia pojazdów w ruchu, oraz szczegółowego zakresu badań i sprawdzeń wykonywanych podczas prawnej kontroli metrologicznej tych*.” 30 październik 2007.

„Dz.U. RP. Nr 43.” , poz. 430, z dnia 5 maj 1999 r. *Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie*. 1999.

FEHRL. 2009. <http://www.fehrl.org/>.

FHWA. 2009. <http://www.fhwa.dot.gov/>.

Gajda, Janusz. „Analiza Błędów oraz Optymalizacja Parametryczna Systemów Pomiarowych Metodami Badań Modelowych.” *Seminarium Komitetu Metrologii Polskiej Akademii Nauk*. Warszawa, 2000.

—. *Statystyczna analiza danych*. Kraków: Wydział Elektrotechniki Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie, 2002.

—. „System pomiarowy o zmiennej strukturze do pomiaru parametrów ruchu drogowego - w publikacji (projekt rozwojowy).” Kraków, 2009.

Gajda, Janusz, i Michał Szyper. *Modelowanie i badania symulacyjne systemów pomiarowych*. Kraków: Jartek s.c, 1998.

Gajda, Janusz, i Ryszard Sroka. „Analiza dokładności systemów WIM kalibrowanych metodą pojazdu wstępnie zważonego.” *Materiały XV Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych*. Krynica, 2005. 111-122.

Gajda, Janusz, i Tomasz Twardowski. „Ocena niepewności wyników identyfikacji parametrycznej.” *PAK 05/02*, 2002: 20-24.

Gajda, Janusz, Ryszard Sroka, i Tadeusz Żegleń. „Accuracy Analysis Of WIM Systems Calibrated Using Pre-Weighed Vehicles Method.” *Metrology and Measurement Systems*, vol. XIV, number 4, 2007: 517 - 527.

Gajda, Janusz, Ryszard Sroka, Marek Stencel, Andrzej Wajda, i Tadeusz Żegleń. „A Vehicle Classification Based on Inductive Loop Detectors.” *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. Budapeszt, 2001. 460 - 464.

—. „Systemy Wążenia Pojazdów Samochodowych w Ruchu.” *Drogownictwo*, marzec 2001.

—. „Systemy Wążenia Pojazdów w Ruchu – Statystyczna Analiza Wyników Pomiarowych.” *V Szkoła - Konferencja: Metrologia Wspomagana Komputerowo, Tom 3*. Rynia k/Warszawy, 2001. 85 - 92.

Gajda, Janusz, Ryszard Sroka, Marek Stencel, i Tadeusz Żegleń. „Pierwszy Polski System Wążenia Pojazdów w Ruchu.” *Drogownictwo*, marzec 2002: 90 - 94.

—. „Modelowanie i badania symulacyjne wieloczułnikowego systemu wążenia pojazdów samochodowych w ruchu.” *Pomiary Automatyka Kontrola*, marzec 2007: 78 - 86.

Gajda, Janusz, Ryszard Sroka, Marek Stencel, i Żegleń Tadeusz. „Identification of the Mechanical Object Class Using a Single Inductive Loop Detector.” *2nd Polish – German Workshop In Mechatronic*. Ilmenau, 1998. 177 - 182.

Gaweł, Irena, Maria Kalabińska, i Jerzy Piłat. *Asfalty Drogowe*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2001.

GDDKiA. 2009. <http://www.gitd.gov.pl/>.

GDDKiA. „Generalny Pomiar Ruchu 2005 - Synteza Wyników.” Warszawa, 2006.

GDDKiA. *Raport o stanie technicznym nawierzchni asfaltowych i betonowych sieci dróg krajowych na koniec 2008 roku*. Warszawa: GDDKiA, 2009.

Giergowicz, Andrzej, Tomasz Mechowski, Janina Szrajber, i Dariusz Sybilski. *Ocena skutków ruchu pojazdów o masie, naciskach osi lub wymiarach przekraczających dopuszczalne wielkości parametrów określone w przepisach o ruchu drogowym*. Warszawa: Instytut Badawczy Dróg i Mostów, 2000.

Gillespie, Thomas, i Steven Karamihas. „Heavy truck properties significant to pavement damage.” *ASTM Special Technical Publication No. 1225*, 1994.

GITD. 2009. <http://gitd.gov.pl/>.

Glover, M. „Weighing axles in motion with a multiple-sensor weigh-in-motion system.” *TRRL, Working paper WP VED/88/50*, 1988.

Glover, M, i W Newton. „Evaluating of multiple-sensor WIM systems.” *Research Report 307, Transport Research Laboratory*, 1991.

Goltsman, Helio, Marcio Paiva, Amir Mattar Valente, i Fernando Pantoja. „Test of WIM sensors and systems under Brazilian conditions.” *Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles, 5th International Conference on Weigh-in-Motion of Heavy Vehicles*. Paryż: Wiley, 2008. 86 - 92.

Huhtala, Matti. „Factors Affecting Calibration Effectiveness.” *Proceedings of the Final Symposium of the project Wave (1996 - 99)*. Paryż: Hermes Science Publications, 1999. 297 - 306.

IBDiM. „Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych.” 1997.

Jacob, Bernard. *Weigh-in-motion of Axles and Vehicles for Europe (WAVE), General Report*. LCPC, 2001.

Jacob, Bernard, i Eugene O'Brien. *Weigh-in-Motion of Road Vehicles - Final report of the COST323 action*. Paryż: LCPC, 2002.

—. „Weigh-in-Motion: Recent Developments in Europe.” *Post-Proceedings of the Fourth International Conference on Weigh-In-Motion*. Taipei, 2005. 2 - 12.

Jacob, Bernard, i Hans Van Loo. „Weigh-in-Motion for enforcement in Europe.” *Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles, 5th International Conference on Weigh-in-Motion of Heavy Vehicles*. Paryż: Wiley, 2008. 15 - 24.

Jacob, Bernard, i Victor Dolcemascolo. „Spatial Repeatability of Dynamic Loading On a Pavement.” *Pre-Proceedings, COST323 – Weigh in Motion of Road Vehicles, 2nd European Conference*. Lisbona: Office for Official Publications of the European Communities, 1998. 291 - 302.

Kalibra. 2009. <http://www.kalibra.nl/>.

Kistler. 2009. <http://www.kistler.com/>.

Klein, Lawrence. *Sensor Technologies and Data Requirements fot ITS*. Artech House, 2001.

Komenda Główna Policji. *Wypadki Drogowe w Polsce w 2008 Roku*. Warszawa: Biuro Ruchu Drogowego, Wydział Profilaktyki i Analiz, 2009.

Krusper, Aleksandra, i Robert Thomson. „Crash compatibility between heavy foods vehicles and passenger cars: structural interaction analysis and In-depth accident analysis.” *Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles, 10th International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technologies*. Paryż: Wiley, 2008. 181 - 190.

Kul, Sławomir. „Co dalej z ważeniem pojazdów nadmiernie obciążonych.” *Bezpieczne drogi*, marzec 2000: 2 - 3.

Kulakowski, Bohdan. *Vehicle - road interaction*. ASTM International, 1994.
LCPC. 2009. <http://www.lcpc.fr/en/home.dml>.

Leal, Jesus. „Weigh-In-Motion Measurements In The National Road Network Of Spain During The 2000-2003 Period. Data Collection Procedure And Main Results.” *Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles, 5th International Conference on Weigh-in-Motion of Heavy Vehicles*. Paryż: Wiley, 2008. 66 - 75.

Lukanen, Erland, Richard Stubstad, i Robert Briggs. *Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement*. Final Report, FHWA, 2000.

Mangeas, Morgan, Sebastien Glaser, i Victor Dolcemascolo. „Neural networks estimation of truck static weights by fusing weight-in-motion data.” *Proceedings of 5th International Conference on Information Fusion*. Waszyngton, 2002.

Mańczak, Kazimierz, i Zbigniew Nahorski. *Komputerowa identyfikacja obiektów dynamicznych*. Warszawa: PWN, 1983.

Marchadour, Yves, i Bernard Jacob. „Development and implementation of a WIM network for enforcement in France.” *Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles, 5th International Conference on Weigh-in-Motion of Heavy Vehicles*. Paryż: Wiley, 2008. 266 - 274.

Materiały inteligentne. 2009. <http://www.matint.pl/>.

Mathworks. 2009. <http://www.mathworks.com/>.

Measurement Specialties. 2009. <http://www.meas-spec.com/>.

Mechowski, Tomasz, Dariusz Sybilski, i Przemysław Harasim. „Ocena wpływu obciążenia dróg pojazdami ciężkimi na trwałość nawierzchni.” *I Polski Kongres Drogowy*. Warszawa, 2006.

Michelin. 2009. <http://www.michelintruck.com/michelintruck/tires-retreads/xone/xOne-fuel-savings.jsp>.

Mimbela, Luz Elena, i Lawrence Klein. *A Summary of Vehicle Detection and Surveillance Technologies used in Intelligent Transportation Systems*. FHWA, 2007.

Minnesota. *Load Testing Of Instrumented Pavement Sections*. Minneapolis: University of Minnesota, Department of Civil Engineering, 1999.

Morgan, Gerald, Lily Poulikakos, Martin Ulises Arraigada, Rico Muff, i Manfred Partl. „Stress-in-motion Measurements of Heavy Vehicles From The Swiss Footprint Monitoring Site.” *Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles, 5th International Conference on Weigh-in-Motion of Heavy Vehicles*. Paryż: Wiley, 2008. 415 - 424.

Nelles, Oliver. *Nonlinear System Identification*. Berlin: Springer, 2001.

Nesnas, Kamal, i Mike Nunn. „Modelling the time dependent behaviour of asphalt and pavement permanent deformation under a rolling wheel.” *TRL Annual Research Review*, 2004: 16-24.

O'Brien, Eugene, Arturo Gonzalez, i Fionnuala McInerney. „A statistical spatial repeatability algorithm for multiple sensor weigh in motion.” *Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles, 5th International Conference on Weigh-in-Motion of Heavy Vehicles*. Paryż: Wiley, 2008. 175 - 186.

OIML. „International Recommendation: OIML R 134-1 “Automatic instruments for weighing road vehicles in motion and measuring axle loads, Part 1: Metrological and technical requirements – Tests”.” 2006.

Okręgowy Urząd Miar. 2009. <http://www.urzadmiar.krakow.pl>.

Pamuła, Wiesław. „Systemy identyfikacji pojazdów na podstawie tablic rejestracyjnych.” *Magazyn Autostrady*, kwiecień 2005: 54 - 59.

Pavement Interactive. 2008. <http://pavementinteractive.org/>.

Pavement Interactive. 2009. <http://www.pavementinteractive.org/>.

Pavements - FHWA. 2009. <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/>.

Penant, Christophe. „A brief review of tyre-pavement interaction and an insight on new regulation on tyre rolling resistance in Europe.” *Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles, 10th International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technologies*. Paryż: Wiley, 2008. 125 - 136.

Peters, Kendra, David Timm, i Rod Turochy. „Effects Of Axle Load Spectra Shifts On Highway Infrastructure Damage And Cost.” *Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles, 5th International Conference on Weigh-in-Motion of Heavy Vehicles*. Paryż: Wiley, 2008. 453 - 458.

Philro Industrial. 2009. <http://www.philro.ro/en/>.

Piowar, Piotr. „Integracja systemu MS-WIM w środowisku LabView.” *Metrologia - narzędzie poznania i rozwoju, KONGRES METROLOGII*. Kraków: Agencja Wydawnicza SIMP, 2007.

- Poniński, Maciej, Andrzej Siedlecki, i Augustyn Chwaleba. *Metrologia elektryczna*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2000.
- Raab, C, M Partl, i A Partl. „Monitoring Traffic Loads and Pavement Deformations on a Swiss Motorway.” *Post-proceedings of the Fourth International Conference on Weigh-In-Motion*. Taipei, 2005. 301 - 311.
- Rembeau, Sylvie, Christian Follin, i Daniel Stanczyk. „The French National WIM Network “SIREDO”.” *Pre-Proceedings, COST323 – Weigh in Motion of Road Vehicles, 2nd European Conference*. Lisbona: Office for Official Publications of the European Communities, 1998. 47 - 54.
- Scheuter, F. „Evaluation of Factors Affecting WIM System Accuracy.” *Pre-Proceedings, COST323 – Weigh in Motion of Road Vehicles, 2nd European Conference*. Lisbona: Office for Official Publications of the European Communities, 1998. 371 - 377.
- Simon, Aleksander, i Marcin Walczyk. *Sieci komórkowe GSM/GPRS: usługi i bezpieczeństwo*. Xylab, 2002.
- Soares, Roberto. „Finite Element Analysis of the Mechanics of Viscoelastic Asphaltic Pavements Subjected to Varying Tire Configurations.” *A Thesis – Presented to the Faculty of The Graduate College at the University of Nebraska*. 2005.
- Soderstrom, Torsten, i Petre Stoica. *Identyfikacja Systemów*. Warszawa: PWN, 1997.
- Sroka, Ryszard. „Multisensing in Road Traffic Measurements.” *Multisensor Fusion*, 2002: 725 - 747.
- Sroka, Ryszard. *Metody fuzji danych w pomiarach parametrów ruchu drogowego*. Kraków: Wydawnictwa AGH, 2008.
- Sroka, Ryszard. „Raport Końcowy z realizacji projektu badawczego nr 4 T10C 026 25.” *Dokładne wieloczułnikowe systemy ważenia pojazdów samochodowych w ruchu*, Kraków, 2006.
- Stanczyk, Daniel. „Methode d’etalonnage automatique.” *Note interne, CETE Est*, 1984.
- Stanczyk, Daniel, Benoit Geroudet, Charles Thiounn, i Alain Millot. „Pre-selection of Overloaded vehicles.” *Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles, 5th International Conference on Weigh-in-Motion of Heavy Vehicles*. Paryż: Wiley, 2008. 281 - 290.
- Stanczyk, Daniel, i Bernard Jacob. „Etalonnage automatique des systèmes de pesage en marche.” *WAVE/Mid-term seminar/Delft*, 1997.
- Tabor, Zbigniew. „Nacisk 11,5 tony na oś – Wyznaczenie obciążenia ruchem projektowanych nawierzchni po przystąpieniu Polski do Unii Europejskiej.” *Magazyn Autostrady 10/2005*, 2005: 34 - 36.
- Tietze, Ulrich, i Christoph Schenk. *Układy półprzewodnikowe*. Warszawa: WNT, 1993.

„Turner - Fairbank Highway Research Center.” *LTPP Temperature Prediction and Correction Guide*. 2002. <http://www.tfhrc.gov/pavement/ltp/fwdcd/gendis.htm>.

Turner, Daniel, Leslie Anne Nicholson, i Kenneth Agent. „Oversize/Overweight Commercial Vehicle Safety.” *Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles, 10th International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technologies*. Paryż: Wiley, 2008. 239 - 248.

Urgela, Stanislav, i Rudolf Janotka. „Measure in motion vehicle detector on the motorways, expressways and the roads of Slovakia.” *Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles, 5th International Conference on Weigh-in-Motion of Heavy Vehicles*. Paryż: Wiley, 2008. 58 - 65.

Van Boxel, Daniel, i Hans Van Saan. „Extending WIM-NL-Data With A Loading Indicator And A Truck Damage Factor.” *Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles, 5th International Conference on Weigh-in-Motion of Heavy Vehicles*. Paryż: Wiley, 2008. 407-414.

Van Loo, F. „Project WIM – Hand, 2nd interim report, English Version.” Public Works and Water Management Department, Road and Hydraulic Engineering Institute, Luty 2004.

Van Loo, F.J. *WIM-Hand Project, 1st Intermediate Report - Results of the first phase of the „Weigh-In-Motion for direct Enforcement” Project In 2000*. Delft: Road and Hydraulic Engineering Division, 2001.

Van Loo, Hans, i R Henny. „REMOVE, Requirements for Enforcement of Overloaded Vehicles In Europe.” *Post-Proceedings of the Fourth International Conference on Weigh-In-Motion*. Taipei, 2005. 255 - 262.

Wardęga, Robert. „Wpływ struktury ruchu na nośność nawierzchni drogowych.” Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, 2006.

Weighbridges. 2009. <http://www.weighbridges.com/>.

WSDOT. *Flexible Pavement Distress*. 2009.
http://training.ce.washington.edu/WSDOT/Modules/09_pavement_evaluation/09-7_body.htm.