

## AUTOREFERAT

### 1. Dane personalne

Imię i nazwisko: Piotr Burnos  
Data i miejsce urodzenia: 12 maja 1980 r., Kraków

### 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

**Stopień naukowy:** **Doktor Nauk Technicznych**  
**Dyscyplina:** Elektrotechnika  
**Jednostka:** Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, AGH Akademia Górniczo - Hutnicza  
**Temat pracy:** *Autokalibracja systemów ważących pojazdy samochodowe w ruchu oraz analiza i korekcja wpływu temperatury na wynik ważenia*  
**Data obrony:** 15 grudnia 2009r.  
**Promotor:** *Prof. dr hab. inż. Janusz Gajda (AGH w Krakowie)*  
**Recenzenci:** *Prof. dr hab. inż. Adam Kowalewski (AGH w Krakowie)*  
*Prof. dr hab. inż. Remigiusz Rak (Politechnika Warszawska)*

**Tytuł:** **Magister inżynier**  
**Kierunek:** Elektrotechnika (studia ukończone z wynikiem celującym)  
**Specjalność:** Automatyka i Metrologia  
**Jednostka:** Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, AGH Akademia Górniczo - Hutnicza  
**Temat pracy:** *Statystyczna Kalibracja Systemów WIM – Badania Symulacyjne*  
**Data obrony:** 29 czerwca 2005r.  
**Promotor:** *Prof. dr hab. inż. Janusz Gajda (AGH w Krakowie)*

**Tytuł:** **Technik elektryk**  
**Szkoła:** Technikum Energetyczne im. Tadeusza Kościuszki w Krakowie (Świadectwo Dojrzałości z wyróżnieniem)  
**Data:** Czerwiec 2000r.

### 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych

**Miejsce pracy:** Katedra Metrologii i Elektroniki, AGH Akademia Górniczo - Hutnicza  
**Stanowisko:** Adiunkt  
**Okres zatrudnienia:** od 01 luty 2010r. do obecnie

**Miejsce pracy:** Katedra Metrologii, AGH Akademia Górniczo - Hutnicza  
**Stanowisko:** Asystent  
**Okres zatrudnienia:** od 01 października 2005r. do 31 stycznia 2010r.

### 4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789)

#### A) Tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

Moim osiągnięciem naukowym stanowiącym znaczący wkład w rozwój dyscypliny naukowej Elektrotechnika jest monotematyczny cykl 13 publikacji pt.:

#### **Analiza metrologiczna administracyjnych systemów dynamicznego ważenia pojazdów Weigh-in-Motion**

#### B) Lista publikacji, które stanowią podstawę wniosku

Monotematyczny cykl składa się z trzynastu publikacji naukowych, w tym z dwóch monografii i siedmiu artykułów z bazy Web of Science, z czego pięć z nich zostało opublikowanych w czasopiśmie z listy JCR. Trzy prace zostały opublikowane na ważnych, międzynarodowych konferencjach naukowych związanych z dynamicznym ważeniem pojazdów, jednak konferencje te nie są indeksowane w bazach naukowych. Jedna praca jest polskojęzyczna.

- [1] J. Gajda, R. Sroka, M. Stencel, T. Zeglen, P. Piwowar, **P. Burnos**, "Analysis of the temperature influences on the metrological properties of polymer piezoelectric load sensors applied in Weigh-in-Motion systems," in 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012, pp. 772–775.

**Baza WoS, MNiSZW: 10 pkt.**

Udział Własny: 15%

- [2] J. Gajda, R. Sroka, M. Stencel, T. Żeglen, **P. Burnos**, P. Piwowar, Monografia: Pomiary Parametrów Ruchu Drogowego. Kraków: Wydawnictwa AGH, 2012.

**MNiSZW: 20 pkt.**

Udział własny: 16,66%

- [3] J. Gajda, R. Sroka, T. Żeglen, **P. Burnos**, "The influence of temperature on errors of WIM systems employing piezoelectric sensors," *Metrol. Meas. Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 171–182, 2013.

**Baza WoS, IF: 0.609, MNiSZW: 20 pkt.**

Udział własny: 25%

- [4] **P. Burnos**, "Ważenie pojazdów samochodowych w ruchu. Część 4: Ocena dokładności systemów Weigh In Motion," *Drognictwo*, no. 12, pp. 388–395, 2014.

**MNiSZW: 4 pkt.**

Udział własny: 100%

- [5] J. Gajda, R. Sroka, M. Stencel, T. Żegleń, P. Piwowar, **P. Burnos**, Z. Marszałek, "Design and Accuracy Assessment of the Multi-Sensor Weigh-in-Motion System," in 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2015, pp. 1036–1041.

**Baza WoS, MNiSZW: 15 pkt.**

Udział własny: 14,28%

- [6] J. Gajda, R. Sroka, M. Stencel, **P. Burnos**, T. Żegleń, P. Piwowar, Z. Marszałek, Monografia: Pomiary parametrów ruchu drogowego. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN SA, 2015.

**MNiSZW: 20 pkt.**

Udział własny: 14,28%

- [7] **P. Burnos**, J. Gajda, "Vehicle's Weigh-in-Motion system for enforcement in Poland," in 11th ITS European Congress: delivering future cities now, 2016.

Udział własny: 70%

- [8] J. Gajda, **P. Burnos**, R. Sroka, "Weigh-in-Motion systems for direct enforcement in Poland," in ICWIM7: 7 International Conference on Weigh-in-Motion & PIARC workshop, 2016, pp. 302–311.

Udział własny: 70%

- [9] J. Gajda, **P. Burnos**, "Temperature properties of Weigh-in-Motion systems," in ICWIM7: 7 International Conference on Weigh-in-Motion & PIARC workshop, 2016, pp. 46–55.

Udział własny: 80%

- [10] **P. Burnos** and J. Gajda, "Thermal Property Analysis of Axle Load Sensors for Weighing Vehicles in Weigh-in-Motion System," *Sensors*, vol. 16, no. 12, 2016.

**Baza WoS, IF: 2.677, MNiSZW: 30 pkt.**

Udział własny: 80%

- [11] **P. Burnos** and D. Rys, "The Effect of Flexible Pavement Mechanics on the Accuracy of Axle Load Sensors in Vehicle Weigh-in-Motion Systems," *Sensors*, vol. 17, no. 9, p. 2053, 2017.

**Baza WoS, IF: 2.475, MNiSZW: 30 pkt.**

Udział własny: 50%

- [12] J. Gajda, **P. Burnos**, and R. Sroka, "Accuracy Assessment of Weigh-in-Motion Systems for Vehicle's Direct Enforcement," *IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.*, vol. 10, no. 1, pp. 88–94, 2018.

**Baza WoS, IF: 3.019, MNiSZW: 25 pkt.**

Udział własny: 70%

- [13] **P. Burnos**, J. Gajda, and R. Sroka, "Accuracy criteria for evaluation of weigh-in-motion systems," *Metrol. Meas. Syst.*, vol. 25, no. 4, pp. 743–754, 2018.

**Baza WoS, IF: 1.523, MNiSZW: 20 pkt.**

Udział własny: 60%

- C) Omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.**

#### **Kontekst naukowy i motywacja prowadzonych badań**

Systemy ważenia pojazdów w ruchu (WIM – ang.: Weigh-in-Motion), nazywane również dynamicznymi wagami pojazdów samochodowych, są systemami pomiarowymi, które służą do pomiaru nacisków osi oraz masy całkowitej pojazdów bez konieczności ich zatrzymywania. W skład każdego systemu WIM wchodzi: zestaw co najmniej dwóch czujników nacisku osi, które są montowane w nawierzchni drogi, układ kondycjonowania sygnałów współpracujący z czujnikami oraz system nadrzędny z zaimplementowanym algorytmem estymacji nacisku statycznego poszczególnych osi i innych parametrów pojazdu. Proces ważenia dynamicznego polega na rejestracji i przetwarzaniu sygnałów generowanych przez czujniki pod wpływem nacisku kół poruszającego się pojazdu. Fakt, że ważenie pojazdu odbywa się w ruchu, a czujniki nacisku są zamontowane w nawierzchni drogi, skutkuje tym, że proces pomiaru jest bardzo wrażliwy na szereg czynników zakłócających. Wpływa to niekorzystnie na dokładność ważenia, a co gorsze powoduje, że jest ona zmienna w czasie. **Zbadanie zjawisk odpowiedzialnych za ten stan rzeczy, wytłumaczenie mechanizmów ich wpływu i analiza metrologiczna systemów WIM, jest główną treścią mojej pracy naukowej.** Osiągnięcie wysokiej i stałej dokładności ważenia dynamicznego pojazdów samochodowych, utrzymującej się w zmiennych warunkach eksploatacji na poziomie 2%, umożliwiłoby zastosowanie systemów WIM w celach administracyjnych (ang.: enforcement). Pozwoliłoby to na ich używanie na wzór fotoradarów, tj. do

bezpośredniego penalizowania przewoźników przeciążających pojazdy (wynik ważenia + numer rejestracyjny). Do tej pory tylko dwa kraje na świecie (Republika Czeska i Węgry) wprowadziły takie rozwiązanie, jednak tylko w ograniczonym zakresie.

Potrzeba efektywnej kontroli pojazdów najcięższych wynika z wielu przesłanek. Jeden pojazd ciężarowy o pięciu osiach i masie przekraczającej dopuszczalne w Polsce 40 ton, wyrządza szkodę zmęczeniu nawierzchni drogi porównywalną z oddziaływaniem stu tysięcy pojazdów osobowych o dopuszczalnej masie całkowitej do 3,5 tony. Duże natężenie ruchu pojazdów przeciążonych jest główną przyczyną przyspieszonej degradacji dróg i mostów i powoduje, że czas życia nawierzchni skraca się nawet dwukrotnie w stosunku do projektowanego [P.1], [P.2]. Dynamika ruchu pojazdów obciążonych ponadnormatywnie jest zaburzona, wydłuża się ich droga hamowania, a sterowność jest ograniczona [P.3]. To z kolei pociąga za sobą bezpośrednie zagrożenie dla wszystkich uczestników ruchu drogowego. Ponadto ślad środowiskowy pojazdów przeciążonych, czyli poziom generowanego hałasu i wibracji oraz emisji spalin, jest dużo większy niż pojazdów normatywnych, a to oznacza bardziej inwazyjne oddziaływanie na środowisko naturalne [P.4]. W końcu, proceder przeciążania pojazdów oddziałuje niekorzystnie na rynek przewozu towarów poprzez łamanie zasad uczciwej konkurencji.

Obecnie stosowane metody kontroli nacisku osi i masy całkowitej pojazdów nie są efektywne. Wymagają zatrzymania pojazdu i skierowania go na specjalnie przygotowane stanowisko na poboczu drogi. W tym celu stosuje się dwa rodzaje wag samochodowych. Do pierwszej grupy należą wagi pomostowe do pomiaru masy całkowitej oraz przenośne wagi statyczne do pomiaru nacisku osi. Wspólną cechą takich wag jest duża dokładność, potwierdzona świadectwem legalizacji oraz niestety mała efektywność wynikająca z potrzeby zatrzymania pojazdu na czas przeprowadzenia kontroli. Ta ostatnia cecha powoduje, że ważenie statyczne, jakkolwiek dokładne, nie jest skuteczne, gdyż w ciągu dnia roboczego inspektorzy są w stanie skontrolować do 8 pojazdów. W tym czasie setki potencjalnie przeciążonych unikają kontroli.

Do drugiej grupy wag, są one przedmiotem moich badań, zalicza się systemy ważenia pojazdów w ruchu, nazywane również wagami dynamicznymi WIM. Najczęściej wagi takie zawierają dwie linie czujników nacisku osi pojazdów. Cechy tych systemów są przeciwne do cech wag statycznych. Otóż, wyniki pomiarowe z wag dynamicznych nie są tak dokładne jak w przypadku statycznych wag legalizowanych, ale WIMy zapewniają praktycznie 100% efektywność kontroli pojazdów. Jest tak dlatego, że czujniki nacisku osi w systemach WIM są montowane w drodze, a pomiar odbywa się automatycznie, bez potrzeby zatrzymywania pojazdów. Jednak ze względu na specyfikę montażu czujników w nawierzchni, oraz dynamiczny charakter pomiaru nacisku osi, dokładność ważenia w systemach WIM jest kilkukrotnie gorsza niż w wagach statycznych. Ponadto dokładność ta zmienia się w czasie wraz ze zmianą czynników zakłócających pomiar (np. klimatycznych), co uniemożliwia ich zastosowanie w celach administracyjnych. Obecnie systemy WIM służą głównie, do wstępnej selekcji pojazdów podejrzanych o przeciążenie, które następnie są dokładnie ważone w sposób statyczny przez uprawnionych inspektorów.

Z punktu widzenia służb przeprowadzających kontrolę pojazdów, idealna waga powinna posiadać najlepsze cechy obydwu grup wag: zapewniać wysoką i stabilną dokładność ważenia i jednocześnie 100% efektywność kontroli na danym odcinku drogi. **Budowa wagi dynamicznej o wyżej wymienionych cechach i wprowadzenie w Polsce systemu administracyjnego ważenia pojazdów w ruchu jest znaczącym wyzwaniem naukowym, technicznym i legislacyjnym i jest główną motywacją mojej pracy badawczej.**

Jakkolwiek idea kontroli masy pojazdów w ruchu z wykorzystaniem systemów WIM jest znana od dziesięcioleci, to dopiero w ciągu ostatniej dekady, również za sprawą prowadzonych przeze mnie

badan, podjęto działania w kierunku zastosowania tych systemów w celach administracyjnych. Przez administracyjne systemy WIM należy rozumieć legalizowane wagi dynamiczne służące do automatycznego i bezpośredniego penalizowania wykroczeń względem dopuszczalnej masy całkowitej bądź dopuszczalnego w Polsce nacisku osi pojazdów samochodowych. Ustabilizowanie dokładności ważenia na poziomie 2% w długim horyzoncie czasowym jest jednym z celów prowadzonych od co najmniej 10 lat badań naukowych. Pierwsze poważne wzmianki o wykorzystaniu systemów WIM do ważenia administracyjnego pochodzą z początku lat dwutysięcznych [P.5], [P.6]. Jednak dopiero pod koniec pierwszej dekady, rozpoczęto prace naukowe w tym zakresie [P.7]. Pionierem na arenie Europejskiej była Republika Czeska, która jako pierwsza wprowadziła pilotażowy program „WIM for enforcement” [P.8]. Był to przełomowy moment w mojej karierze naukowej. Będąc tuż po obronie doktoratu, w 2010 roku zdecydowałem o rozpoczęciu badań w kierunku oceny właściwości metrologicznych administracyjnych systemów WIM.

Od 2012 roku problematyka administracyjnych systemów WIM, na dobre zagościła w środowisku naukowym związanym z wagami dynamicznymi pojazdów. Dzisiaj jest ona aktualna bardziej niż kiedykolwiek. Prace opublikowane w 2016 roku na International Conference on Weigh-in-Motion (ICWIM7) w Brazylii [P.9], [P.10], zgłoszone do bieżącej edycji tej konferencji w roku 2019 oraz opublikowane w czasopiśmie z bazy JCR wskazują na potrzebę prowadzenia prac badawczych nad dokładnymi systemami WIM [P.11], [P.12]. Specjaliści zwracają uwagę na to, że z jednej strony, następuje monotoniczny wzrost natężenia ruchu pojazdów ciężarowych w skali globalnej, a z drugiej strony, na coraz szybsze tempo degradacji infrastruktury i konieczność jej ochrony. W Polsce idea praktycznego zastosowania systemów WIM po raz pierwszy została podjęta przez zespół naukowy, którego jestem członkiem. W 2013 roku z inicjatywy AGH w Krakowie, powstał Zespół do spraw Administracyjnych Systemów WIM (ZAS-WIM). Do Zespołu, oprócz Uczelni, należały wtedy urzędy administracji państwowej oraz firmy, dostarczające technologie WIM.

Równoległe do ośrodków naukowych, działania w tym zakresie są również inicjowane przez rządy krajów Unii Europejskiej oraz obydwu Ameryk. Przykładem są Czechy (rok 2012) [P.8], [P.9] Polska (2016) [P.13] i Węgry (rok 2017). W odpowiedzi na tak sformułowane zapotrzebowanie, w roku 2017 powstał projekt nowego standardu sprawdzania dokładności systemów WIM i zatwierdzania typu opracowany przez Holenderski Instytut Metrologii, z którym współpracuję [P.14]. Administracyjne ważenie pojazdów za pośrednictwem systemów WIM jest również priorytetem w Polsce. Obecnie (rok 2019) z inicjatywy Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad oraz Generalnej Inspekcji Transportu Drogowego jest prowadzony projekt eMIM (Measurement in Motion). Jego celem jest, przy udziale Głównego Urzędu Miar, opracowanie przepisów dotyczących legalizacji systemów WIM oraz ich administracyjnego wykorzystania w celach automatycznej kontroli wagi pojazdów. **Wyżej wymienione działania są dowodem na to, że tematyka mojej pracy naukowej jest aktualna i istotna nie tylko dla rozwoju tej dziedziny Elektrotechniki, która zajmuje się pomiarami masy obiektów w ruchu, ale również dla przedsięwzięcia jakim jest praktyczne wykorzystanie systemów WIM. Trzeba podkreślić, że inicjatorem tej tematyki badawczej w Polsce był zespół naukowy, w którym pracuję.**

### Cel pracy

**Nadrzędnym celem mojej pracy naukowej jest zbadanie właściwości metrologicznych systemów WIM, wyposażonych w czujniki nacisku wytwarzane w trzech aktualnie używanych technologiach: polimerowej, kwarcowej i tensometrycznej (płytkowej).** Dotychczasowe badania prowadziłem w kontekście poprawy dokładności wyników ważenia oraz zapewnienia stabilności tej dokładności, niezależnie od natężenia czynników zakłócających pomiar. Istotnym wątkiem mojej pracy

było wytłumaczenie zjawisk odpowiedzialnych za zmianę dokładności ważenia w systemach WIM, które zachodzą w układzie czujnik nacisku/nawierzchnia drogi. Ponadto w ostatnim okresie mojej aktywności, zająłem się badaniem cech metod oceny dokładności systemów WIM oraz formułowaniem zaleceń technicznych dla systemów administracyjnych. Tak określony obszar moich badań naukowych wychodzi naprzeciw wymaganiom stawianym systemom WIM przez metrologię prawną. Tylko stabilne i dokładne systemy pomiarowe mogą znaleźć zastosowanie w celach administracyjnych.

Zajmuję się ważnym i dynamicznie rozwijającym się obszarem nauki i poszukuję odpowiedzi na szereg pytań, które przyczynią się do skonstruowania administracyjnego systemu WIM. Poniżej wymieniam tylko fundamentalne pytania, na które starałem się znaleźć odpowiedź:

- Jakie czynniki wpływają głównie na dokładność ważenia w systemach WIM?
- Jakie zjawiska fizyczne odpowiadają za wpływ tych czynników na system i jaki jest ich mechanizm?
- Czy jest możliwe zbudowanie wiarygodnych modeli tych oddziaływań i wykorzystanie ich w celu kompensacji tego oddziaływania na system?
- Czy uda się opracować wielowymiarową mapę niepewności ważenia w celu wyznaczenia bezpiecznego obszaru pomiarowego?
- Która metoda oceny dokładności systemów WIM jest najbardziej miarodajna i obiektywna?
- Czy można opracować ulepszony algorytm autokalibracji z przeznaczeniem do zastosowania w systemach administracyjnych?

Odpowiedzi na powyższe pytania zawiera monotematyczny cykl publikacji [1 – 13], który obejmuje wnioski wynikające z mojej pracy naukowej. Najważniejsze artykuły publikowałem w czasopismach posiadających Impact Factor, indeksowanych w bazie Web of Science lub co najmniej w takich, które znajdują się na liście A MNiSzW. W tym miejscu chciałbym zaznaczyć, że część istotnych prac została opublikowana na konferencji International Conference on Weigh-in-Motion (ICWIM) organizowanej przez International Society of WIM (ISWIM) w cyklu trzyletnim. Konferencja skupia najwybitniejszych specjalistów działających w obszarze systemów dynamicznego ważenia pojazdów. Jakkolwiek konferencja ta nie jest indeksowana w bazach naukowych, to jest wydarzeniem posiadającym największą renomę w środowisku naukowym związanym z dynamicznym ważeniem pojazdów.

Publikowane wyniki oraz udzielone w artykułach odpowiedzi na ww. pytania są satysfakcjonujące, a w wielu przypadkach unikalne. Praca [8] została wyróżniona „Award for the Best Paper” na konferencji ICWIM 7 w 2016 roku w Brazylii. Nie oznacza to jednak końca prowadzonych przeze mnie badań. Specyfika systemów WIM powoduje, że analiza ich właściwości jest długotrwała, wymaga sporych nakładów finansowych i infrastrukturalnych. Wąg dynamicznych nie da się badać w kontrolowanych laboratoryjnie warunkach, a jedynie w warunkach drogowych w trakcie ich eksploatacji. Choćby ze względu na wpływ temperatury na właściwości zainstalowanych w nawierzchni czujników nacisku osi, minimalny okres obserwacji systemu to pełny cykl zmian klimatycznych w ciągu roku, czyli 12 miesięcy. Badań takich nie da się przyspieszyć.

### **Omówienie osiągniętych wyników**

**Moje artykuły opublikowane w latach 2010 – 2012** odnoszą się głównie do efektów zakończonego w roku 2009 projektu „System pomiarowy o zmiennej strukturze do pomiaru parametrów ruchu drogowego”, który był finansowany przez MNiSzW. Ponieważ celem tego projektu było skonstruowanie urządzenia pomiarowego, co nie odpowiada głównej treści mojej pracy

naukowej, to publikacji wtedy powstałych nie zaliczam do cyklu monotematycznego. Stąd pierwsza praca odnosząca się do właściwości metrologicznych systemów WIM pochodzi z 2012 roku.

W pracy [1], przedstawiono metrologiczne spojrzenie na dokładność systemów WIM wyposażonych w polimerowe czujniki nacisku. Czujniki takie, jakkolwiek obecnie coraz rzadziej stosowane, w roku 2012 wciąż były atrakcyjną cenowo alternatywą dla drogich wówczas czujników kwarcowych i płytowych. Celem opisanych w pracy badań, była ocena dwóch składowych błędów ważenia: wewnętrznego i zewnętrznego. Pojęcia te, jakkolwiek nie zostały w tym artykule literalnie zdefiniowane – nastąpiło to później – dobrze określają charakter występujących w systemach WIM błędów i będę ich używał w dalszej części tego autoreferatu. Błąd wewnętrzny jest związany z właściwościami czujników nacisku i jest określony przez producenta. Zależy on między innymi od wrażliwości temperaturowej czujnika, równomierności rozkładu czułości wzdłuż czujnika, liniowości charakterystyki statycznej oraz konstrukcji i jakości wykonania. Na zmiany błędów wewnętrznych ma wpływ zmiana parametrów elektrycznych czujnika takich jak pojemność, kąt stratności i rezystancja. W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych i symulacyjnych w tym zakresie. Dla założonych przedziałów zmienności zastępczej pojemności (8 do 12 nF) i kąta stratności (mniejszego niż 0.04) oceniono, że zmiana wyników ważenia może sięgać nawet  $\pm 10\%$ . W swoich badaniach zauważyłem jednak, że oprócz błędów wewnętrznych, można wyróżnić i próbować ocenić ilościowo udział drugiej składowej, tj. błędów zewnętrznych. O błędach tych można mówić dopiero po instalacji czujnika w drodze i jego mechanicznej integracji z nawierzchnią. Na wartość tego błędów mają wpływ czynniki niezależne od producenta, takie jak: sposób i jakość instalacji czujnika, rodzaj nawierzchni (betonowa lub asfaltowa), a przede wszystkim właściwości mechaniczne układu czujnik nacisku/nawierzchnia, które w znacznym stopniu zależą od temperatury. W tym kontekście w artykule [1] po raz pierwszy przedstawiłem koncepcję, że nawierzchnia drogi jest częścią systemu pomiarowego WIM i jej właściwości należy brać pod uwagę przy ocenie dokładności dynamicznego ważenia pojazdów. Badania pod kątem oceny wartości błędów zewnętrznych prowadziłem metodą statystyczną z wykorzystaniem pojazdów odniesienia (charakterystycznych), która została specjalnie do tego celu zaadoptowana. Metoda polega na wykorzystaniu wyników ważenia pojazdów należących do charakterystycznej klasy. Dla pojazdów tych, nacisk pierwszej osi ma tę cechę, że jest stabilny w sensie względnego odchylenia standardowego (poniżej 10%) i jest mało skorelowany z masą całkowitą pojazdu. Z wyznaczonego tą metodą modelu temperaturowego systemu zainstalowanego w miejscowości Gardawice, który wiązał jego dokładność ze zmianami temperatury nawierzchni, jednoznacznie wynikał silny związek między tymi wielkościami. Dla czujników polimerowych zmiana temperatury nawierzchni o  $40^{\circ}\text{C}$  (wartość osiągnięta często w polskich warunkach klimatycznych), wywołała zmianę wyników ważenia o 50%.

Publikacyjnym podsumowaniem mojego dorobku w latach 2010 – 2012 był rozdział w monografii „Pomiary parametrów ruchu drogowego” [2], która została wydana przez Wydawnictwa AGH. Rozdział mojego autorstwa dotyczył najważniejszych aspektów związanych z instalacją, budową, użytkowaniem i właściwościami metrologicznymi systemów WIM. W syntetyczny sposób omówiłem najważniejsze kwestie związane z dynamicznym ważeniem pojazdów, a w szczególności:

- oddziaływanie pojazdów na nawierzchnię drogi,
- problematykę administracyjnego ważenia pojazdów w Polsce i na Świecie,
- metody statycznego ważenia pojazdów,
- idee dynamicznego ważenia pojazdów i rozwój systemów WIM,
- podział systemów WIM i ich cechy,



- zasadę działania czujników nacisku oraz ich właściwości metrologiczne,
- metody kalibracji systemów WIM ze szczególnym uwzględnieniem opracowanej przeze mnie metody autokalibracji,
- metody oceny dokładności systemów WIM,
- przyczyny ograniczające dokładność ważenia – zaproponowałem klasyfikację błędów ze względu na źródło ich pochodzenia i podzieliłem na błędy związane z dynamiką poruszającego się pojazdu, oddziaływaniem środowiska, układem przetwarzania sygnałów oraz wynikające z właściwości stanowiska pomiarowego czyli geometrii drogi i jej jakości.
- kryteria wyboru lokalizacji stanowiska WIM.

Problematyka ważenia pojazdów w ruchu została przeze mnie w tej pracy omówiona całościowo. Tam gdzie było to wskazane, dane zagadnienie było ilustrowane przykładami i danymi pomiarowym. Monografia [2] była pierwszym w polskojęzycznej literaturze opracowaniem, w którym omówiono pomiary parametrów ruchu drogowego z technicznego punktu widzenia.

**Publikacje z lat 2013 – 2015** nawiązywały do moich prac w zakresie badania właściwości metrologicznych systemów WIM, a w szczególności ich wrażliwości na zmiany temperatury. Na bazie prowadzonych badań oczywisty stawał się wniosek, że dokładność ważenia należy wiązać z występowaniem składowej wewnętrznej i zewnętrznej błędu. Dodatkowo stało się jasne, że obydwie składowe nie są stałe, jak do tej pory zwykło się przyjmować, ale zależą od różnych czynników, w szczególności od zmian temperatury. Aby rozwickłać udział składowych błędów w łącznej dokładności systemu należało zaprojektować i przeprowadzić eksperyment polegający na badaniu samego czujnika oraz układu czujnik nacisku/nawierzchnia drogi.

W artykule [3] przedstawiono wyniki eksperymentalne badań czujników polimerowych, które zostały podzielone na dwie części, zgodnie z przyjętą filozofią podziału błędów ważenia. Pierwsza, która dotyczyła błędów wewnętrznych czujników została przeprowadzona w laboratorium w kontrolowanych w komorze klimatycznej warunkach. Druga część badań, która dotyczyła błędu zewnętrznego, czyli występującego po instalacji czujnika w nawierzchni, została przeprowadzona na stanowisku WIM. Aby badania przeprowadzone w komorze oraz na stanowisku WIM odpowiadały sobie, należało szczegółowo zaplanować eksperymenty i zachować spójność mierzonych wielkości i parametrów. Rozpatrzono głównie wpływ temperatury, gdyż zarówno parametry wewnętrzne jak i błąd zewnątrz czujników nacisku w dużej mierze zależą od zmian tej wielkości.

Pomiary przeprowadzone w komorze klimatycznej polegały na wyznaczeniu serii charakterystyk statycznych wiążących zmienność parametrów wewnętrznych czujnika polimerowego, takich jak pojemność i kąt stratności ze zmianami temperatury. Charakterystyki wraz z przyjętym modelem elektrycznym czujnika posłużyły do estymacji błędu zewnętrznego, który oceniono na 25% przy zmienności temperatury w zakresie od  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $50^{\circ}\text{C}$ . Z kolei błąd zewnętrzny, oceniono na podstawie badań eksperymentalnych przeprowadzonych na wadze dynamicznej z czujnikami polimerowymi zainstalowanymi w drodze. Wyznaczona w ten sposób charakterystyka temperaturowa błędu wskazywała na 50% zmianę wyników ważenia w zakresie od  $-10^{\circ}\text{C}$  do  $30^{\circ}\text{C}$ . Zawarte w pracy wnioski [3] okazały się szczególnie cenne w kontekście zrozumienia przyczyn występowania i zmienności błędów ważenia w systemach WIM i skierowały moje badania na nowy tor. Pogląd, że systemy WIM są stacjonarne został ostatecznie obalony, a teza o podziale źródła błędów została udowodniona. Ten wątek badań w latach następnych został przeze mnie rozwinięty i ukierunkowany na zrozumienie

mechanizmów powstawania błędu zewnętrznego oraz ilościowej oceny wpływu czynników zakłócających na dokładność ważenia.

Świadomość, iż systemy WIM nie są stacjonarne, a ich dokładność zależy od wrażliwości na zmiany temperatury doprowadziła do kolejnego istotnego wniosku w mojej pracy. W systemach WIM wyposażonych w czujniki polimerowe należy stosować metody kompensacji wpływu temperatury na dokładność ważenia pojazdów. W tej samej pracy [3], przeprowadzono więc analizę ilościową metody korekcji temperaturowej wyników ważenia oraz nowych metod wielopunktowej kalibracji systemu. Metody te, przyniosły ograniczenie zmienności błędu ważenia do  $\pm 4\%$ , a w przypadku kalibracji 5-cio punktowej do  $\pm 2\%$ . Kończącym, głównym wnioskiem z przeprowadzonych badań, było zalecenie o konieczności stosowania metod korekcji lub autokalibracji systemów WIM, szczególnie tych przeznaczonych do zastosowań administracyjnych.

Ponieważ badania eksperymentalne systemów WIM mogą odbywać się wyłącznie na stanowisku drogowym, są kosztowne i długotrwałe to równoległe do prowadzonych pomiarów rozpocząłem badania symulacyjne.

W początkowym okresie rozwoju systemów WIM uważano, że główną przyczyną niedokładności ważenia jest obecność składowej zmiennej w nacisku osi pojazdów. W swoich badaniach dowiodłem, że dynamika pojazdu jest tylko jedną składową wielowymiarowej mapy oddziaływań różnych czynników na system. Mając to na uwadze, oraz fakt, że błędy mogą mieć charakter wewnętrzny i zewnętrzny w pracy [4], zaproponowałem klasyfikację czynników wpływających niekorzystnie na dokładność ważenia w systemach WIM. Ze względu na źródło ich występowania zostały one podzielone na czynniki związane z pojazdem i systemem, a ze względu na stopień ich oddziaływania na system WIM na główne i dodatkowe. W tym samym artykule przedstawiłem wyniki symulacyjnej oceny dokładności systemów WIM. Do tego celu wykorzystałem zbudowany przeze mnie model systemu WIM oraz środowisko symulacyjne Adams/Car. Program ten reprezentuje grupę programów MBD (Multibody Dynamic) i umożliwia budowę złożonych modeli pojazdów, dróg o różnej kategorii i symulację różnych scenariuszy ruchu pojazdów. Wykorzystanie Adamsa do symulacji nacisków osi pojazdów w ruchu pozwoliło na przeprowadzenie dużo dokładniejszych symulacji niż dotychczas spotykane w literaturze. Najczęściej do tego celu wykorzystywano bowiem uproszczone modele sumy dwóch sinusoid lub model *quarter car*. Modele zbudowane w Adamsie odwzorowują pełną geometrię pojazdu, jego elementy składowe, takie jak układ napędowy, przeniesienia napędu czy układ hamulcowy oraz umożliwiają symulacje działania zawieszenia o różnej charakterystyce. Połączenie danych generowanych w Adamsie oraz modelu wagi dynamicznej, pozwoliło na dokładną i wielowymiarową analizę metrologiczną systemów WIM w zależności od nasilenia czynników zakłócających.

Ocenę dokładności systemu WIM wykonano pod kątem wpływu różnych czynników na dokładność ważenia, takich jak:

- Jakość nawierzchni,
- Liczba czujników,
- Klasa czujników,
- Prędkość pojazdu,
- Temperatura nawierzchni,
- Przestrzenna powtarzalność nacisku osi.

Oceniłem w sposób ilościowy wpływ każdego czynnika na dokładność systemu WIM co pozwoliło na sformułowanie istotnych wniosków:

- Największy wkład do błędu ważenia mają pionowe wahania pojazdu, a więc zmienność nacisku osi podczas ważenia dynamicznego. Dla czujników polimerowych czynnikiem o porównywalnym oddziaływaniu jest temperatura nawierzchni (50% zmiana wyników ważenia w typowym dla Polski zakresie zmian temperatury).
- Błąd ważenia zmienia się w sposób liniowy z prędkością ważonego pojazdu. Dla drogi o kategorii B (dobra nawierzchnia) i dla systemu dwuczujnikowego błąd ten zwiększył się 3-krotnie przy wzroście prędkości pojazdu z 35km/h do 95km/h.
- Wartość składowej dynamicznej nacisku osi zależy od jakości nawierzchni, stanu zawieszenia pojazdu oraz jego prędkości. Dla drogi o kategorii A (bardzo dobra) błąd względny  $\delta_{95\%}$  (tak zwany błąd 95-procentowy - wartość poniżej której występuje 95% mniejszych co do modułu błędów) wyniósł 4,8% a dla drogi o kategorii C (średnia jakość) 15,7%.
- Błąd ważenia wywołany dynamiką pojazdu można ograniczyć poprzez zastosowanie większej liczby czujników w systemie. Znaczenie ma również klasa użytych czujników oraz ich parametry takie jak nierównomierność rozkładu czułości wzdłuż czujnika. Obserwowane rozrzuty czułości wzdłuż ścieżki, po której toczy się koło ważonego pojazdu można zmniejszyć około 4-krotnie przy zastosowaniu 16 czujników w systemie.
- Dokładne systemy administracyjne powinny być wyposażone w algorytmy kompensacji wpływu zmian temperatury nawierzchni na dokładność ważenia, na przykład poprzez zastosowanie opracowanych przeze mnie w doktoracie algorytmów autokalibracji i korekcji temperaturowej.

Wnioski wynikające z przeprowadzonych badań symulacyjnych oraz wcześniejszych obserwacji i analizy danych pomiarowych z systemów WIM, stały się podstawą sformułowania wymagań technicznych jakim powinny odpowiadać administracyjne systemy WIM. Wątek ten po raz pierwszy został poruszony w pracy [5], w której wraz z zespołem skupiłem się na kryteriach ilościowych dotyczących oceny jakości nawierzchni w miejscu instalacji wagi dynamicznej oraz doborze liczby czujników w systemach wieloczujnikowych Multi-Sensor WIM. Obydwa zagadnienia mają krytyczne znaczenie w kontekście minimalizacji błędów ważenia powodowanych dynamiką poruszającego się pojazdu. W artykule omówiono wpływ jakości nawierzchni oraz prędkości pojazdu na wartość składowej dynamicznej nacisku osi. Na podstawie danych zarejestrowanych w pojeździe oprzyrządowanym oceniono, że w najgorszym przypadku, dla prędkości 80km/h, składowa zmienna nacisku może wynosić 40% wartości składowej stałej nacisku osi. Dalej, przedstawiono wyniki pomiarowe dla badawczego stanowiska WIM zbudowanego na drodze DK84 w Gardawicach, uzyskane za pomocą profilografu laserowego na odcinku o długości 250m. Na ich podstawie wyznaczano funkcję gęstości widmowej mocy nierówności drogi. Pozwoliło to na ocenę jakości nawierzchni wg normy ISO 8608 i drodze tej przyznano kategorię C. Na tej podstawie przedstawiono metodologię projektowania systemów wieloczujnikowych MS-WIM wg metody empirycznej oraz zależności analitycznych. Do obliczeń przyjęto, że masa zawieszona pojazdu generuje składowe o częstotliwości wokół mody 2,5Hz, a masa niezawieszona 8Hz. W drugiej części pracy przeprowadzono dyskusję dotyczącą dokładności systemów wieloczujnikowych. Wykazano, że zastosowanie większej liczby czujników w systemie zmniejsza błędy ważenia powodowane składową dynamiczną nacisku osi, oraz nierównomiernością rozkładu czułości wzdłuż czujników. Pokazano również, że zmniejszenie błędu ważenia można uzyskać na drodze programowej poprzez zastosowanie algorytmu największej wiarygodności użytego do estymacji nacisku statycznego osi.

Wątek właściwości metrologicznych administracyjnych systemów WIM był poruszany przeze mnie nie tylko w [5] ale również w innych artykułach, których nie zaliczyłem do monotematycznego ciągu publikacji. Na przykład praca "Ważenie pojazdów w ruchu. Stan obecny oraz perspektywy zastosowania systemów Weigh-in-Motion w celach administracyjnych," opublikowana w Biuletynie Głównego Urzędu Miar (no. 1–2 (8–9), pp. 40–45, 2015), to efekt mojej współpracy z Głównym Urzędem Miar (GUM) w zakresie wprowadzenia w Polsce administracyjnych systemów WIM i badania ich właściwości metrologicznych pod kątem procedury legalizacji. Podjęcie kooperacji z GUM, doprowadziło w roku 2013 do powstania „Zespołu do spraw administracyjnych systemów WIM” (ZAS-WIM). Zespół działa przy Kłastrze Inteligentnych Systemów Transportowych (ITS), a jego liderem jest AGH w Krakowie. Oprócz Uczelni, ówczesnie do zespołu należeli: Główny Urząd Miar, Główny Inspektorat Transportu Drogowego (GITD), Kapsch Telematic Services Sp. z o.o., CAT Traffic Sp. z o.o., TRAX Elektronik oraz Kistler. Pełnienie funkcji zastępcy kierownika tego Zespołu stało się ważną częścią mojej dalszej pracy w tym obszarze merytorycznym.

Tematyka administracyjnych systemów WIM była istotną częścią monografii [6], w której jestem autorem rozdziału o systemach dynamicznego ważenia pojazdów. Praca ta jest znaczącym rozwinięciem monografii z 2012 roku i została wydana na rynku ogólnopolskim przez PWN. Nowe wątki poruszone przeze mnie w tej pracy, obejmują:

- Rozwinięcie podrozdziału o kryteriach wyboru lokalizacji dla administracyjnych systemów WIM,
- Podrozdział o algorytmach estymacji nacisku statycznego osi w systemach wieloczujnikowych MS-WIM (z wyłączeniem systemów mostowych),
- Uzupełnienie podrozdziału o metodach oceny dokładności systemów WIM w zastosowaniu administracyjnym,
- Nowy rozdział dotyczący właściwości metrologicznych systemów WIM,
- Nowy rozdział na temat administracyjnych systemów WIM, w którym została opisana idea użytkowania takich systemów, warunki jakie muszą być spełnione do ich wprowadzenia, ich zalety i wady, analiza dokładności oraz wielowymiarowa mapa niepewności.

W monografii ująłem omawiane zagadnienie w sposób możliwie przekrojowy, ze szczególnym uwzględnieniem najnowszych doniesień literaturowych oraz wyników własnych badań. Wspólnym mianownikiem nowych rozdziałów jest idea administracyjnego ważenia pojazdów. W tym zakresie moja praca miała charakter koncepcyjny. Nowe spojrzenie na ideę systemów administracyjnych pozwoliło ugruntować pogląd na działania, jakie należało podjąć w obszarze technicznym i legislacyjnym. Sformułowane zalecenia zostały zaadoptowane przez GUM i GITD w ich pracach zmierzających do opracowania procedury legalizacji systemów WIM.

Praca ta jest częściowym (stan na 2015 rok) zwieńczeniem mojej pracy naukowej, a w literaturze polskojęzycznej jedynym opracowaniem o takiej tematyce i objętości.

**Moje publikacje z lat 2016 – 2018** dotyczą oceny właściwości metrologicznych systemów WIM w kontekście ich administracyjnego zastosowania. Ważnym wątkiem jest badanie systemów wyposażonych w czujniki kwarcowe i tensometryczne (płytkowe). Jest to, między innymi, efekt kierowania pracami w „Zespole ds. Administracyjnych Systemów WIM”, który został powołany w ramach Klastra ITS. Większość moich artykułów w roku 2016 została opublikowana na międzynarodowych konferencjach i kongresach. Nie były one indeksowane, jednak były prestiżowe z

punktu widzenia środowiska naukowego związanego z wagami dynamicznymi. Osobisty udział w konferencjach oraz wygłaszanie referatów, przyczyniło się do tego, że efekty moich badań dotarły do szerokiego grona odbiorców. Zaowocowało to następnie nasileniem współpracy z Inspekcją Transportu Drogowego w zakresie wprowadzenia w Polsce systemu administracyjnego. Podjąłem również współpracę z Dutch NMI (Holenderski Instytut Metrologii) i Corner Stone (szwajcarska firma konsultingowa) w zakresie opracowania procedury legalizacji systemów WIM. Na zaproszenie Ministerstwa Transportu Republiki Czeskiej, brałem udział jako ekspert polskiej, rządowej delegacji, w spotkaniu dotyczącym czeskich doświadczeń w zakresie używania systemów administracyjnych.

Praca [7] opublikowana na Europejskim Kongresie ITS w Glasgow, jest manifestem zawierającym opis idei wprowadzenia administracyjnych systemów WIM oraz warunków jakie muszą być spełnione aby taki cel osiągnąć. Nie ograniczono się tu jednak wyłącznie do Polski, a problematykę przedstawiono w szerszym, europejskim kontekście. Jako warunki konieczne do wprowadzenia systemów WIM do użytku administracyjnego wymieniono:

- Opracowanie procedury legalizacji i metrologicznej kontroli systemów WIM,
- Zdefiniowanie wymagań technicznych, którym powinny odpowiadać systemy administracyjne.

Opracowanie procedury legalizacji, oprócz badań naukowych, wymaga powstania dokumentu w randze co najmniej rozporządzenia do ustawy, w którym taka procedura byłaby opisana. Jest to więc obszar częściowo legislacyjny, związany z dostosowaniem istniejącego prawa.

Jednym z warunków aby administracyjne systemy WIM były skuteczne, w sensie detekcji pojazdów przeciążonych, jest duża i stała w czasie dokładność ważenia dynamicznego. W artykule przedstawiono dyskusję nad wpływem dokładności (2% lub 10%) systemu na jego efektywność na przykładzie danych pomiarowych z rzeczywistego systemu WIM. Ważną częścią pracy jest również omówienie właściwości metrologicznych systemów ważenia dynamicznego w zakresie ich administracyjnego zastosowania. Przedstawione wyniki wiążące dokładność ważenia pojazdów w ruchu z liczbą czujników nacisku, w sytuacji gdy, czujniki te różnią się między sobą dokładnością, są nowym spojrzeniem na proces projektowania systemów MS-WIM. W przeciwieństwie do analitycznych metod, empiryczne podejście do problemu, pozwoliło na optymalizację (w dosłownym sensie) liczby czujników w systemie (minimum charakterystyki wystąpiło dla 5 – 6 czujników). W tej pracy przedstawiono ideę wielowymiarowej mapy niepewności wyników ważenia pojazdów w ruchu, wiążącej nasilenie czynników zakłócających pomiar z dokładnością systemu. Idea wyznaczenia bezpiecznego obszaru, w którym wyniki pomiarowe spełniają wymagania metrologii prawnej, jest niezbędnym warunkiem używania systemów WIM do egzekwowania obowiązujących przepisów.

Podobny charakter, do pracy z Europejskiego kongresu ITS, miał artykuł zaprezentowany przeze mnie na konferencji ICWIM 7 w Brazylii [8]. W pracy tej rozszerzyłem jednak wątek związany z metrologicznymi właściwościami systemów dynamicznego ważenia pojazdów oraz sformułowałem zalecenia, którym powinny odpowiadać systemy administracyjne. Praca ta, została uznana za najlepszy artykuł konferencji, spośród kilkudziesięciu innych prac na temat systemów WIM pochodzących z całego świata. W szczególności nowe tematy dotyczyły:

- Dokładności wzorca stosowanego do kalibracji administracyjnych systemów WIM – W przypadku systemów WIM, powszechnie stosowaną metodą jest kalibracja z użyciem pojazdów wstępnie zważonych na statycznych wagach legalizowanych, które są przeznaczone do pomiaru nacisku osi. W artykule przedstawiono wyniki badań takich wag wskazujące na to, że nie spełniają one stawianych im wymogów klasy dokładności. Rozrzuty wyników

pomiarowych wynosiły nawet  $\pm 8\%$ , daleko wykraczając poza dopuszczalny świadectwem legalizacji 1%. To może niekorzystnie wpływać na dokładność kalibracji systemów WIM, gdyż rzeczywista wartość wzorca użytego do kalibracji może być znacząco inna niż ta wyznaczona na wagach statycznych.

- Oceny błędu zewnętrznego ważenia czyli wpływu temperatury i prędkości pojazdów na dokładność pomiarów – W pracy po raz pierwszy zaprezentowałem charakterystyki dwuwymiarowe opisujące dokładność ważenia w szerokim zakresie zmiany temperatury nawierzchni i prędkości ważonego pojazdu. Wyniki pomiarowe dotyczyły dwóch systemów WIM, które były wyposażone w czujniki nacisku wykonane w technologii polimerowej i kwarcowej. W literaturze spotykano wyniki podobnych badań, ale dla kilku arbitralnie wybranych wartości. W artykule, dzięki rozwinięciu przeze mnie statystycznej metody tzw. pojazdów odniesienia (charakterystycznych) wyznaczone charakterystyki składają się z kilkudziesięciu punktów i dają pełny obraz właściwości systemu WIM w dwuwymiarowej przestrzeni czynników wpływowych. Wpływ temperatury w zakresie  $-10^{\circ}\text{C}$  do  $35^{\circ}\text{C}$  powodował niemal 50% zmianę wyników ważenia dla czujników polimerowych oraz 7% zmianę dla czujników kwarcowych. Wpływ prędkości pojazdów na dokładność ważenia oszacowano odpowiednio na 10% i 4%.
- Wymagań technicznych, którym powinny odpowiadać administracyjne systemy WIM – W pracy zasugerowałem, że systemy ważące pojazdy w ruchu, przeznaczone do zadań administracyjnych stanowią odrębną klasę systemów WIM. Wobec tego powinny spełniać szereg wymagań formalnych oraz technicznych. Sformułowane zalecenia dotyczą między innymi:
  - dokładności wzorców używanych do kalibracji takich systemów (0.2% dla masy całkowitej, 1% dla nacisku osi),
  - kryteriów oceny dokładności wyników ważenia (charakterystyka niezawodności),
  - sposobu oceny dokładności (badanie dla szerokiego zakresu temperatury i prędkości pojazdów),
  - liczby czujników nacisku (6 linii),
  - używanych algorytmów kompensacji wpływu temperatury i prędkości ważonego pojazdu na dokładność ważenia.

W pracy zwrócono również uwagę na wrażliwość systemów WIM na oddziaływanie czynników zakłócających o różnym charakterze. Wrażliwość ta, powoduje niekorzystną zmianę dokładności ważenia. Wpływ części czynników na dokładność systemu można kompensować poprzez użycie modeli ich oddziaływań (na przykład metoda korekcji temperaturowej lub autokalibracji). Jednak część z nich jest trudna do modelowego opisanie, np.: wiatr (wpływający na dynamiczne zachowanie dużych pojazdów), drgania gruntu wywołane ruchem innych pojazdów, opady, i inne. Z tego powodu w pracy zaproponowano nową metodę oceny dokładności systemu obejmującą szeroki zakres zmian czynników zakłócających. Jednocześnie krytycznie oceniłem metodologię prowadzenia takiej oceny wg COST323 i zasugerowałem jej odrzucenie. Koncepcja ta została przyjęta w środowisku naukowym z powściągliwością lecz zrozumieniem i była ważnym głosem w dyskusji nad administracyjnymi systemami WIM.

Dwie kolejne prace stricte dotyczą temperaturowych właściwości systemów WIM. Zostały one opublikowane na konferencji ICWIM7 [9] oraz w czasopiśmie Sensors [10]. Badania opisane w tych pracach są konsekwencją zauważenia przeze mnie dużej wrażliwości temperaturowej wyników

ważenia w systemach WIM, jednak ze względu na brak dostępu do danych pomiarowych, nie mogły być one zrealizowane wcześniej.

W [9], [10] oficjalnie zdefiniowałem pojęcie błędu wewnętrznego i zewnętrznego wyników ważenia dynamicznego. Wprowadziłem również pojęcie układu czujnik nacisku osi/nawierzchnia drogi, gdyż właściwości tych elementów należy rozpatrywać łącznie. Prace zawierają znane charakterystyki temperaturowe oraz nowe wcześniej nie publikowane wyniki dla czujników kwarcowych i tensometrycznych (płytkowych). Opracowana przeze mnie metoda pojazdów odniesienia okazała się szczególnie użyteczna w celu wyznaczenia charakterystyk wiążących dokładność systemu ze zmianami temperatury nawierzchni. Dzięki dużej liczbie danych pomiarowych (rejestracje przez co najmniej 6 miesięcy), możliwe było wyznaczenie „przekrojów” charakterystyk dla różnych prędkości pojazdów. W ten sposób w [9] uzyskano dwuwymiarowy obraz zmiany błędu zewnętrznego w sensie jednoczesnego wpływu temperatury i prędkości ważonych pojazdów dla czujników polimerowych i kwarcowych. Natomiast [10] zawiera dodatkowo wyniki dla czujników tensometrycznych (płytkowych), wyznaczone dla konkretnego zakresu prędkości pojazdów. Z przeprowadzonych badań wynikają dwa główne wnioski, które rzuciły nowe światło na właściwości metrologiczne czujników kwarcowych i płytowych:

- Zmiany temperatury nawierzchni mają wpływ na dokładność ważenia pojazdów w ruchu z użyciem czujników kwarcowych i płytowych. Wpływ ten jakkolwiek mały w stosunku do czujników polimerowych, jest jednak istotnie duży (ok. 7%) z punktu widzenia systemów administracyjnych. Wykazałem, że nie jest prawdziwy, panujący do tej pory, pogląd o braku wrażliwości temperaturowej tych czujników.
- Prędkość pojazdu przy której odbywa się ważenie wpływa na dokładność wyniku. Zjawisko to, było obserwowane wcześniej, ale nie zostało do końca wytłumaczone. Z wyznaczonych charakterystyk wynika konieczność korekcji wyników względem prędkości pojazdów.

W obydwu pracach [9], [10] poruszyłem również wątki niespotykane wcześniej w literaturze. Otóż zauważono, że w systemach wieloczujnikowych, o długości stanowiska pomiarowego od kilku do kilkunastu metrów, może wystąpić niejednorodny rozkład temperatury nawierzchni wzdłuż drogi. Na podstawie pięciopunktowego pomiaru temperatury w systemie MS-WIM na drodze Dk84 w Gardawicach, oceniono, że błąd ważenia powodowany tym zjawiskiem może sięgać 40% dla gradientu wzdłuż i 7% dla gradientu temperatury w poprzek stanowiska WIM. To doprowadziło do sformułowania kolejnego zalecenia dla administracyjnych systemów WIM: temperatura nawierzchni i korekcja wyników ważenia, powinna odbywać się na podstawie wielopunktowego pomiaru temperatury.

Fakt, że dokładność systemów WIM, bez względu na rodzaj zastosowanych czujników, zależy od temperatury nawierzchni oraz od prędkości ważonego pojazdu, wymagał wytłumaczenia i opisu modelowego. Poza walorem poznawczym, taki dwuwymiarowy model, mógłby posłużyć do kompensacji wpływu zmian temperatury nawierzchni i prędkości pojazdu na dokładność wyników ważenia. Podjęcie wyzwania polegającego na opisanu zjawisk zachodzących w układzie czujnik nacisku osi/nawierzchnia drogi, skłoniło mnie do zainicjowania współpracy z Katedrą Inżynierii Drogowej i Transportowej Politechniki Gdańskiej. Pracownicy Katedry specjalizują się w badaniu właściwości i projektowaniu nawierzchni drogowych. Wspólna praca z dr Dawidem Rysiem, skierowała moją uwagę na właściwości mechaniczne nawierzchni asfaltowych.

Efektorem wspólnych badań naukowych prowadzonych z Politechniką Gdańską jest artykuł [11] opublikowany w czasopiśmie Sensors. W pracy tej można wyróżnić dwie zasadnicze części. Pierwsza z nich dotyczy opisu właściwości metrologicznych systemów WIM. W drugiej wytłumaczono zjawiska

odpowiedzialne za obserwowaną podatność czujników nacisku zainstalowanych w nawierzchni na zmiany temperatury i prędkości pojazdów.

Pierwsza część pracy zawiera uaktualniony podział czynników wpływających na dokładność ważenia z uwzględnieniem źródła ich występowania i stopnia oddziaływania na system. Omówiono właściwości stosowanych w systemach WIM czujników nacisku. Po raz pierwszy zaprezentowano pełne charakterystyki łączące względny błąd ważenia z temperaturą nawierzchni oraz prędkością ważonego pojazdu dla czujników polimerowych, kwarcowych i tensometrycznych (płytowych). Zbadanie czujników we wszystkich najczęściej obecnie używanych technologiach i w szerokim zakresie zmian czynników wpływowych jest jedynym takim zestawieniem w światowej literaturze przedmiotu. Przyniosło to bardzo ciekawe wnioski, które, szczególnie w zakresie czujników kwarcowych i płytowych, podważają dotychczas obowiązujące poglądy:

- Wyniki ważenia w systemach WIM są wrażliwe na zmiany temperatury nawierzchni i prędkości pojazdu niezależnie od technologii wykonania czujników.
- Wpływ ten jest różny dla różnych czujników, największy dla polimerowych (50%), najmniejszy dla kwarcowych i płytowych (7%).
- Nawet dla najdokładniejszych czujników, wrażliwości na wielkości zakłócające nie można ignorować w systemach administracyjnych i należy stosować kompensację.
- Prędkość pojazdu w mniejszym stopniu zmienia dokładność ważenia niż zmiany temperatury nawierzchni, jednak nawet dla czujników kwarcowych i płytowych wpływ ten jest na poziomie do 4%.

Efekty badań doprowadziły do powstania nowej koncepcji dwuwymiarowej korekcji wyników ważenia. Metoda ta będzie przeze mnie testowana w przyszłości.

Druga część pracy zawiera wytłumaczenie zjawisk odpowiedzialnych za wrażliwość układu czujnik nacisku/nawierzchnia na zmiany temperatury i prędkości ważonych pojazdów. Wyniki są pionierskie, gdyż wcześniej nie prowadzono takich badań. Podstawą opisanego modelu wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej. Podjęto próbę powiązania naprężenia powstającego w nawierzchni i czujniku nacisku z wielkościami zakłócającymi dokładność ważenia, czyli z temperaturą i prędkością pojazdu. Ponieważ naprężenia powstające w czujniku bezpośrednio odpowiadają za sygnał pomiarowy proporcjonalny do nacisku osi ważonego pojazdu, to wykazanie związku pomiędzy naprężeniem a wielkościami zakłócającymi pozwoliłoby na jakościowy i ilościowy opis zjawiska.

Rozważono trzy wielkości związane z nawierzchnią drogi, których wartość zależy od temperatury i czasu obciążenia siłą normalną do powierzchni: ugięcie nawierzchni, moduł sztywności sprężystej mieszanki mineralno-asfaltowej i naprężenie. Czas obciążenia nawierzchni siłą pochodzącą od koła pojazdu zależy od jego prędkości. Ze względu na wielowymiarowość problemu analizę podzielono na kilka części:

- Zbadano odpowiedź układu czujnik nacisku/nawierzchnia na różne obciążenia w celu obliczenia powstającego naprężenia,
- Oceniono wrażliwość współczynnika sztywności sprężystej  $E$  różnych mieszanek mineralno – asfaltowych na zmiany temperatury i czasu obciążenia,
- Przeprowadzono analizę ugięcia nawierzchni w zależności od współczynnika sztywności i naprężenia,
- Niezależnie zbadano wpływ naprężenia poprzecznego i podłużnego na czujniki nacisku osi w celu oceny błędów ważenia.



Wartość współczynnika sztywności sprężystej wpływa na właściwości sprężyste nawierzchni i jej „współpracę” z czujnikiem nacisku. Wykazano, że wartość  $E$  zmienia się o 700% przy zmianie temperatury nawierzchni w zakresie od 4°C do 40°C i o 200% przy zmianie prędkości pojazdu od 0km/h do 120 km/h. Jest to konsekwencją wiskoelastycznych właściwości mieszanek mineralno – asfaltowych, które objawiają się w wysokich temperaturach i przy długich czasach obciążeń (mała prędkość pojazdu).

Dodatkowo przeprowadzono analizę ugięcia nawierzchni i podobnie jak dla współczynnika  $E$  wykazano, że zależy ono nie tylko od siły nacisku osi ale również, od temperatury i czasu obciążenia. Oznacza to, że dla stałej wartości nacisku (np. wielokrotny przejazd osi pojazdu o tym samym nacisku statycznym) ugięcie nawierzchni, a w konsekwencji rozkład naprężenia powstający w jej wnętrzu będzie się zmieniać w takt zmian temperatury i prędkości pojazdów. Na przykład zmiana temperatury w zakresie od 20°C do 40°C, lub zmiana prędkości pojazdu od 5km/h do 70km/h powoduje zmianę ugięcia nawierzchni porównywalną ze zmianą obciążenia od 35kN do 50kN.

W ten sposób wykazano logiczny ciąg przyczynowo - skutkowy pomiędzy zmianami wielkości zakłócających, a zmianami naprężenia w nawierzchni wokół zainstalowanych czujników nacisku osi. Dla czujników kwarcowych i płytowych, którą są montowane równo z jezdnią, naprężenie na powierzchni czujnika jest równe naprężeniu kontaktowemu opona czujnik. Jednak naprężenia pionowe u podstawy czujnika (punkt jego osadzenia w nawierzchni) nie są równe naprężeniu kontaktowemu, co więcej zależą od ugięcia nawierzchni i wartości współczynnika sztywności sprężystej. Ostatecznie więc zależą od temperatury i czasu obciążenia. A ponieważ naprężenia powstające w czujniku nacisku osi są źródłem sygnału pomiarowego, oznacza to ścisły związek pomiędzy wielkościami zakłócającymi, a dokładnością ważenia pojazdów.

Na podstawie opracowanej teorii i przyjętego modelu oddziaływania temperatury i prędkości ważonych pojazdów na naprężenia powstające w układzie czujnik nacisku/nawierzchnia, w pracy przedstawiono wyniki studium przypadku. Rozważono system wyposażony w czujniki kwarcowe i dla typowej zmienności czynników zakłócających na podstawie modelu wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej obliczono teoretyczną zmienność błędu ważenia w systemie WIM. Otrzymane rezultaty zarówno pod względem jakościowym jak również ilościowym odpowiadały wartościom obserwowanym w rzeczywistym systemie WIM (współczynnik korelacji równy 0.98).

Wyniki badań opublikowane w pracy [11], w symboliczny sposób zamknęły pewien rozdział badania właściwości metrologicznych administracyjnych systemów WIM. Oczywiście nie do końca, gdyż wciąż kilka istotnych pytań pozostało bez odpowiedzi, na przykład, o ilościowe granice wielowymiarowej mapy niepewności, czyli wartości natężenia czynników zakłócających wewnątrz których system spełnia wymagania dokładności. Niemniej inny temat wymagał zbadania: metody oceny dokładności systemów WIM. W powszechnym użyciu znajduje się tutaj metoda zaproponowana w COST323. Jednak w mojej opinii posiada ona wiele wad dyskwalifikujących ją z obszaru systemów administracyjnych. W związku z tym, w dwóch ostatnich pracach z monotematycznego cyklu publikacji, poruszyłem temat dokładności systemów wieloczujnikowych oraz kryteriów dokładności systemów WIM.

Praca [12] zawiera wyniki oceny dokładności systemów ważących pojazdy samochodowe w ruchu o różnej liczbie czujników nacisku. W celu oceny dokładności zastosowano metodę pojazdów wstępnie ważonych. W rozpatrywanym przypadku użyto trzech pojazdów należących do trzech różnych klas i łącznie zebrano 147 wyników ich dynamicznego ważenia. Testy odbyły się na 16-czujnikowym systemie MS-WIM, który był zainstalowany na drodze Dk84 w miejscowości Gardawice.

Zgodnie z zaleceniami, pojazdy były ważone przy różnej prędkości z zakresu od 40km/h do 70km/h. Z zebranych wyników, 111 zostało użytych do kalibracji systemu, a 36 do oceny dokładności. Dzięki wyposażeniu systemu WIM aż w 16 czujników nacisku, było możliwe zbadanie wpływu ich liczby na dokładność ważenia. Za kryterium oceny dokładności przyjęto charakterystykę niezawodności i błąd  $\delta_{95\%}$ . Przeprowadzona analiza wykazała, że poszczególne podsystemy dwuczujnikowe (każda kolejna para dwóch linii czujników nacisku osi) różnią się dokładnością. Porównano więc dokładność podsystemów dwuczujnikowych z dokładnością całego 16-czujnikowego stanowiska. Szczególnie cennym wnioskiem płynącym z zaprezentowanej w pracy analizy jest obserwacja, że eliminacja najmniej dokładnych czujników z systemu wieloczujnikowego może przynieść większą korzyść w sensie dokładności niż zwiększanie liczby czujników. Na przykład odjęcie dwóch najmniej dokładnych czujników z systemu 16-sto czujnikowego doprowadziło do powstania systemu 14-czujnikowego i poprawiło dokładność w sensie błędu  $\delta_{95\%}$  względnego, z 8% do 6%. Tym samym oprócz kryterium liczby czujników, należy brać pod uwagę ich jakość i indywidualne cechy metrologiczne. O ile to możliwe, do budowy systemów administracyjnych należy wybierać egzemplarze czujników nacisku osi o najmniejszym odchyleniu parametrów od deklarowanych przez producenta wartości. Bardzo ważny jest również właściwy montaż czujnika w nawierzchni zgodnie z instrukcją producenta. Uchybienie w tym zakresie może prowadzić do niepoprawnego działania czujnika, a w skrajnych przypadkach do jego mechanicznego zniszczenia.

Ostatnia moja praca z monotematycznego cyklu publikacji, dotyczy badania sposobów oceny dokładności systemów WIM – ważnego wątku w obszarze praktycznego zastosowania wag dynamicznych do penalizowania pojazdów przeciążonych. Podjęcie tego tematu miało podwójną motywację. Po pierwsze brak jest na świecie ujednoczonego poglądu na to jak oceniać dokładność WIMów. Różne kraje stosują różne metody wynikające z wewnętrznych przekonań na ten temat. Przez pewien czas dużą popularnością cieszyła się metoda zaproponowana w COST323. Od kilku lat zaczęto jednak zdawać sobie sprawę z wad zaproponowanej tam metodologii i obecnie zasadność i użyteczność tej metody są coraz częściej podważane. Po drugie administracyjne ważenie pojazdów wiąże się z legalizacją systemów WIM przez narodowe instytuty metrologiczne. Metoda sprawdzania dokładności takich systemów musi więc być w 100% wiarygodna. Mając na uwadze powyższe oraz багаż własnych doświadczeń w tym zakresie, w pracy [13] zaproponowałem dwie metody oceny dokładności przeznaczone dla administracyjnych systemów WIM: charakterystykę niezawodności i przedziały tolerancji. O ile charakterystyka niezawodności była opisywana w moich poprzednich artykułach, to o przedziałach tolerancji piszę po raz pierwszy. Za wyborem tych metod przemawiają trzy argumenty:

- mają mocne podstawy teoretyczne,
- ocenie podlega składowa systematyczna i losowa błąd,
- są proste, nie wymagają skomplikowanych obliczeń, a w przypadku charakterystyki niezawodności nie jest konieczne testowanie założenia o normalnym charakterze błędów.

Ponadto wspólną wadą stosowanych obecnie metod oceny dokładności jest ich oparcie na wynikach uzyskanych w przeszłości, podczas kalibracji systemu WIM lub testu wykonanego tuż po kalibracji. Tymczasem dla użytkownika systemu istotna jest dokładność aktualnych (tj. uzyskanych w dowolnym czasie po kalibracji) wyników pomiarowych, dostarczanych przez system podczas jego normalnej pracy. Zadanie oceny dokładności administracyjnych systemów WIM zostało więc sformułowane następująco: na podstawie wyników zgromadzonych w trakcie kalibracji (lub testu po kalibracji) systemu WIM należy wyznaczyć granice przedziału statystycznego, wewnątrz którego znajdują się błędy zadanej części (np. 0.95) przyszłych wyników ważenia. Do tego celu służy metoda przedziałów

tolerancji, której idea sięga lat 40-tych XX wieku, jednak do tej pory nie była powszechnie stosowana w metrologii. W kontekście oceny błędów systemów WIM, zaproponowano aby za kryterium dokładności przyjąć wartość maksymalną niesymetrycznego przedziału tolerancji, oraz przedziałów rozszerzonych.

Znaczenie poprawnej oceny dokładności administracyjnych systemów WIM ma jeszcze jeden wymiar. Otóż dopuszczalne przepisami wartości nacisku osi oraz masy całkowitej pojazdów, muszą być zwiększone o wartość błędu systemu. Taki zabieg jest konieczny ze względu na wymaganą ostrożność. Zachowanie tej ostrożności pozwala uniknąć błędu polegającego na uznaniu pojazdu normatywnego za przeciążony. Niedoszacowanie dokładności systemu może podważać jego wiarygodność i być podstawą odwołania formułowanego przez przewoźników podważających pomiar.

W artykule opisano wyniki badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych, które dały zbieżne wyniki i doprowadziły do podobnych wniosków. Symulacje przeprowadzono dla dwóch przypadków rozkładu błędów: niesymetrycznego względem zera (o wartości oczekiwanej błędu ważenia 0,15 i odchyleniu standardowym 0,1) oraz symetrycznego. Zbadano wpływ liczby pomiarów kontrolnych podczas kalibracji/testowania systemu na wyniki oceny dokładności uzyskane za pomocą przedziałów tolerancji, charakterystyki niezawodności i powszechnie stosowanego odchylenia standardowego. Aby uzyskać stabilne charakterystyki, symulacje powtórzono 1000 razy a wyniki uśredniono. Wykazano w ten sposób, że najmniej wiarygodną oceną dokładności systemu, czyli taką która może zaniżyć rzeczywiste błędy, jest podwojone odchylenie standardowe. Lepszą oceną pod tym względem jest błąd  $\delta_{95\%}$ , a najlepszą rozszerzony przedział tolerancji.

W drugiej części pracy przedstawiano wyniki studium przypadku oceny dokładności systemu MS-WIM. Rozpatrzono dwa przypadki. Jeden typowy dla procesu kalibracji, kiedy gromadzi się około 30 wyników dynamicznego ważenia pojazdów wstępnie zważonych. I drugi, gdzie zgromadzono ponad tysiąc takich wyników. Ocena dokładności systemu WIM w obydwu przypadkach zawsze była bardziej ostrożna z wykorzystaniem kryterium błędu  $\delta_{95\%}$  (wartość 0,12) i rozszerzonego przedziału tolerancji (0,18), niż w przypadku podwojonego odchylenia standardowego (0,11).

### **Podsumowanie najważniejszych osiągnięć naukowych i wniosków**

- Jako pierwszy zauważyłem, że dokładność ważenia w systemach WIM zależy od dwóch składowych. Wprowadziłem do literatury przedmiotu pojęcia błędu wewnętrznego i zewnętrznego.
- Z występowaniem błędu zewnętrznego powiązałem układ czujnik nacisku/nawierzchnia drogi. Udowodniłem, że dokładności systemów WIM nie można analizować w oderwaniu od właściwości nawierzchni, która jest częścią systemu pomiarowego.
- Badania pod kątem oceny błędu zewnętrznego prowadziłem z wykorzystaniem opracowanej przeze mnie metody pojazdów odniesienia (charakterystycznych). Pozwoliło to, na uzyskanie nowatorskich wyników pod względem ilościowym.
- Unikalny charakter mają wyznaczone przeze mnie charakterystyki temperaturowe systemów WIM w technologiach polimerowej, kwarcowej i tensometrycznej (płytkowej). Wyniki takie, uzyskane za pomocą jednej, spójnej metodologii pojazdów odniesienia, nie mają odpowiednika w literaturze.
- W pracy [10] opublikowanej w prestiżowym czasopiśmie Sensors (IF: 2.67) oraz w najlepszym artykule konferencji ICWIM7 [8] zaprezentowałem wyniki badań, z których wynikało, że systemy WIM są podatne na zmiany temperatury nawierzchni, niezależnie od technologii

czujników. Są to oryginalne wnioski, burzące dotychczasowy pogląd o czujnikach kwarcowych i tensometrycznych.

- W tych samych pracach przedstawiłem innowacyjne spojrzenie na systemy wieloczujnikowe. Jako pierwszy zauważyłem, że na stanowisku MS-WIM może występować gradient temperatury wzdłuż i w poprzek pasa ruchu, w którym zainstalowane są czujniki. Ilościowo wykazałem, jaki dodatkowy błąd może wносить to zjawisko do błędu zewnętrznego.
- W obszarze systemów wieloczujnikowych MS-WIM wykazałem również, że powszechnie stosowana zasada „im więcej czujników nacisku osi tym lepiej” nie zawsze obowiązuje. Na podstawie pomiarów i symulacji pokazałem, że na charakterystyce błędu może występować minimum dla określonej liczby czujników.
- Dzięki metodologii pojazdów odniesienia (charakterystycznych) opisałem w sposób jakościowy i ilościowy wpływ prędkości pojazdów na dokładność ważenia w systemach WIM. Wyznaczone w szerokim zakresie prędkości (45km/h – 90km/h) charakterystyki dla wszystkich obecnie stosowanych technologii czujnikowych, są unikalne w literaturze przedmiotu. W połączeniu z charakterystykami temperaturowymi dają dwuwymiarowy obraz oddziaływania czynników zakłócających na pomiar dynamicznych nacisków osi.
- Precedensowe są wyniki moich badań w zakresie dokładności wyznaczania wartości wzorców, używanych w procesie kalibracji systemów WIM. Okazało się bowiem, że statyczne wagi legalizowane mogą nie spełniać wymagań metrologicznych im stawianym. W celu ograniczenia wpływu tego zjawiska, zaproponowałem metodologię statycznego pomiaru nacisków osi pojazdów wstępnie zważonych.
- W pracy [4] przedstawiłem symulacyjne podejście do badania systemów WIM z wykorzystaniem nowatorskiej metodologii. Dzięki zastosowaniu zbudowanego przeze mnie modelu parametrycznego systemu WIM, oraz generowaniu sygnałów pomiarowych w oprogramowaniu Adams/Car, uzyskałem unikatowe wyniki, których nie da się otrzymać w rzeczywistym systemie. Na przykład sprawdziłem jak pogorszenie jakości nawierzchni wpływa na dokładność ważenia w tym samym systemie WIM.
- Do oceny dokładności systemów WIM zaproponowałem metodę charakterystyki niezawodności i przedziałów tolerancji. Wykazałem zalety proponowanych sposobów nad metodą COST323, której słabym punktem są założenia przyjmowane a priori przez badacza.
- Sformułowałem zalecenia techniczne (i częściowo formalne) jakim powinny odpowiadać administracyjne systemy WIM, szczególnie w kontekście metrologicznym. O pozytywnym przyjęciu wyników moich badań i opinii świadczy wyróżnienie pracy [8], przez ekspertów zajmujących się tematyką systemów WIM, na konferencji w Brazylii w 2016 roku. W roku 2018 zostałem zaproszony do panelu ekspertów ISWIM, na targach Intertraffic w Amsterdamie, a obecnie jestem członkiem komitetu naukowego konferencji ICWIM8 w Pradze.
- Opracowałem innowacyjne metody autokalibracji i korekcji temperaturowej (w doktoracie), oraz kalibracji wielopunktowej systemu WIM, o czym pisałem w [3]. Wszystkie te metody pozwalają na co najmniej kilkukrotną poprawę dokładności ważenia w niestacjonarnych systemach WIM. Metoda kalibracji 5-cio punktowej w przypadku systemu 16-czujnikowego pozwoliła uzyskać dokładność na poziomie  $\pm 2\%$ .

### **Aspekt praktyczny i zastosowanie**

Praktyczne zastosowanie wyników moich badań, poza oczywistym obszarem administracyjnych systemów WIM, obejmuje jeszcze dwa pola: ocenę trwałości zmęczeniowej nawierzchni drogi oraz mechaniczno – empiryczne projektowanie nawierzchni drogowej.

W zakresie administracyjnych systemów WIM prowadzone badania zaowocowały przede wszystkim zmianą poglądów użytkowników na właściwości metrologiczne wag dynamicznych. Zaczęto dostrzegać, że dokładność wyników ważenia nie jest stała w systemach WIM, ale zależy między innymi od temperatury nawierzchni i prędkości pojazdów. Problemem zainteresował się producent czujników kwarcowych, firma Kistler, z którą w 2017 roku prowadziłem konsultacje na ten temat. Ponadto opracowane przeze mnie algorytmy i zalecenia są obecnie stosowane przez producentów systemów WIM. Od czasu opublikowania mojego doktoratu oraz prac [P.15], [P.16], algorytm autokalibracji, którego jestem autorem jest powszechnie implementowany w systemach ważących. Wszyscy liczący się na rynku producenci np.: Neurosoft (Polska), Cross i Camea (Republika Czeska), TDS (Niemcy), oraz CAT Traffic (USA/Polska) stosują autokalibrację w celu ograniczenia wpływu czynników zakłócających na dokładność ważenia. Uważam to za jeden z ważniejszych, wymiernych efektów mojej pracy naukowej. W latach 2017/2018 kierowałem projektem realizowanym wspólnie z firmą Neurosoft, pod tytułem „Inteligentny Neuronowy System Ważenia Pojazdów w Ruchu o wysokiej Dokładności - NEUROWIM”, który był finansowany przez MNiSzW. Celem projektu było opracowanie struktury super – dokładnego systemu WIM, oraz nowych algorytmów autokalibracji. Projekt ten zakończył się sukcesem, a część opracowanych rozwiązań jest już aplikowana w systemach WIM montowanych w Niemczech. Obecnie (rok 2019) współpracuję z dwiema firmami tj.: Neurosoft i CAT Traffic. Prowadzone badania dotyczą opracowania ulepszonych algorytmów kompensacji czynników zakłócających oraz autorskich rozwiązań komputerów wagowych WIM. Ścisłą współpracę również z GUM i GITD w przedmiocie implementacji zaleceń dotyczących administracyjnych systemów ważących pojazdy w ruchu.

Drugi obszar zastosowania wyników moich badań dotyczy Inżynierii Drogowej, a konkretnie tej jej części, która zajmuje się oceną trwałości zmęczeniowej nawierzchni drogi. W tym zakresie podjąłem współpracę z pracownikami Instytutu Inżynierii Drogowej i Kolejowej, Politechniki Krakowskiej. Efektem wspólnych badań są dwie prace. Celem pierwszej z nich [P.17] było określenie wpływu sezonowej zmienności natężenia ruchu pojazdów ciężkich w połączeniu ze zmiennością temperatur w ciągu roku, na trwałość zmęczeniową podatnych nawierzchni drogowych. Podstawą przeprowadzonej analizy były opracowane przeze mnie wyniki ważenia z 10 stacji WIM. Badania dotyczyły dróg z podbudową z kruszywa niezwiązanego oraz z górnymi warstwami wykonanymi w całości z mieszanek mineralno-asfaltowych. W pracy przeanalizowano wpływ zmienności temperatury i natężenia ruchu podczas doby na trwałość zmęczeniową takich nawierzchni. Wnioski końcowe mają charakter stosowany. Dotyczą one przede wszystkim porównania obliczonych trwałości zmęczeniowych w zależności od zmienności temperatur i natężeń ruchu pojazdów ciężkich, a także zasadności ujednolicenia temperatury ekwiwalentnej, przyjmowanej do projektowania konstrukcji nawierzchni w Polsce. Główny wniosek pracy jest taki, że obliczenia trwałości zmęczeniowej powinny być wykonywane w oparciu o dane empiryczne z systemów WIM, a nie uogólnionych, katalogowych współczynników.

Przeprowadzona przeze mnie analiza dokładności administracyjnych systemów WIM znalazła zastosowanie w ocenie wpływu skuteczności eliminacji z ruchu pojazdów przeciążonych na trwałość zmęczeniową nawierzchni. Tematu tego dotyczy drugi artykuł [P.18] napisany wspólnie z pracownikami Politechniki Krakowskiej. Przeprowadzone badania mają charakter pionierski, gdyż dotąd nikt nie próbował w taki sposób ocenić korzyści płynących z zastosowania WIMów w celach administracyjnych. U podstaw przeprowadzonej analizy było założenie, że rzeczywisty okres eksploatacji nawierzchni przed wystąpieniem stanu granicznego nośności, zależy od przeniesionych obciążeń osi pojazdów. Z drugiej strony wiadomo, że skuteczność eliminacji z ruchu pojazdów przeciążonych jest skorelowana ze skutecznością systemów ważących, a ta zależy między innymi od dokładności ważenia. Z kolei dokładność ważenia, co wykazałem w swoich pracach, zależy od liczby

czujników nacisku. Łącząc obydwie teorie ze sobą odpowiedzieliśmy na bardzo istotne pytanie, mające charakter praktyczny: jak dokładność ważenia (liczba czujników nacisku) przekłada się na efektywność eliminacji z ruchu pojazdów przeciążonych, a w konsekwencji na trwałość zmęczeniową nawierzchni drogi? Odpowiedź zawiera się w dwóch charakterystykach łączących trwałość konstrukcji nawierzchni drogowej z dokładnością ważenia pojazdów w ruchu (liczbą czujników). Pierwsza z nich dotyczy nawierzchni podatnych (powszechnie nazywanych asfaltowymi) druga nawierzchni sztywnych (betonowych). Z przeprowadzonych obliczeń wynikają bardzo ciekawe wnioski o charakterze praktycznym i ekonomicznym. Otóż przy zastosowaniu dwóch czujników nacisku osi w systemie (dokładność ważenia 10,6%) eliminacja pojazdów przeciążonych z ruchu drogowego daje wzrost trwałości zmęczeniowej nawierzchni podatnej o 17%, a nawierzchni sztywnej o 33%. Dla systemu 16-sto czujnikowego (dokładność ważenia 3,7%), korzyść ze stosowania administracyjnych WIMów wydłuża czas życia nawierzchni odpowiednio o 50% i 200%. Liczby te mogą być podstawą analizy ekonomicznej ukierunkowanej na obliczenie wymiernych korzyści finansowych z tytułu rzadziej prowadzonych napraw i remontów nawierzchni drogowej. Ponadto w przypadku istniejących dróg możliwe jest monitorowanie ich stanu poprzez pomiary nacisku osi pojazdów w ruchu za pomocą systemów Weigh-in-Motion (WIM).

Trzeci obszar zastosowania wyników moich badań dotyczy mechanistyczno – empirycznej metody projektowania nawierzchni drogowych zgodnie z przewodnikiem Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG). Metoda ta jest względnie nowa na tle klasycznego podejścia do projektowania nawierzchni i umożliwia prognozę stanu uszkodzeń drogi w czasie jej eksploatacji (spękania zmęczeniowe, deformacje trwałe). Algorytm projektowania nawierzchni w metodzie MEPDG uwzględnia reakcje nawierzchni (naprężenia, odkształcenia i ugięcia) do obliczeń przyrostu uszkodzeń w czasie. Procedura bazuje na danych empirycznych w tym na tzw. widmach obciążenia nawierzchni, które pozyskuje się ze stacji dynamicznego ważenia pojazdów WIM. Ponieważ do tej pory nie przeprowadzono analizy wpływu dokładności wyników pozyskiwanych z systemów WIM na efekty projektowania nawierzchni metodą MEPDG, to obecnie (marzec 2019) takie badania prowadzę we współpracy z dr. Dawidem Rysiem z Politechniki Gdańskiej. Do tego celu stworzyłem nowy model niepewności pomiarowych w systemach ważących pojazdy w ruchu. Prace obliczeniowe trwają, a wyniki w formie publikacji, są spodziewane w trzecim kwartale 2019 roku.

## **Epilog**

Proces badania i w konsekwencji rozwoju systemów WIM jest długotrwały. Wynika to z faktu, że wszystkie eksperymenty mają charakter polowy. Są one prowadzone w większości przypadków na drogach będących w normalnym użyciu, a badań laboratoryjnych w zasadzie nie prowadzi się.

Tematyka systemów dynamicznego ważenia pojazdów jest obecna w mojej pracy naukowej od początku, tj. roku 2005. W doktoracie zaproponowałem dwie metody kompensacji wpływu czynników zakłócających na dokładność ważenia w systemach WIM. Metody te są dzisiaj stosowane przez większość producentów, a moja praca doktorska, pomimo, że nie została oficjalnie wydana, jest indeksowana w bazie Google Scholar (cytowana co najmniej 17 razy). Po doktoracie, od roku 2010, konsekwentnie zajmuję się analizą metrologiczną administracyjnych systemów WIM. Na większość pytań, postawionych we wstępie tego opracowania, udało mi się odpowiedzieć. Tak zgromadzona wiedza, przyczyniła się do weryfikacji części poglądów na temat stabilności parametrów systemów WIM oraz do sformułowania zaleceń dla administracyjnych systemów ważących pojazdy w ruchu. Dzięki wynikom moich badań, oraz aktywności zespołu, którego jestem członkiem, dzisiaj jesteśmy bliżej wprowadzenia systemów administracyjnych w Polsce niż kiedykolwiek wcześniej. W swoich

pracach poruszyłem wszystkie, najistotniejsze z punktu widzenia dokładności ważenia, zagadnienia metrologiczne. Od dokładności wzorców używanych do kalibracji, po wrażliwość systemów WIM na czynniki zakłócające. W każdym przypadku proponowałem metody, bądź formułowałem zalecenia, ograniczające niekorzystny wpływ tych czynników na system.

Obecnie systemy ważące pojazdy w ruchu wyposażone w dwa do czterech czujników nacisku osi osiągają dokładność 5% dla pomiaru masy całkowitej i 7% dla nacisków osi. Dalsze zwiększanie dokładności ważenia wymaga subtelnych działań w zakresie konstrukcji systemów WIM, jak również algorytmicznej obróbki sygnałów pomiarowych. Badania ukierunkowane na taki cel były przedmiotem projektu badawczo – rozwojowego zrealizowanego w latach 2017/2018 w kooperacji AGH – Neurosoft. Pełniłem w tym projekcie funkcję kierownika. Wnioski z tych badań będą publikowane w przyszłości.

Ponadto w ramach aktywności Zespołu do Spraw Administracyjnych Systemów WIM (ZAS-WIM) przy Kłastrze ITS, pozyskano w roku 2017 środki (przyznane na rok 2018), w wysokości 2,3 mln złotych na budowę nowego 8-mio czujnikowego badawczego stanowiska WIM. Jako kierownik tego projektu opracowuję obecnie koncepcję prowadzenia nowych badań nad super – dokładnymi wagami dynamicznymi w technologiach kwarcowej i tensometrycznej (płytkowej).

Zalecenia, które sformułowałem dla administracyjnych systemów Weigh-in-Motion, przyczyniły się do weryfikacji poglądów nie tylko przez producentów systemów WIM, ale również środowisko naukowe i instytucje metrologiczne. Dyskusje na ten temat prowadziłem jako członek panelu ekspertów podczas spotkania organizacji ISWIM w Amsterdamie w 2018 roku, podczas targów Intertraffic. Doszliśmy wtedy do wniosku, że od strony technicznej wagi dynamiczne są niemal gotowe do dokładnego, administracyjnego ważenia pojazdów, jednak dostosowania wymagają przepisy prawa. Stoimy więc u progu wprowadzenia systemów WIM do użytku administracyjnego. Zespół którego jestem członkiem prowadzi w tym zakresie konsultacje nie tylko z producentami systemów WIM, ale również Głównym Urzędem Miar, Głównym Inspektorem Transportu Drogowego i Generalną Dyrekcją Dróg Krajowych i Autostrad. Ostatnie spotkanie odbyło się marcu 2019 roku w Warszawie.

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych (artystycznych)

Od początku moja droga naukowa była związana z wagami Weigh-in-Motion. Pierwsze badania w tym zakresie rozpocząłem podczas realizacji pracy magisterskiej. Moim celem była symulacyjna ocena statystycznej kalibracji systemów WIM. Podstawą przeprowadzonych badań były wyniki pomiarowe uzyskane ze stanowiska do pomiarów statycznych oraz systemu ważącego WIM, który był zainstalowany w miejscowości Wola Dębińska. Zadanie badawcze zakończyło się sukcesem – wyznaczyłem model wagi dynamicznej z czujnikami polimerowymi, opracowałem algorytm kalibracji statystycznej i oeniłem jego cechy na drodze symulacji. Badania modelowe zostały zweryfikowane przez porównanie wyników z pomiarami. Wyniki badań, już jako pracownik Katedry Metrologii AGH, opublikowałem razem z moim promotorem prof. dr hab. Januszem Gajdą w materiałach konferencji Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych, która odbyła się w Krynicy w 2005 roku.

Moje pierwsze osiągnięcia naukowo badawcze oraz pasja poznawania i modelowego opisu otaczającego świata motywowały mnie do prowadzenia dalszych badań w zakresie systemów Weigh-in-Motion. W latach 2006 – 2009 brałem udział w projekcie pod tytułem „System pomiarowy o zmiennej strukturze do pomiaru parametrów ruchu drogowego”, który był finansowany przez MNiSzW. W ramach projektu zespół, którego byłem członkiem, opracował system pomiarowy, którego

innowacyjność polegała na tym, że jego struktura nie była z góry ustalona, ale mogła być dobierana przez użytkownika w zależności od bieżących potrzeb. System składał się z jednostki centralnej oraz dziewięciu wymiennych modułów kondycjonowania sygnałów z czujników pomiarowych. W zależności od potrzeb i użytego modułu użytkownik mógł mierzyć różne zestawy parametrów pojazdów w tym naciski osi i masę całkowitą. Zamysłem było skonstruowanie urządzenia pomiarowego, które charakteryzowałaby elastyczność doboru komponentów i algorytmów przetwarzania sygnałów z czujników, co zakończyło się sukcesem.

Równolegle do aktywności w ramach projektu, prowadziłem badania w kierunku opracowania algorytmów poprawy dokładności ważenia w systemach Weigh-in-Motion. Dostrzegając rangę problemu niestacjonarności WIMów, ta problematyka badawcza stała się treścią moich zainteresowań i tematem pracy doktorskiej. Moim głównym celem naukowym stało się opisanie właściwości systemów WIM wyposażonych w polimerowe czujniki nacisku pod kątem ich niestacjonarności oraz opracowanie metod eliminacji wpływu niestacjonarności systemu na dokładność wyników ważenia. W pracy doktorskiej zaproponowałem dwie nowe metody realizujące to zadanie: autokalibrację oraz korekcję temperaturową wyników ważenia. Do największych osiągnięć naukowo-badawczych uzyskanych podczas realizacji pracy doktorskiej zaliczam:

- Zbudowanie modelu systemu WIM oraz jego parametryczną identyfikację. Oryginalność zaproponowanej metody identyfikacji polegała na wykorzystaniu jako wymuszenia wartości oczekiwanej nacisku I-szej osi pojazdów odniesienia, oraz sygnałów, które normalnie uznano by za zakłócające tj.: temperatury nawierzchni oraz układu kondycjonowania. Weryfikacja dokładności modelu w sensie skutecznego błędu względnego wykazała różnice między systemem a modelem na poziomie 1,14%.
- Opracowanie kryterium wyboru pojazdów odniesienia z wykorzystaniem danych pomiarowych z systemów WIM oraz wyznaczenie wartości referencyjnej nacisku I osi tych pojazdów.
- Opracowanie metody autokalibracji systemów WIM, z zastosowaniem rekursywnego algorytmu LS z wykładniczym zapominaniem. W algorytmie tym wprowadzono modyfikację polegającą na adaptacyjnym doborze współczynnika zapominania, co przyniosło poprawę dokładności estymacji o 66%.
- Opracowanie metody korekcji temperaturowej wyników ważenia na podstawie charakterystyki temperaturowej systemu WIM.
- Opracowanie autorskiego algorytmu automatycznej klasyfikacji pojazdów ALT, którym zastosowano miary rozmyte i funkcje przynależności. Algorytm wykorzystywał wyniki pomiaru wymiarów geometrycznych pojazdów z systemu WIM.

Wyniki symulacyjne, a przede wszystkim eksperymentalne, które przedstawiłem w pracy dowiodły postawionych tez. Zastosowanie obydwu metod, zaowocowało znaczącą poprawą dokładności wyników ważenia w systemie WIM. Względem kalibracji metodą pojazdów wstępnie zważonych, metoda korekcji temperaturowej dała dwukrotne, a metoda autokalibracji niemal sześciokrotne zwiększenie dokładności. Tak znaczne korzyści ze stosowania algorytmu autokalibracji zostały szybko dostrzeżone przez producentów systemów WIM. Aktualnie metoda ta jest stosowana przez wszystkich liczących się na rynku producentów systemów ważących. Moja praca doktorska, choć nigdy nie opublikowana, jest znana w środowisku i cytowana w pracach naukowych (baza Google Scholar 17 razy).

Zmotywowany pozytywnym odbiorem i licznymi aplikacjami moich algorytmów, w roku 2012 na konferencji ICWIM6 w Dallas opublikowałem pracę [P.16], która dotyczyła ulepszanego algorytmu autokalibracji.



W latach 2008 – 2010 brałem udział w projekcie zleconym przez Centralną Stacją Ratownictwa Górniczego w Bytomiu. Celem projektu było opracowanie nowej, cyfrowej wersji lokalizatora nadajników górniczych – urządzenia używanego podczas akcji ratunkowych w kopalniach w celu lokalizacji zasypianych górników. Moim pracom przyświecał więc niezwykle ważny cel jakim jest ratowanie ludzkiego życia. W ramach projektu opracowano model nowej bezkierunkowej anteny oraz cyfrowego, 8-mio kanałowego lokalizatora. Urządzenie to pracowało w sposób niemalże bezobsługowy, co było główną zaletą w stosunku do obecnie używanego lokalizatora GLOP, który wymaga precyzyjnego strojenia (co jest bardzo trudne w ciężkich warunkach akcji ratunkowej pod ziemią).

Poza moim głównym nurtem badawczym, w latach 2010 – 2013 brałem udział w projekcie pod tytułem „Wysokorozdzielcze algorytmy i systemy ważenia pojazdów samochodowych w ruchu”, który był finansowany przez MNIŚZW. Celem projektu było zweryfikowanie możliwości poszerzenia zbioru estymowanych parametrów pojazdów samochodowych na podstawie danych pomiarowych pochodzących z wieloczuJNIKOWEGO systemu MS-WIM. Problem sformułowany w projekcie miał jednak głębsze znaczenie i wpisywał się w moje zainteresowanie metodami identyfikacji obiektów i systemów. Otóż zagadnienie badawcze projektu można było określić przez pytanie o wnikliwość procesu identyfikacji w obliczu ograniczonej informacji o obiekcie zawartej w danych pomiarowych.

Moim zadaniem w projekcie było opracowanie algorytmów identyfikacji mechanicznego modelu dynamiki pojazdu samochodowego, na podstawie pomiaru nacisków jego osi za pośrednictwem wieloczuJNIKOWEGO systemu ważącego MS-WIM. Podstawą przeprowadzonych badań były symulacje zrealizowane w środowisku obliczeniowym Adams/Car (syntetyczne dane pomiarowe) oraz Matlab (algorytm identyfikacji). Do identyfikacji modeli pojazdów zastosowałem metodę strojonego modelu. Jednym z efektów projektu były algorytmy oceny maksymalnej wartości nacisku osi poruszającego się pojazdu. Podstawą takiej estymacji były wyniki pomiarowe uzyskane w systemie MS-WIM. Wyniki badań w tym zakresie zostały opublikowane w 2015 roku na konferencji IMEKO w Pradze [P.19].

## 6. Podsumowanie dorobku naukowego

Tabela 1. Liczba publikacji według kategorii.

Kategoria	Liczba publikacji		
	Przed doktoratem	Po doktoracie	Razem
Publikacje z bazy Web of Science w tym:	2	12	14
• z listy Journal Citation Reports (JCR)	0	8	8
• z indeksowanych konferencji	0	3	3
• pozostałe	2	1	3
Artykuły w czasopiśmie spoza bazy WoS	3	11	14
Książki (monografie), współautorstwo	0	2	2
Artykuły opublikowane w materiałach konferencyjnych	4	19	23
Przyjęte zgłoszenia patentowe	1	2	3
Patenty	0	1	1
<b>W sumie</b>	<b>10</b>	<b>47</b>	<b>57</b>


Tabela 2. Informacje o czasopismach z bazy JCR.

Czasopismo	Rok publikacji	Impact Factor (rok publikacji)	Pkt. MNiSzW (rok publikacji)	Liczba publikacji
Metrology and Measurement Systems	2007	Brak	Brak	2
	2010	0,587	9	2
	2011	0,764	20	1
	2013	0,609	20	1
	2018	1,523	20	1
Roads and Bridges	2015	Brak	11	1
Sensors	2016	2,677	30	1
	2017	2,475	30	1
IEEE ITS Magazine	2018	3,019	25	1
<b>W sumie</b>		<b>12,241</b>	<b>174</b>	<b>11</b>

Całkowita liczba punktów wg listy MNiSzW za dorobek naukowy wynosi **314**.

Tabela 3. Liczba cytowań i h-index

Baza	h-index	Liczba cytowań	Liczba cytowań bez autocytowań (w tym przez współautorów)
<b>Web of Science (11.04.2019)</b>	<b>5</b>	70	45
Scopus (10.04.2019)	<b>4</b>	48	26
Google Scholar (10.04.2019)	<b>8</b>	211	154

25.04.2019  


## 7. Bibliografia (dodatkowa)

- [P.1] J. C. Pais, S. I. R. Amorim, and M. J. C. Minhoto, "Impact of traffic overload on road pavement performance," *J. Transp. Eng.*, no. September, pp. 873–879, 2013.
- [P.2] D. Rys, J. Judycki, and P. Jaskula, "Analysis of effect of overloaded vehicles on fatigue life of flexible pavements based on weigh in motion (WIM) data," *Int. J. Pavement Eng.*, no. March, pp. 1–11, 2015.
- [P.3] A. Krusper and R. Thomson, "Crash compatibility between heavy foods vehicles and passenger cars: structural interaction analysis and In-depth accident analysis," in *Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles, 10th International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technologies*, 2008, pp. 269–280.
- [P.4] L. Poulidakos, K. Heutschi, and P. Soltic, "Enviromental Impact of Heavy Vehicles based on Noise, Acle Load and Gaseous Emissions," in *Proceedings of the International Conference on Weigh-In-Motion (ICWIM 6)*, 2012.
- [P.5] B. Taylor, A. Bergan, N. Lindgren, and C. Berthelot, "The importance of commercial vehicle weight enformcement in safety and road asset management," *Traffic Technol. Int.*, no. 2000 Annual Review, pp. 234–237, 2000.
- [P.6] H. van Loo, "WIM-Hand Project 1st Interim Report. Results of the first phase of the 'Weigh-In-Motion for direct Enforcement' project in 2000.," 2001.
- [P.7] B. Jacob and H. van Loo, "Weigh-in-Motion for enforcement in Europe," in *Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles, 5th International Conference on Weigh-in-Motion of Heavy Vehicles*, 2008, pp. 25–38.
- [P.8] E. Doupal, I. Kriz, R. Stamberg, and D. Cornu, "One Year 'WIM Direct Enforcement' Experiences in Czech Republic," in *6th International Conference on Weigh-In-Motion (ICWIM 6)*, 2012, pp. 138–145.
- [P.9] E. Doupal, Z. Adameova, and I. Kriz, "Start of direct enforcement in the czech republic," in *ICWIM7 7th International Conference on Weigh-in-Motion & PIARC workshop : Foz do Iguaçu*, 2016.
- [P.10] P. Horny, S. Jean-Michel, P. Jean-Michel, C. Louis-Marie, and G. Ivan, "Evaluation of Weigh in Motion sensors on the IFSTTAR accelerated testing facility," in *ICWIM7 7th International Conference on Weigh-in-Motion & PIARC workshop : Foz do Iguaçu*, 2016.
- [P.11] S. Dawid, "Weighty matters," *Traffic Technol. Int.*, no. June/July, pp. 46–52, 2014.
- [P.12] S. Wordsworth, "Scales of justice," *Traffic Technol. Int.*, no. June/July, 2018.
- [P.13] J. Gajda, P. Burnos, and R. Sroka, "Administracyjne systemy dynamicznego wazenia pojazdów," *Drognictwo*, no. 7–8, pp. 240–245, 2016.
- [P.14] "NMi International WIM standard. Specifications and test procedures for Weigh-in-Motion Systems.," Dordrecht, Netherlands, 2016.
- [P.15] P. Burnos, "Auto-calibration and temperature correction of WIM systems," in *Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles, 5th International Conference on Weigh-in-Motion of Heavy Vehicles*, 2008, pp. 437–446.

- [P.16] P. Burnos, "Enhanced autocalibration of WIM systems," in *Proceedings of the International Conference on Weigh-In-Motion (ICWIM 6)*, 2012, pp. 197–208.
- [P.17] M. Splawinska, P. Zielinski, and P. Burnos, "Influence of Traffic Flow Variability of Heavy Vehicles and Temperature on Pavement Fatigue Life," *Roads Bridg. - Drog. i Most.*, vol. 14, no. 2, pp. 117–132, 2015.
- [P.18] P. Zielinski, M. Splawinska, P. Burnos, and J. Gajda, "Influence of the overloaded vehicles elimination on the road pavement durability," in *CETRA 2018 International conference on Road and rail infrastructure : 17-19 May 2018, Zadar, Croatia*, 2018, pp. 425–431.
- [P.19] J. Gajda, P. Burnos, and T. Zeglen, "Measurement of the maximum force exerted by the vehicle wheels on the road pavement," in *XXI IMEKO World Congress "Measurement in Research and Industry"*, 2015.

25.09.2019

