

Autoreferat rozprawy doktorskiej

mgr inż. 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, Akademia Górniczo – Hutnicza w Krakowie, EAIiE

RECENZENCI: prof. dr hab. inż. Remigiusz Rak, Politechnika Warszawska - WE
prof. dr hab. inż. Adam Kowalewski, Akademia Górniczo – Hutnicza w Krakowie, EAIiE

W rozprawie doktorskiej autor opisał właściwości systemów ważących pojazdy samochodowe w ruchu WIM (Weigh In Motion - Ważenie w Ruchu), które współpracują z polimerowymi czujnikami nacisku. Zapotrzebowanie na tego typu systemy jest duże zarówno ze strony organów państwowych kontrolujących wagę pojazdów, jak również ośrodków badawczych zajmujących się pomiarami parametrów pojazdów w ruchu. Ze względu na to, że dotychczas nie rozwiązano problemu ograniczonej dokładności ważenia w systemach tego typu, autor szczególną uwagę zwrócił na niestacjonarność systemu jako przyczynę dużej niepewności pomiaru. Celem pracy było 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.

1. Cel i zakres pracy

Lawinowy wzrost natężenia ruchu drogowego, a w szczególności transportu ciężkiego na przestrzeni ostatnich dwudziestu lat, wymusza potrzebę efektywnej ochrony infrastruktury drogowej przed zniszczeniem. Jednym z podstawowych narzędzi takiej ochrony jest kontrola wagi pojazdów najcięższych, która polega na pomiarze nacisków poszczególnych osi oraz masy całkowitej pojazdu. Powszechnie używane do tego celu przenośne wagi statyczne są dokładne, a na podstawie pomiaru możliwe jest nałożenie kary na właściciela pojazdu. Wadą takiego rozwiązania jest mała efektywność kontroli, gdyż wykonanie pomiaru wymaga zatrzymania pojazdu. Alternatywną metodą kontroli wagi pojazdów są tak zwane systemy WIM (Weigh In Motion - Ważenie w Ruchu), których czujniki pomiarowe montowane są na stałe pod nawierzchnią jezdni, w głównym przekroju drogi. Taka budowa systemu umożliwi kontrolę wagi podczas ruchu pojazdu z prędkością drogową, często bez świadomego udziału kierującego. Podstawową wadą systemów WIM jest ograniczona dokładność ważenia wynikająca między innymi z: pionowych wahań pojazdu oraz niestacjonarności systemu, która wywołana jest zmiennością właściwości nawierzchni w której zamontowane są czujniki. Zjawisko to największego znaczenia nabiera w przypadku zastosowania

polimerowych czujników nacisku. Pośredniczenie asfaltu w przenoszeniu sygnału pomiarowego na czujnik powoduje, że wyniki ważenia są wrażliwe na zmiany konsystencji asfaltu, która następuje pod wpływem zmian temperatury. 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 dysertacji przedstawiono dwie nowe metody realizujące to założenie: autokalibrację systemów WIM oraz korekcję temperaturową wyników ważenia. Przystępując do realizacji wymienionego celu autor sformułował 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 prowadzonych badaniach autor wykorzystał dane pomiarowe z dwuczujnikowego systemu WIM zbudowanego w Katedrze Metrologii AGH i zamontowanego na drodze nr 81 w miejscowości Gardawice.

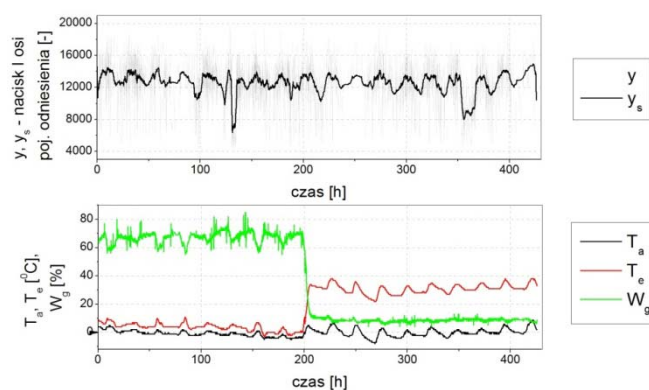
2. Ważenie pojazdów samochodowych w ruchu

W rozdziale drugim pracy zawarto wprowadzenie do szeroko rozumianej tematyki kontroli wagi pojazdów samochodowych. Opisano zjawisko oddziaływania pojazdów najcięższych na nawierzchnię oraz konsekwencję ruchu takich pojazdów na polskich drogach. Skalę problemu obrazują przytoczone przykłady (raport o stanie dróg krajowych), oraz wymienione czynniki potęgujące niszczący wpływ pojazdów najcięższych na nawierzchnię drogowe (wzrost natężenia ruchu drogowego, zmiany konstrukcyjne pojazdów, niedostosowanie infrastruktury drogowej w Polsce do wymogów UE). Opisano historię rozwoju systemów WIM oraz strukturę i budowę obecnie stosowanych systemów ważących. Omówiono właściwości używanych w systemach WIM czujników nacisku: kwarcowych, pojemnościowych, polimerowych oraz światłowodowych. Szczególną uwagę poświęcono czynnikom ograniczającym dokładność ważenia takim jak pionowe wahania pojazdu i przestrzenna powtarzalność nacisku osi, a przypadku systemów wyposażonych w polimerowe czujniki nacisku, zmiany czułości wzdłuż czujników oraz niestacjonarność systemu. Ostatniemu zjawisku można przeciwdziałać wykonując okresową kalibrację systemu metodą pojazdów wstępnie ważonych, pojazdów odniesienia lub pojazdu oprzyrządowanego. Te klasyczne metody kalibracji pozwalają zwiększyć dokładność uzyskiwanych wyników ważenia, są jednak czasochłonne i drogie, a przez to nieefektywne. W konsekwencji proces kalibracji systemów WIM z ich użyciem jest powtarzany nie częściej niż co kilka miesięcy co w obliczu niestacjonarności takich systemów jest niewystarczające. Poszukując alternatywnych, efektywnych metod kalibracji systemów WIM autor rozwinął ideę kalibracji z wykorzystaniem pojazdów odniesienia i sformułował hipotezę, że za wielkość odniesienia mogą służyć wyniki ważenia pewnej kategorii pojazdów biorących udział w ruchu drogowym. Pojazdy takie powinny charakteryzować się znaną wartością oczekiwaną masy całkowitej lub nacisku danej osi oraz dla poszczególnych pojazdów powinno występować możliwe małe względne losowe odchylenie od tych wartości. Na podstawie statystycznej analizy wyników ważenia

pojazdów z systemu WIM oraz Inspekcji Transportu Drogowego na pojazdy odniesienia wybrano pięciosiowe pojazdy członowe w skład których wchodzi dwuosiowy ciągnik siodłowy i trzyosiowa naczepa. Za wielkość odniesienia przyjęto wartość średnią nacisku I-szej osi tych pojazdów, która wynosi $\mu_0 = 61.670 \text{ kN}$. Pojazdy odniesienia jako „źródło” względnie stabilnej wielkości odniesienia są wykorzystywane w metodzie autokalibracji i korekcji temperaturowej.

3. Modelowanie systemu WIM z czujnikami polimerowymi

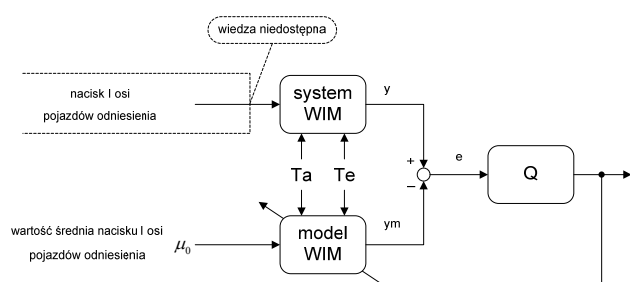
W rozdziale 3 opisano właściwości systemów WIM wyposażonych w polimerowe czujniki nacisku oraz wyznaczono model niestacjonarności systemu w Gardawicach. Rozważono wpływ trzech czynników atmosferycznych na wyniki ważenia y_s : temperatury asfaltu T_a , temperatury układu kondycjonowania sygnałów z czujników nacisku T_e oraz wilgotności powietrza W_g . Aby określić stopień oddziaływania wymienionych wielkości środowiskowych na właściwości systemu WIM autor wykonał eksperyment pomiarowy polegający na długoterminowej rejestracji wyników ważenia wielkości odniesienia oraz wielkości atmosferycznych. W dwusetnej godzinie pracy systemu aparatura pomiarowa została umieszczona w szczelnej obudowie, co wywołało gwałtowną zmianę T_e i W_g .



Rys. 1. Zmienność nacisku I-szej osi pojazdów odniesienia oraz wielkości środowiskowych

Pomimo wyraźnej zmiany warunków w dwusetnej godzinie pracy systemu, nie nastąpiła obserwowalna zmiana w wynikach ważenia. Brak korelacji pomiędzy T_e i W_g a y_s i duża wartość współczynnika korelacji między T_a i y_s równa 0.7 pozwoliła na 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.

Na podstawie wstępnych przesłanek co do przyczyn niestacjonarności, autor zbudował parametryczny model rzeczywistego systemu WIM. Dzięki znajomości struktury modelu była możliwa realizacja trzech celów: po pierwsze znajomość struktury modelu pozwoliła jednoznacznie określić przyczynę niestacjonarności, po drugie umożliwiło to lepsze zrozumienie tego dotychczas nieopisanego zjawiska, po trzecie bazując na wyznaczonym modelu możliwe było przeprowadzenie badań symulacyjnych metody autokalibracji i korekcji temperaturowej wyników ważenia. W pracy zaproponowano nową metodę identyfikacji niestacjonarności systemów WIM, której podstawą jest algorytm strojonego modelu. Oryginalność metody polega na wykorzystaniu jako wymuszenia wielkości odniesienia (nacisk I-szej osi pojazdów odniesienia) oraz dodatkowych sygnałów, które normalnie uznano by za zakłócające tj.: temperatury asfaltu oraz temperatury części analogowej. Dzięki temu wyznaczony model posiadał stałe współczynniki pomimo, że sam obiekt identyfikacji był niestacjonarny. Schemat identyfikacji systemu WIM przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat identyfikacji systemu WIM

Za kryterium dopasowania odpowiedzi modelu y_m do odpowiedzi systemu y przyjęto skuteczny błąd względny:

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

Za klasę modelu niestacjonarności systemu WIM autor przyjął:

$$y_m(i) = \mu_0 \cdot C(T_a^m, T_e^m) = \mu_0 \cdot \left(k \cdot 10^{w \cdot T_a(i)} + d \cdot T_e(i) \right) \quad (2)$$

gdzie:

$y_m(i)$ – obliczony wynik ważenia i -tego pojazdu z modelu systemu WIM,

$C(T_a^m, T_e^m)$ – model współczynnika kalibracji,

T_a – rejestracja temperatury asfaltu,

T_e – rejestracja temperatury „elektroniki”,

k, w, d – współczynniki modelu wyznaczane w procesie identyfikacji.

W procesie strojenia modelu obliczono wartości współczynników: $k=2.07$, $w=0.00504$, $d=0$, a skuteczny błąd względny dopasowania wyniósł 1.14% co wskazuje na bardzo dobre odwzorowanie właściwości systemu WIM w modelu. Uzyskany wynik wskazuje jednoznacznie, że niestacjonarność systemu jest wywoływana wyłącznie zmianami temperatury asfaltu.

Przeprowadzenie badań symulacyjnych wymagało ponadto zbudowania modeli pozostałych elementów systemu WIM, oraz wymuszenia. **Model chwilowej wartości nacisku osi** p^j na j -ty czujnik w systemie wyznaczono zakładając, że odległość między czujnikami wynosi Δ , a pojazd porusza się ze stałą prędkością V .

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

gdzie:

$j = 1, 2, 3 \dots$

P_0 – składowa stała – nacisk statyczny osi,

M – liczba składowych dynamicznych sygnału nacisku osi (przyjęto $M=2$),

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

Dla $M=2$ model zmian częstotliwości f_1 opisuje drgania tzw. masy zawieszonyj (kabina pojazdu), a f_2 nie zawieszonyj (koło pojazdu). Na podstawie danych pomiarowych z pojazdu oprzyrządowanego przyjęto, że rozkłady gęstości prawdopodobieństwa tych częstotliwości wynoszą:

$$f_1 : N(3.5, 5) \quad (4a)$$

$$f_2 : N(11.5, 8) \quad (4b)$$

gdzie $N(\mu, \sigma)$ oznacza rozkład normalny o wartości oczekiwanej μ i odchyleniu standardowym σ .

Model amplitudy drgań składowych dynamicznych

P_1 i P_2 zakłada zależność tych wielkości od prędkości pojazdu V :

$$\begin{aligned} P_1 &= a_1 \cdot V + b_1 \\ P_2 &= a_2 \cdot V + b_2 \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie: $a_1 = 0.0036$; $b_1 = 0.065$
 $a_2 = 0.0011$; $b_2 = 0.045$

Model rozkładu prędkości pojazdów odniesienia wyznaczono na podstawie rejestracji tej wielkości przez system ważący w Gardawicach. Najlepszą aproksymację

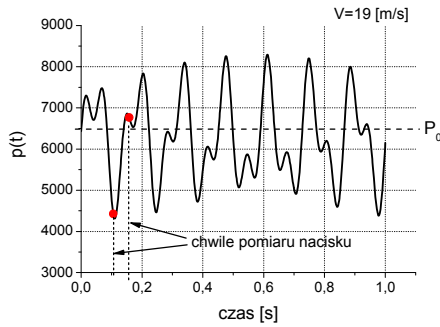
(estymator największej wiarygodności, poziom ufności 0.95) uzyskano dla rozkładu typu *extreme value*:

$$pr(V) = \sigma^{-1} \cdot e^{\left(\frac{V-\nu}{\xi}\right)} \cdot e^{\left(-e^{\frac{V-\nu}{\xi}}\right)} \quad (6)$$

gdzie: $\nu = 21.856 \pm 0.018$
 $\xi = 1.920 \pm 0.013$

Faza początkowa φ_i jest wybierana w sposób losowy z przedziału $[0; 2\pi]$.

Przykładowa zmienność nacisku osi wygenerowana na podstawie modelu (3) przedstawiona jest na rysunku 3 gdzie czerwonymi kropkami zaznaczono chwile „pomiaru” tego sygnału przez czujniki nacisku.



Rys. 3. Zmienność nacisku osi wygenerowana na podstawie modelu (3)

Model zmienności czynników atmosferycznych autor wyznaczył w oparciu o rejestracje z rzeczywistego systemu WIM, przyjmując sinusoidalną zmienność wahań dobowych tych wielkości z trendem długoterminowym wynikającym ze zmiany wartości średniej wskutek zmian pór roku. Za **model algorytmu estymacji nacisku statycznego** przyjęto estymator wartości oczekiwanej. Wyznaczony model niestacjonarności systemu WIM wraz z modelem wymuszenia został wykorzystany jako podstawa badań symulacyjnych, mających na celu określenie właściwości metod autokalibracji i korekcji temperaturowej.

4. Autokalibracja i korekcja temperaturowa wyników ważenia

W rozdziale czwartym przedstawiono ideę metody autokalibracji oraz korekcji temperaturowej systemów WIM. 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.

Idea metody **autokalibracji** polega na ciągłej estymacji współczynnika kalibracji C systemu WIM, oraz modyfikowaniu wyników ważenia zgodnie z aktualnie wyznaczoną estymatą:

$$y_s(i) = \frac{1}{C} \cdot y(i) \quad (7)$$

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.

Estymacja współczynnika kalibracji odbywa się z wykorzystaniem rekurencyjnego algorytmu LS z wykładniczym zapominaniem (8), a podstawą aktualizacji współczynnika C są wyniki ważenia I-szej osi pojazdów odniesienia.

$$\hat{C}_n = \hat{C}_{n-1} + K_n (y(n) - \mu_0 \cdot \hat{C}_{n-1}) \quad (8a)$$

$$b_n = 1/(\mu_0 \cdot P_{n-1} \cdot \mu_0 + \lambda_n) \quad (8b)$$

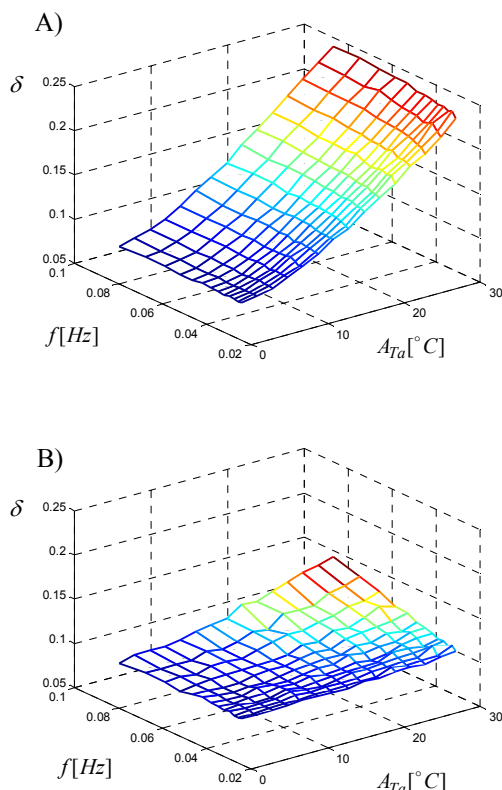
$$K_n = P_{n-1} \cdot \mu_0 \cdot b_n \quad (8c)$$

$$P_n = (P_{n-1} - K_n \cdot \mu_0 \cdot P_{n-1}) / \lambda_n \quad (8d)$$

Ze względu na właściwości dynamiczne algorytmu LS autor wprowadził modyfikację polegającą na uzależnieniu wartości współczynnika zapominania λ_n od odległości czasowych pomiędzy pojazdami odniesienia Δt_n . Na drodze badań symulacyjnych przebadano właściwości różnych rodzajów funkcji wagi $f(\Delta t_n)$ ostatecznie wybierając funkcję potęgową postaci:

$$\lambda_n = \lambda_0 \cdot f(\Delta t_n) = \lambda_0 \cdot [0.053 \cdot (\Delta t_n - 1.7)^4 + 0.55] \quad (9)$$

Na rysunku 4 przedstawiono charakterystykę obrazującą wpływ stopnia niestacjonarności systemu na dokładność wyników ważenia, przy czym wzrost niestacjonarności jest rozumiany jako wzrost amplitudy A_{Ta} i częstotliwości f zmian temperatury asfaltu. Rozważono algorytm ze stałą wartością λ_n oraz z modyfikacją (9).



Rys. 4. 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) zastosowanie algorytmu z modyfikacją wnosi dwukrotną poprawę dokładności ważenia względem algorytmu bez modyfikacji, ze stałą wartością $\lambda = 0.98$.

Drugą opisaną w pracy metodą ograniczającą wpływ zmian temperatury na dokładność ważenia jest **korekcja temperaturowa**. Metoda ta wymaga znajomości modelu charakterystyki temperaturowej stanowiska WIM. Charakterystykę taką wyznaczono w sposób doświadczalny w oparciu o pomiar wyników ważenia I-szej osi pojazdów odniesienia. Każdy punkt na rysunku 5 (dane pomiarowe) to średni wynik ważenia I-szej osi tysięcy pojazdów odniesienia w wybranej temperaturze asfaltu. Do danych pomiarowych dopasowano model postaci:

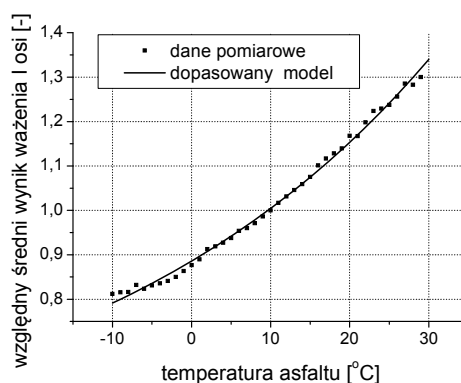
$$C_T(T_a) = k_T \cdot 10^{w_T \cdot (T_a)} + b_T \quad (10)$$

gdzie:

$k_T = 0.4659$ – współczynnik wzmocnienia,

$w_T = 0.0098$ – współczynnik nachylenia krzywej,

$b_T = 0.4199$ – offset.



Rys. 5. Charakterystyka temperaturowa systemu WIM

Znajomość modelu charakterystyki temperaturowej danego stanowiska WIM pozwala na wprowadzenie do wyników ważenia korekty względem temperatury, zgodnie z zależnością:

$$y_{ST}(i) = \frac{1}{C_0 \cdot C_T(T_a)} \cdot y(i) \quad (11)$$

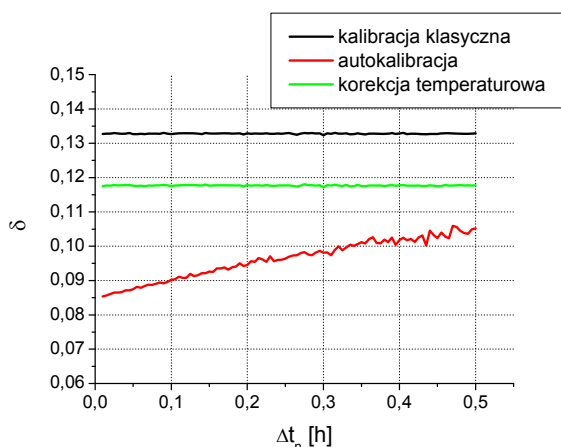
gdzie:

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

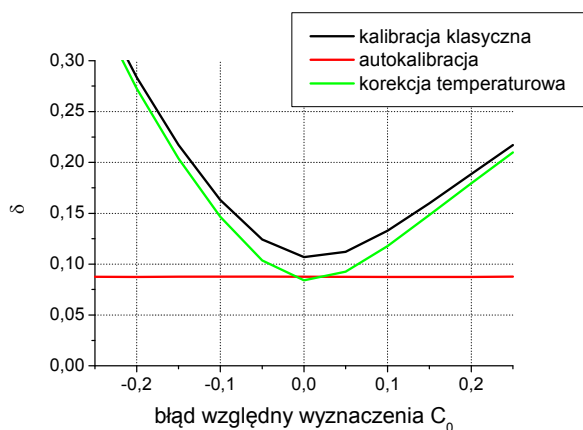
$y_{ST}(i)$ – skalibrowany i -ty wynik ważenia uwzględniający korektę temperaturową, tj. masa całkowita pojazdu lub nacisk statyczny wybranej osi.

4.1 Badania symulacyjne

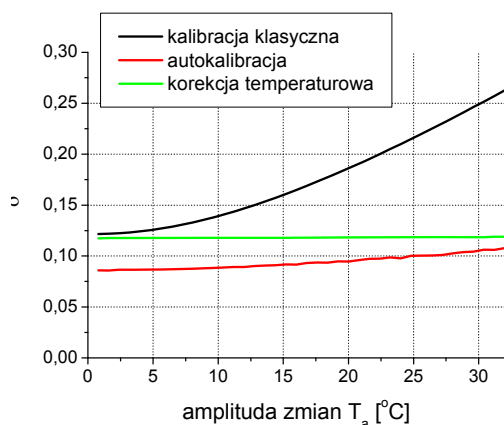
W dysertacji porównano właściwości autorskich metod autokalibracji i korekcji temperaturowej z powszechnie używaną metodą kalibracji z wykorzystaniem pojazdów wstępnie zważonych. Zbadano wrażliwość metod na zmiany 7 parametrów systemu ważącego takich jak: Δt_n [h] - odległość czasowa pomiędzy pojazdami odniesienia, δC_0 - błąd względny wyznaczenia współczynnika C_0 , $\delta \sigma_p$ - względne odchylenie standardowe symulowanego nacisku, $\delta \rho$ - względny błąd obciążenia wyników ważenia, $\delta \sigma_z$ - względna niejednorodność czułości polimerowych czujników nacisku, A_{T_a} [°C] - amplituda zmian temperatury asfaltu, f_{T_a} [Hz] - częstotliwość zmian temperatury asfaltu. Poniżej przedstawiono 3 spośród 7 charakterystyk.



Rys. 6. Wpływ odległości czasowych Δt_n na błąd wyników ważenia



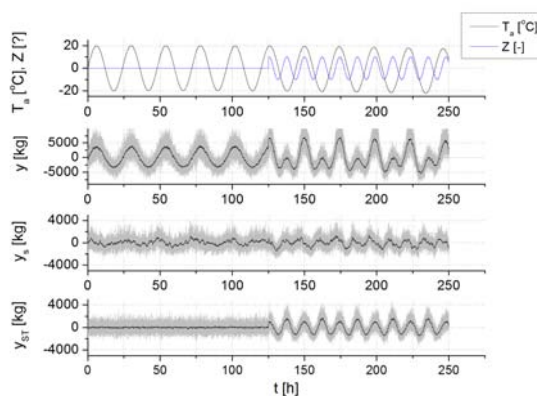
Rys. 7. Wpływ dokładności wyznaczenia współczynnika C_0 na błąd wyników ważenia



Rys. 8. Wpływ zmiany amplitudy temperatury asfaltu na błąd wyników ważenia

Wyniki symulacji wykazały jednoznacznie, że obydwie zaproponowane przez autora metody wnoszą średnio dwukrotną poprawę dokładności wyników ważenia

względem klasycznej metody kalibracji systemów WIM, niezależnie od zakresu zmian parametrów systemu. Najdokładniejsze wyniki ważenia uzyskano w systemie z autokalibracją, a następnie z korekcją temperaturową. Z punktu widzenia użytkownika systemu duże znaczenie odgrywa wrażliwość metody korekcji temperaturowej na dokładność wyznaczenia współczynnika kalibracji C_0 . Ponadto należy zaznaczyć, że korekcja temperaturowa pozwala wyłącznie na ograniczenie wpływu T_a na wyniki ważenia, podczas gdy autokalibracja ogranicza wpływ wszystkich czynników wywołujących niestacjonarność systemu. Zjawisko to jest zobrazowane na przebiegach czasowych z rysunku 9. Do modelu systemu WIM (2) autor wprowadził dodatkowy czynnik zakłócający Z (dowolnego pochodzenia). Obserwowano wyniki ważenia z systemu bez korekcji y , systemu z autokalibracją y_s i korekcją temperaturową y_{ST} (z wyników ważenia usunięto składową stałą).



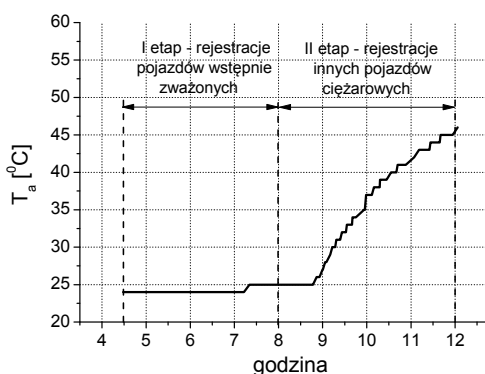
Rys. 9. Wpływ czynnika Z na wyniki ważenia

W wynikach ważenia korygowanych temperaturowo widać wyraźnie oddziaływanie wprowadzonego w 125 godzinie obserwacji czynnika Z . Zjawisko to niemal nie występuje w systemie z autokalibracją, czego dowodem jest trzykrotnie mniejsza wartość współczynnika korelacji pomiędzy zakłóceniem Z , a autokalibrowanymi wynikami ważenia (0,31) niż między Z , a wynikami korygowanymi temperaturowo (0,91).

5. Badania Eksperymentalne

W ostatnim rozdziale pracy opisano wyniki badań eksperymentalnych mających na celu ocenę dokładności wyników ważenia uzyskanych z systemu, w którym zaimplementowano badane algorytmy. Ta część badań została podzielona na dwa etapy. **Etap I** – to ocena dokładności systemu WIM polegająca na porównaniu wyników ważenia pojazdów z systemu WIM z wynikami ważenia tych samych pojazdów, które uzyskano na wadze

statycznej. Do tego celu użyto trzy zespoły wstępnie zważonych 5-osiowych pojazdów ciężarowych o różnych masach całkowitych, które wielokrotnie przejeżdżały przez stanowisko WIM z różnymi prędkościami. Ze względu na duże zachmurzenie w czasie pomiarów temperatura asfaltu nie ulegała dużym zmianom. W II-gim etapie eksperymentu pojazdy wstępnie zważone nie były dostępne, w związku z czym ocena dokładności systemu WIM polegała na porównaniu wyników ważenia pojazdów odniesienia z systemu WIM ze średnimi wartościami wyników ważenia tych pojazdów w I etapie pomiarów. Ze względu na roz pogodzenie temperatura asfaltu w II etapie gwałtownie wzrosła. Efekt ten, jak również podział na dwa etapy rejestracji danych pomiarowych ilustruje rysunek 10.



Rys. 10. Zmienność temperatury asfaltu podczas trwania eksperymentu

Do oceny dokładności wyników ważenia, podobnie jak w badaniach symulacyjnych, autor użył kryterium skutecznego błędu względnego (1). W kolejnych tabelach symbole δ_{klas} , δ_{auto} , δ_{kor} oznaczają odpowiednio skuteczny błąd względny wyznaczony dla wyników ważenia w systemie kalibrowanym metodą klasyczną, w systemie z autokalibracją i korekcją temperaturową. Dodatkowo autor posłużył się charakterystyką niezawodności zdefiniowaną zależnością (12), która pozwala określić prawdopodobieństwo wystąpienia błędu względnego o wartości większej lub równej γ .

$$Pr(\gamma) = 1 - P(\gamma) \quad (12)$$

gdzie:

$$\gamma = \left| \frac{y_{Si} - P_{Si}}{P_{Si}} \right| - \text{bezwzględna wartość względnego błędu}$$

ważenia,

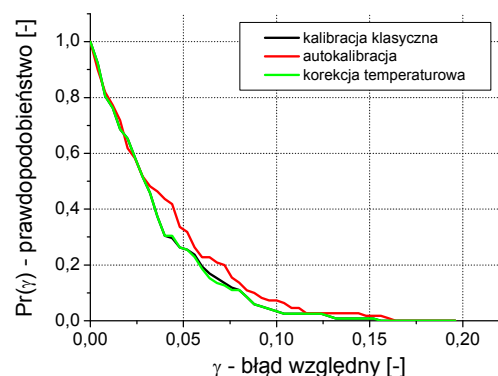
P_{Si} – wielkość odniesienia (wynik ważenia na wadze statycznej lub wartość średnia wyznaczona w I etapie eksperymentu),

$P(\gamma)$ – dystrybuanta błędu γ .

Łączne wyniki uzyskane dla trzech pojazdów biorących udział w I etapie eksperymentu przedstawiono w tabeli 1 i na rysunku 11.

Tabela 1 Ocena dokładności wyników ważenia I etap

	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 c.	4.7	5.4	4.7



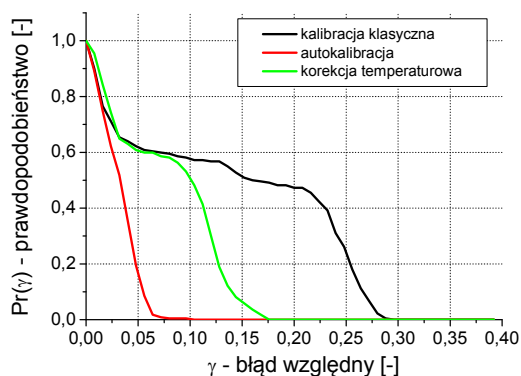
Rys. 11. Charakterystyka wiarygodności – etap I

Otrzymane na tym etapie rezultaty wskazują na porównywalną dokładność trzech badanych metod. Wynika to z faktu, iż w trakcie trwania I etapu eksperymentu temperatura asfaltu nie zmieniała się, a system był quasi-stacjonarny. Wyniki dowiodły jednak skuteczność metody autokalibracji i korekcji temperaturowej jako alternatywy dla klasycznych metod kalibracji. 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%. Dowodzi to częściowo postawionych na wstępie pracy tez.

Wyniki oceny dokładności systemu w II-gim etapie eksperymentu zamieszczono poniżej.

Tabela 2 Ocena dokładności wyników ważenia – II etap

	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 c.	19.1	6.7	11.2



Rys. 12. Charakterystyka wiarygodności dla wyników ważenia I-szej osi pojazdów odniesienia – II etap

Z przedstawionych przez autora rezultatów dla II-go etapu badań eksperymentalnych wynika jednoznacznie, że w przypadku systemu niestacjonarnego algorytm autokalibracji pozwala na skuteczną korekcję błędów ważenia spowodowanych zmiennością parametrów systemu. **Uzyskany wynik jest niemal trzykrotnie lepszy niż w przypadku klasycznej metody kalibracji.** Również metoda korekcji pozwala na skuteczną, bieżącą korekcję błędów ważenia. **Dokładność korygowanych w ten sposób wyników jest średnio dwukrotnie lepsza niż kalibrowanych klasycznie.**

6. Podsumowanie

Podsumowując należy stwierdzić, że cel pracy którym było 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, został osiągnięty. System ważący zbudowany w Gardawicach z zaimplementowanymi metodami autokalibracji lub korekcji plasuje się w czołówce światowej pod względem dokładności wyników ważenia.

W ramach realizacji sformułowanego celu rozprawy uzyskano nowe, oryginalne rezultaty do których należy zaliczyć:

- opisanie właściwości systemów WIM z polimerowymi czujnikami nacisku, opracowanie metody identyfikacji oraz wyznaczenie modelu niestacjonarności systemu WIM,
- opracowanie dwóch oryginalnych metod ciągłego ograniczania wpływu niestacjonarności systemu na wyniki ważenia: autokalibracji i korekcji temperaturowej,
- wprowadzenie modyfikacji rekurencyjnego algorytmu LS z wykładniczym zapominaniem, co pozwoliło na niemal dwukrotne zwiększenie dokładności estymacji współczynnika C ,

- opracowanie nowej metody automatycznej klasyfikacji pojazdów w ruchu (algorytm wykorzystuje miary rozmyte i fuzję danych).

Publikacje doktoranta

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

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

Burnos, Piotr, Janusz Gajda, Piotr Piwowski, 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. "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 Piwowski, 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 Piwowski, 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

Burnos, Piotr, Janusz Gajda, Zbigniew Marszałek, Piotr Piwowski, Ryszard Sroka, Marek Stencel, i Tadeusz Żegleń „Rekonfigurowalny system pomiaru parametrów ruchu drogowego” *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