



**PIOTR BURNOS**

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
burnos@agh.edu.pl  
ORCID: 0000-0001-6591-9040



**JANUSZ GAJDA**

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
jgajda@agh.edu.pl  
ORCID:0000-0003-4818-7663



**RYSZARD SROKA**

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
rysieks@agh.edu.pl  
ORCID: 0000-0003-3677-713X



**MONIKA WASILEWSKA**

Neurosoft Sp. z o.o.  
monika.wasilewska@pwr.edu.pl  
ORCID: 0000-0002-8497-8756



**CEZARY DOŁĘGA**

Neurosoft Sp. z o.o.  
cezary.dolega@neurosoft.pl

# Precyzyjne systemy dynamicznego ważenia pojazdów samochodowych

Ze względu na cechy konstrukcyjne systemów *Weigh-In-Motion* (WIM) są one wrażliwe na wpływ wielu czynników zakłócających pomiar nacisków osi i w konsekwencji masy pojazdów samochodowych. Specyficzna konstrukcja takich systemów wynika z faktu, że czujniki nacisku są montowane w nawierzchni drogi, która jest częścią systemu pomiarowego [1]. Na przykład zmiana temperatury nawierzchni drogowej wpływa na zmianę jej parametrów, takich jak choćby moduł sztywności czy pionowe ugięcie, co w konsekwencji powoduje zmianę dokładności wyników ważenia. Oprócz temperatury do podstawowych czynników wpływających na wynik ważenia w systemach WIM należy zaliczyć kierunek i siłę wiatru, film wodny i oblodzenie powierzchni drogi oraz prędkość pojazdu [2], [3], [4]. Zmienność wymienionych czynników wpływowych powoduje, że dokładność i niepewność wyników ważenia uzyskiwanych z systemu WIM również zmienia się w czasie eksploatacji systemu i to nawet w horyzoncie czasowym jednego dnia. W praktyce oznacza to, że dokładność systemu WIM może ulec niekontrolowanej zmianie już w ciągu kilku godzin po zakończeniu procedury kalibracji.

Ponieważ wymagania stawiane administracyjnym systemom WIM [5], [6] obejmują przede wszystkim wysoką i stabilną dokładność ważenia, uzasadnione jest prowadzenie badań w kierunku identyfikacji i ograniczenia wpływu czynników zakłócających pomiar. Było to główną motywacją do realizacji w latach 2017–2018 projektu o nazwie „Inteligentny Neuronowy System Wążeń Pojazdów w Ruchu o Wysokiej Dokładności – NEUROWIM”, który został zrealizowany w kooperacji pomiędzy firmą NEUROSOFT a Aka-

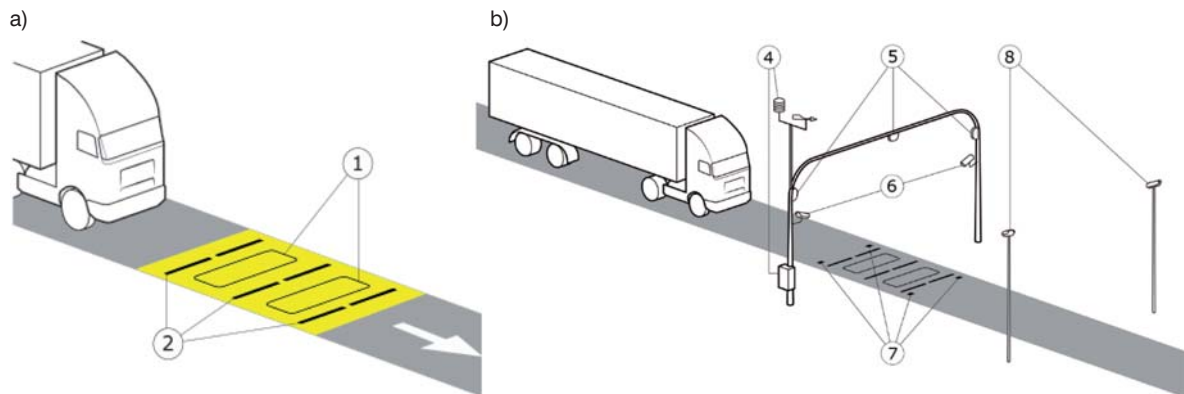
demią Górniczo-Hutniczą w Krakowie. Jednym z celów projektu było określenie czynników najbardziej wpływających na dokładność systemu WIM, ilościowe określenie natężenia tego wpływu oraz zbudowanie modeli matematycznych tych oddziaływań. W badaniach zastosowano metodę pojazdów charakterystycznych, która pozwala w prosty sposób ocenić właściwości metrologiczne systemów WIM, a w szczególności ich długoterminową dokładność. W artykule przedstawiono najważniejsze wnioski z przeprowadzonych badań. Omówiono sposoby identyfikacji niestacjonarności systemów WIM oraz zaproponowano strategię poprawy dokładności wyników ważenia i utrzymania tej dokładności w długim horyzoncie czasowym.

## Dane pomiarowe

Analizę wpływu czynników zakłócających wynik ważenia pojazdów w ruchu oparto na danych zebranych z dwóch systemów pomiarowych – w Kochanowie oraz Grodźcu. Szeroko wykorzystywane systemy WIM najczęściej oprócz czujników nacisku wyposażone są również w pętle indukcyjne, które służą jako detektor i klasyfikator przejeżdżających pojazdów. W obu punktach do ważenia pojazdów wykorzystane zostały czujniki kwarcowe, a schemat pola pomiarowego został zamieszczony na rysunku 1a.

W celu przeprowadzenia badań wpływu czynników atmosferycznych na dokładność ważenia, posłużono się rozbudowanym poligonem pomiarowym wyposażonym w dodatkowe czujniki (rys. 1b). W przypadku stacji znajdującej się w Kochanowie oprócz standardowego wyposażenia pola pomiarowego znajdowały się tam również czujniki temperatury nawierzchni zainstalowane na głębokości – 50 mm. System w Grodźcu był wyposażony w dodatkowe czujniki oraz oprogramowanie umożliwiające zarówno przeprowadzenie badań, jak również sprawdzenie zdarzeń poprzez powiązanie ich ze zdjęciami przejeżdżających pojazdów. Ponadto w nawierzchnię wbudowano zintegrowane czujniki, które pozwalały na dwupunktowy pomiar temperatury: na powierzchni drogi (0 mm) oraz na głębokości czujników ważenia (–50 mm). Dodatkowo, czujniki umożliwiały pomiar przewodności (zasolenia). W celu oceny wpływu takich czynników jak temperatura i wilgotność powietrza, kierunek i siła wiatru czy intensywność opadu na dokładność wyników ważenia pojazdów, obok pola pomiarowego, zamontowano stację pogodową. Stacja umożliwiała również pomiar temperatury gruntu (głębokość –300 mm). W celach weryfikacyjnych do bramownicy dołączone zostały kamery boczne (umożliwiające śledzenie zachowania się kół), ka-

Rysunek 1. Pole pomiarowe:  
 1 – pętle indukcyjne, 2 – liniowe czujniki nacisku, 4 – stacja pogodowa, 5 – skanery 3D, 6 – kamery boczne, 7 – zintegrowane czujniki drogowe, 8 – kamery poglądowe



merę poglądową (wraz z oprogramowaniem rozpoznającym markę oraz model pojazdu) oraz zestaw skanerów 3D.

Dane pochodzące ze stacji dynamicznego ważenia pojazdów, były zbierane w sposób ciągły przez okres jednego roku przez system w Grodzcu i w Kochanowie. Pomiar w tych punktach były prowadzone niezależnie od siebie i w różnym czasie. Ostateczna struktura bazy danych została zaprezentowana w tabeli 1.

Tabela 1. Struktura bazy danych z systemów HS-WIM

Lokalizacja	Liczba pojazdów
Grodzic	223 143
Kochanów	213 545

## Metoda pojazdów charakterystycznych

W celu skalibrowania lub oceny dokładności dowolnego urządzenia pomiarowego należy posłużyć się wzorcem wielkości mierzonej. W procesie kalibracji systemów WIM najczęściej stosuje się metodę pojazdów wstępnie zważonych. Polega ona na wykorzystaniu pojazdów ciężarowych określonych klas, o znanej masie całkowitej i nacisku poszczególnych osi. Pojazdy te wielokrotnie przejeżdżają przez stanowisko ważące. Referencyjna wartość masy całkowitej i nacisku osi są wyznaczane na dokładnych wagach statycznych lub wolnoprzejazdowych, ze świadectwem legalizacji. Porównanie wartości referencyjnych z wynikami uzyskanymi z systemu WIM pozwala określić jego dokładność. Scenariusz takiej procedury jest opisany w [7]. Jednak zastosowanie metody pojazdów wstępnie zważonych nie pozwala na ciągłą obserwację systemu oraz ma inne liczne wady, do których w pierwszej kolejności zalicza się:

- konieczność wynajęcia kilku pojazdów ciężarowych o różnej konfiguracji osi, co generuje duże koszty,
- precyzyjne wyznaczenie wartości referencyjnych jest kłopotliwe i wymaga posiadania legalizowanych wag oraz specjalnego, również legalizowanego stanowiska,
- pomiary należy prowadzić dla różnego stopnia załadunku pojazdów, czyli dla różnych wartości masy całkowitej, a liczba przejazdów powinna wynosić co najmniej 50–60. Powoduje to, że taki eksperyment jest czasochłonny – może trwać nawet wiele godzin.

- w praktyce nie jest możliwe prowadzenie takich pomiarów przez wystarczająco długi okres czasu, konieczny do określenia długoterminowej dokładności systemu WIM. Metoda pojazdów wstępnie zważonych pozwala określić jedynie dokładność systemu w warunkach jego eksploatacji panujących w danym czasie.

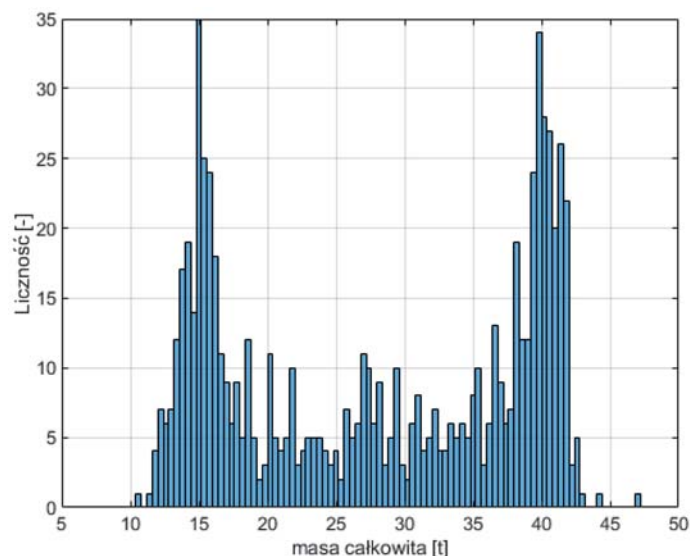
Wymienionych wad jest pozbawiona metoda pojazdów charakterystycznych. Polega ona na wykorzystaniu pojazdów ciężarowych, wybranych z normalnego ruchu drogowego. W ramach projektu badawczego NeuroWIM wykazano bowiem, że klasa pojazdów ciężarowych pięciosiowych, o ściśle określonej konstrukcji cechuje się stabilnym naciskiem pierwszej osi, który może pełnić rolę wielkości wzorcowej, gdyż jest słabo skorelowany z masą całkowitą pojazdu i charakteryzuje się małą zmiennością obserwowaną w licznej populacji tych pojazdów. Tak rozumianą wielkość wzorcową zdefiniowano oraz wyznaczono jej wartość na podstawie badań przeprowadzonych w dwóch etapach:

- Etap I – Analiza licznych zbiorów danych pochodzących z różnych lokalizacji systemów WIM.
- Etap II – Analiza danych z dokładnych wag certyfikowanych.

W pierwszym etapie analizowano dane pomiarowe pochodzące z kilku systemów WIM zainstalowanych w Polsce. Celem było wyłonienie klasy pojazdów charakterystycznych. Oceniono strukturę rodzajową ruchu oraz licznosc poszczególnych klas pojazdów. Określenie licznosci było istotne, gdyż dla długoterminowej oceny dokładności systemów WIM pomiary muszą być wykonywane z dużą częstotliwością – co najmniej 100 razy w ciągu doby. Następnie przeprowadzono analizę statystyczną wyników ważenia, w celu oceny parametrów rozkładów prawdopodobieństwa nacisku osi pojazdów należących do różnych klas. Wykazano, że nacisk pierwszej osi pojazdów ciężarowych (2T+3S), które składają się z dwuosiowego ciągnika siodłowego oraz trójosiowej naczepy, charakteryzuje się najmniejszą losową zmiennością i jest najstabilniej skorelowany z masą całkowitą, spośród wszystkich innych klas pojazdów ciężarowych poruszających się po drogach w Polsce. Macierz kowariancji dla takich pojazdów została przedstawiona w tabeli 2, a rozkład masy całkowitej na rysunku 2. Wartości w macierzy kowariancji niosą informację o skorelowaniu wielkości między sobą: 0 oznacza brak korelacji, a 1 korelację pełną.

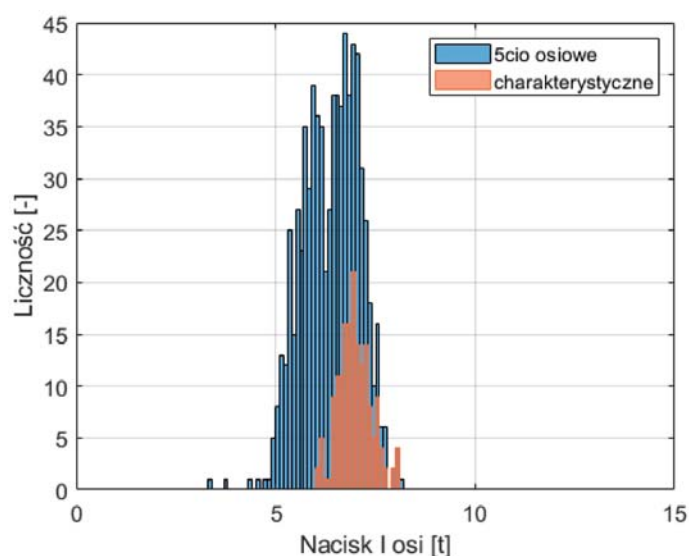
Tabela 2. Unormowana macierz kowariancji dla wszystkich pojazdów ciężarowych 2T+3S na podstawie danych z punktu Kochanów

	Nacisk 1 osi	Nacisk 2 osi	Nacisk 3 osi	Nacisk 4 osi	Nacisk 5 osi
Masa całkowita	0,776	0,942	0,983	0,985	0,984



Rysunek 2. Rozkład masy całkowitej pojazdów ciężarowych 2T+3S dla danych z punktu Kochanów

Efektom prac projektowych było wyznaczenie grupy filtrów, które pozwoliły na wybranie pojazdów charakterystycznych tylko o określonych cechach. Dzięki temu udało się uzyskać jeszcze mniejszą zależność nacisku pierwszej osi pojazdu od masy całkowitej, co zostało przedstawione w tabeli 3. Co istotne, redukcja zbioru analizowanych pojazdów pozwoliła również na zmniejszenie odchylenia standardowego wartości średniej nacisku pierwszej osi pojazdów wybranych jako charakterystyczne z 10,98% do 6,70% (rys. 3).



Rysunek 3. Histogramy nacisków I osi wszystkich pojazdów ciężarowych 2T+3S oraz wybranych jako charakterystyczne

Tabela 3. Unormowana macierz kowariancji dla pojazdów charakterystycznych na podstawie danych z punktu Kochanów

	Nacisk 1 osi	Nacisk 2 osi	Nacisk 3 osi	Nacisk 4 osi	Nacisk 5 osi
Masa całkowita	0,371	0,653	0,257	0,616	0,684

Nacisk pierwszej osi dla wybranych pojazdów charakterystycznych, można więc uznać za statystyczny wzorzec, który może zostać zastosowany w kalibracji i do oceny dokładności systemów WIM. Nacisk ten będziemy nazywać wielkością charakterystyczną.

Aby wielkość charakterystyczna mogła posłużyć do oceny dokładności systemu ważącego, konieczna jest znajomość jej wartości średniej  $\bar{w}$ . Wartość ta jest stosowana jako referencja do porównywania z wynikami pochodzącymi z wag dynamicznych (WIM). Wartość wielkości charakterystycznej wyznaczono w drugim etapie badań, na podstawie analizy danych uzyskanych w wyniku dokładnego ważenia pojazdów należących do wybranej klasy (kilka tysięcy wyników). Ważenie zostało przeprowadzone na wagach stacjonarnych posiadających świadectwo legalizacji i mających dokładność 1 lub 2%. Zbiory danych na podstawie, których wyznaczona została wartość średnia nacisku I osi pojazdów charakterystycznych pochodziły z dwóch rozłączonych okresów czasu umożliwiając tym samym wzajemną weryfikację poprawności otrzymanych wyników doświadczenia.

Metodologia badawcza oceny dokładności systemu WIM z wykorzystaniem wielkości charakterystycznej będzie opisana w dalszej części pracy.

## Czynniki wpływające na dokładność ważenia w systemach WIM

Z obecnego stanu wiedzy na temat wrażliwości systemów WIM na czynniki zakłócające wynika, że można je podzielić na trzy główne kategorie [1], [2], [8], [9]:

- a) Czynniki związane z ważonym pojazdem są:
  - a. Pionowe wahanie pojazdu mające wpływ na amplitudę składowej dynamicznej nacisku (zależne od jakości drogi, prędkości pojazdu, parametrów jego zawieszenia, masy całkowitej, rodzaju ogumienia, ciśnienia w oponach, konfiguracji osi);
  - b. Prędkość i zmiana prędkości pojazdu podczas przejazdu przez stanowisko WIM (zależna od czynnika ludzkiego, ukształtowania terenu, oznakowania, warunków ruchu);
  - c. Efekt windy powietrznej (zależny od prędkości wiatru, jego kierunku względem kierunku jazdy, prędkości pojazdu, sylwetki pojazdu).
- b) Czynniki związane z nawierzchnią drogi są:
  - a. Szeroko rozumiana jakość drogi (zależna od geometrii drogi, profilu pionowego, jakości użytych materiałów, jakości wykonania);
  - b. Przestrzenna powtarzalność nacisku osi (zależna od profilu pionowego drogi na ścieżce przejazdu przez stanowisko WIM);

- c. Zmiana parametrów nawierzchni pod wpływem zmian temperatury oraz nacisku osi poruszającego się pojazdu.
- c) Czynniki związane z systemem WIM są:
- a. Liczba i technologia zastosowanych czujników nacisku;
  - b. Sposób ich rozmieszczenia wzdłuż stanowiska WIM;
  - c. Niepewność pomiaru prędkości;
  - d. Dokładność i częstotliwość kalibracji systemu.

Analizując wymienione czynniki łatwo jest wskazać te, na które projektant systemu ma wpływ oraz takie, które mimo że są mierzalne, to nie można ich kontrolować (np. stabilizować). Prowadzi to do czterech strategii na drodze ku ograniczeniu wpływu czynników zakłócających pomiary w systemach WIM.

**Strategia eliminacji** polega na zaprojektowaniu systemu w taki sposób, aby dany czynnik nie miał wpływu na pomiar lub wpływ ten był minimalny. Na przykład w odniesieniu do wyboru lokalizacji systemu WIM stosowane są specjalne kryteria mówiące o tym, jakie są dopuszczalne parametry geometryczne drogi, w której ma być zamontowana waga [7]. Analogicznie eliminuje się czynniki zakłócające takie jak wahania zasilania, czy oddziaływanie pola elektromagnetycznego na aparaturę pomiarową i czujniki nacisku osi.

W przypadku gdy danego czynnika nie da się wyeliminować, ale jest on mierzalny i jest znany model matematyczny jego oddziaływania na wyniki ważenia, można zastosować **strategię kompensacji**. Polega ona na wykorzystaniu modelu matematycznego oddziaływania danego czynnika i korekcji wyników ważenia na bieżąco, adekwatnie do natężenia czynnika wpływowego. Przykładem wielkości, których wpływ można kompensować w ten sposób, jest temperatura nawierzchni oraz prędkość ważonego pojazdu.

Jeżeli dany czynnik jest mierzalny, ale nie jest znany model matematyczny jego wpływu na wyniki ważenia, to można zastosować strategię **odrzuć pomiaru**. Na przykład jeżeli system jest w stanie wykryć występowanie silnych opadów i powstawanie filmu wodnego na nawierzchni, ale model tego wpływu nie jest znany, to nie jest możliwe zastosowanie strategii kompensacji. W takiej sytuacji wyniki pomiarowe należy odrzucić.

Jeżeli z jakichś powodów nie da się zastosować żadnej z wyżej wymienionych strategii, bo w systemie nie jest możliwa detekcja ani pomiar natężenia czynników zakłócających i nie są znane modele matematyczne ich oddziaływań to można zastosować **strategię autokalibracji** [10]. Polega ona na zastosowaniu algorytmu, który do kalibracji systemu wykorzystuje pojazdy charakterystyczne oraz znaną wartość referencyjną i na tej podstawie kalibruje system WIM. Taka kalibracja jest możliwa nawet po każdorazowym przejechaniu przez system WIM pojazdu charakterystycznego.

## Metodologia badawcza

Wyznaczona wartość średnia nacisku pierwszej osi pojazdów charakterystycznych  $\bar{w}$  może być użyta jako referencja do oceny dokładności systemu i jego autokalibra-

cji. Jeżeli bowiem znana jest wartość  $\bar{w}$ , czyli wiadomo ile „średnio” waży pierwsza oś pojazdów referencyjnych, to można porównać bieżące wyniki ważenia tych pojazdów z systemu WIM z wartością  $\bar{w}$ . Daje to możliwość badania systemu WIM i jego autokalibracji bez konieczności stosowania metody pojazdów wstępnie zważonych. Metodologia postępowania jest różna w przypadku oceny dokładności systemu i autokalibracji. Badając dokładność systemu można obliczyć pojedynczą miarę liczbową, na przykład błąd względny lub wyznaczyć charakterystyki obrazujące wpływ danego czynnika zakłócającego pomiar na wartość tego błędu.

W celu wyznaczenia dokładności systemu WIM w danych warunkach wystarczy więc zgromadzić statystycznie istotną populację wyników ważenia pojazdów charakterystycznych w systemie WIM, obliczyć wartość średnią nacisku pierwszej osi tych pojazdów i porównać ją z wartością charakterystyczną  $\bar{w}$ .

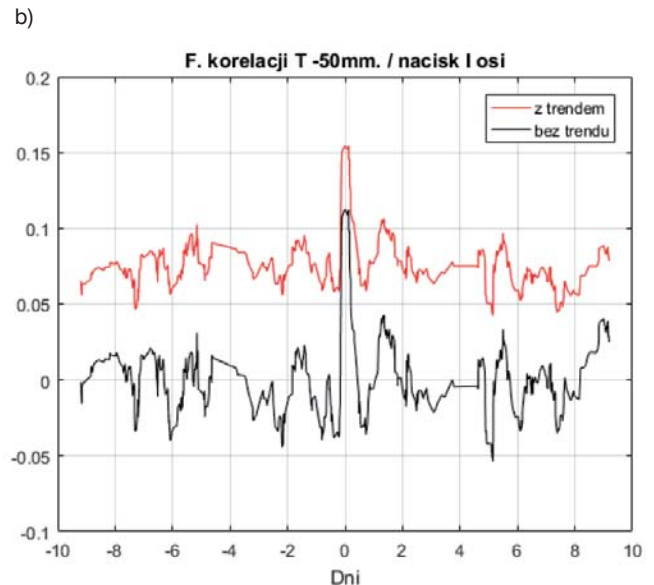
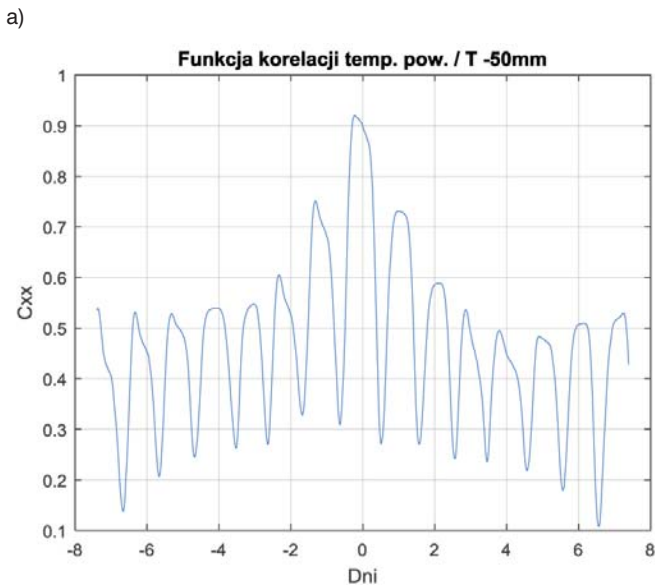
Wyznaczenie charakterystyk wpływowych wymaga zgromadzenia większej liczby wyników ważenia pojazdów charakterystycznych w systemie WIM, w szerokim zakresie zmian czynnika zakłócającego (np. temperatury czy kierunku wiatru). Pomiary takie należy prowadzić więc przez dłuższy czas, w którym czynniki zakłócające istotnie zmieniają wartości. Następnie dla każdej wartości czynnika zakłócającego uśrednia się zgromadzone wyniki ważenia pierwszej osi pojazdów charakterystycznych i porównuje z wartością referencyjną  $\bar{w}$ . Postępowanie takie dla szerokiego spektrum zmiany zakłóceń umożliwia zobrazowanie zmiany dokładności systemu WIM podczas jego pracy.

## Modele wpływu czynników zakłócających na wyniki ważenia

Ocena ilościowa wpływu niektórych z wymienionych czynników na dokładność ważenia pojazdów w systemach WIM była celem wcześniejszych prac autorów [1], [2], [8]. W ramach projektu NeuroWIM szczegółowo zbadano między innymi wpływ temperatury nawierzchni, prędkości ważonego pojazdu oraz kierunku i prędkości wiatru.

Wymienione czynniki tworzą wielowymiarową mapę oddziaływań i wpływają na siebie nawzajem. Istotne jest więc określenie korelacji wzajemnej między tymi wielkościami oraz między nimi, a wynikami ważenia pojazdów charakterystycznych. Na kolejnych rysunkach przedstawiono korelację wzajemną między temperaturą powietrza a temperaturą nawierzchni, oraz między temperaturą nawierzchni a wynikami ważenia pojazdów charakterystycznych.

Z rysunku 4a wynika, że występuje duża korelacja między temperaturą powietrza a temperaturą nawierzchni oraz, że w przypadku tych wielkości obserwowany jest wpływ dynamiki zjawiska transportu ciepła w głąb drogi. Maksymalne skorelowanie obu wielkości występuje dla ok. 2h, co oznacza, że po upływie 2h od wystąpienia zmiany temperatury powietrza następuje zmiana temperatury nawierzchni. Natomiast z charakterystyk przedstawionych na rysunku 4b wynika wyraźna korelacja pomiędzy zmianami temperatury nawierzchni a zmianami wyników pomiaru wartości

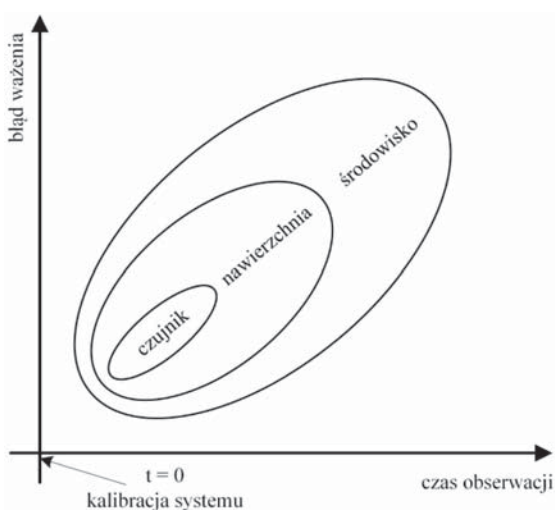


Rysunek 4. a) Funkcja korelacji pomiędzy temperaturą powietrza ( $T_{\text{pow.}}$ ), a temperaturą nawierzchni mierzoną na głębokości 50 mm; b) Funkcje korelacji wzajemnej pomiędzy temperaturą nawierzchni mierzoną na głębokości 50 mm a wynikiem ważenia pierwszej osi pojazdów charakterystycznych dla danych z systemu w Kochanowie

referencyjnej (nacisku pierwszej osi pojazdów charakterystycznych).

Podsumowując, z przeprowadzonych obserwacji wynika następujący wniosek: realizując strategię kompensacji, należy korzystać z wyników pomiaru temperatury nawierzchni, a nie powietrza (a właśnie takie rozwiązanie jest standardowo realizowane przez stacje pogodowe współpracujące z systemami WIM). W podobny sposób oceniono korelację pomiędzy innymi wielkościami wpływowymi oraz ich wpływ na dokładność ważenia pierwszej osi pojazdów charakterystycznych. Pozwoliło to określić zbiór wielkości mających wpływ na działanie i dokładność systemu WIM. Są to:

- 1) temperatura nawierzchni,
- 2) prędkość pojazdów,
- 3) kierunek i prędkość wiatru.



Rysunek 5. Składowe błędów ważenia oraz czas ich wystąpienia

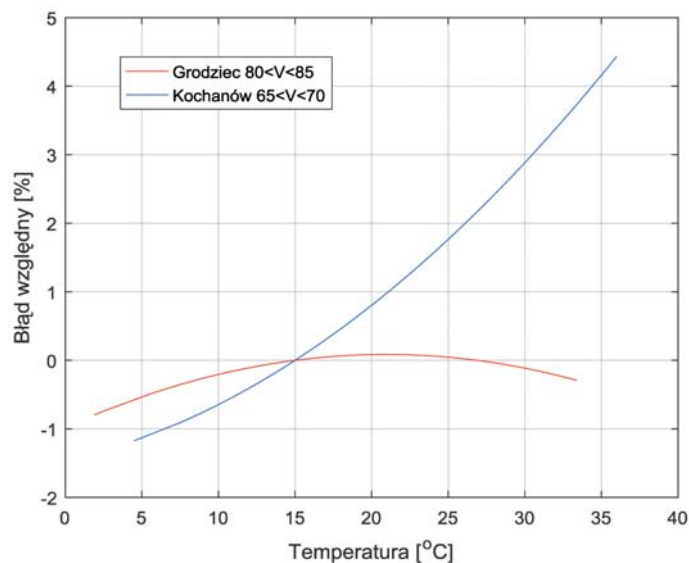
Mimo skorelowania badanych wielkości wpływowych, można wyróżnić uporządkowaną strukturę ich relacji. Wpływ czynników środowiskowych, a szczególnie temperatury, obejmuje nawierzchnię w której zainstalowane są czujniki poprzez zmianę jej właściwości mechanicznych. Na te właściwości ma również wpływ czas nacisku opony na czujnik, a to zależy od prędkości pojazdu. Zjawisko to dokładnie opisano w [1]. Te efekty z kolei wpływają na wywierany na czujnik nacisk osi poruszającego się pojazdu. Na końcu tego łańcucha powiązań znajdują się cechy samego czujnika, które mogą ulegać zmianie zarówno pod wpływem oddziaływania środowiska (temperatury), jak też nawierzchni, w której jest zamontowany. Relację między wymienionymi składowymi błędami i czas, w którym uwidacznia się ich wpływ na system WIM przedstawiono na rysunku 5.

Cechy czujników nacisku są określone przez producenta i należy je brać pod uwagę na etapie projektowania stanowiska ważącego WIM. Są one znane a priori i mają stosunkowo najmniejszy wkład w łączny błąd ważenia w systemach WIM (jeżeli nie bierzemy pod uwagę coraz rzadziej używanych czujników polimerowych). W drugiej kolejności należy rozpatrzyć właściwości nawierzchni. Materiał, z którego jest wykonana (beton asfaltowy lub ceramiczny), jej równość i geometria powinny być znane na etapie wyboru lokalizacji systemu WIM. Droga kręta o dużej nierówności wywołuje pionowe drgania pojazdu, co zwiększa zmienność nacisku osi pojazdu na podłoże, a to zwiększa błąd estymacji składowej statycznej tego nacisku. Stosując się do zaleceń dotyczących wyboru lokalizacji systemu [7] wpływ tego czynnika na błąd ważenia również może zostać zminimalizowany.

## Wpływ temperatury

Największy wpływ na błędy systemu WIM mają czynniki środowiskowe. Jednocześnie jest to wpływ trudny do okre-

ślenia na etapie budowy systemu, gdyż zależy od zmieniających się i trudnych do przewidzenia warunków atmosferycznych. Na rysunkach 6, 7, 8 przedstawiono charakterystyki obrazujące wpływ czynników środowiskowych na dokładność ważenia w systemach WIM. Dane do wyznaczenia charakterystyk wybierano w taki sposób, żeby tylko jedna, badana wielkość była zmienna w szerokich granicach, podczas gdy pozostałe zawierały się w wąskim zakresie wartości. Pozwoliło to zbadać w sposób selektywny wpływ tylko jednej wielkości na wyniki ważenia. Prezentowane charakterystyki wyznaczono na podstawie danych pomiarowych uzyskanych z dwóch systemów WIM, zlokalizowanych w miejscowościach Grodziec i Kochanów.



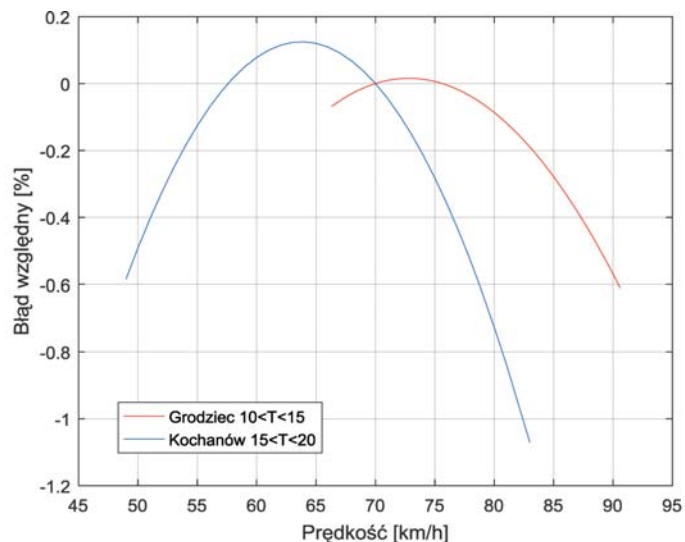
Rysunek 6. Porównanie charakterystyk temperaturowych dla lokalizacji Grodziec i Kochanów

Przedstawione charakterystyki pozwalają stwierdzić, że intensywność wpływu temperatury nawierzchni silnie zależy od jej rodzaju (lokalizacja systemu), ale w żadnym przypadku wpływ ten nie może być pominięty. Szczególnie w lokalizacji Kochanów wpływ temperatury jest istotny. Jej zmiana w zakresie 30°C powoduje błąd ważenia przekraczający 5%. Ten wpływ może zostać ograniczony poprzez zastosowanie strategii kompensacji bądź autokalibracji.

## Wpływ prędkości

Z przeprowadzonej analizy wynika, że korelacja pomiędzy wynikiem ważenia, a prędkością pojazdów, jest ujemna. Oznacza to, że wzrost prędkości ważonego pojazdu powoduje zmniejszenie wyniku ważenia (ujemny błąd pomiaru). Potwierdzają to charakterystyki przedstawione na rysunku 7.

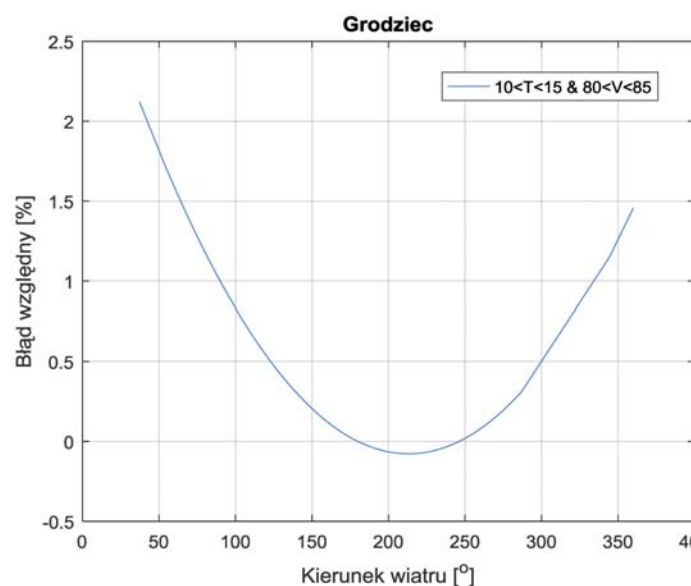
Uzyskane wyniki wskazują, że podczas ważenia w systemach WIM pojazdów ciężarowych należy liczyć się z błędem ważenia osi rzędu 1%, wywołanym różną prędkością ważonych pojazdów, zawierającą się w przedziale (50 km/h – 80 km/h). Efekt ten ma charakter addytywny do wpływu temperatury i również musi podlegać kompensacji.



Rysunek 7. Porównanie charakterystyk prędkości dla lokalizacji Grodziec i Kochanów

## Wpływ kierunku wiatru

Analogiczną metodykę zastosowano do ilościowej oceny wpływu trzeciego czynnika zakłócającego ważenie w systemach WIM, czyli wiatru. Pomiar kierunku wiatru był realizowany tylko w systemie WIM zlokalizowanym w miejscowości Grodziec.



Rysunek 8. Wpływ kierunku wiatru na błąd ważenia dla lokalizacji Grodziec

Symetryczny (względem kierunku 180°) przebieg charakterystyki przedstawionej na rysunku 8 pozytywnie weryfikuje poprawność pomiarów tego parametru oraz przeprowadzonych obliczeń. Uzyskano potwierdzenie hipotezy o wpływie wiatru na wynik ważenia pojazdów o dużych gabarytach. Zmiana kierunku wiatru może powodować efekt windy powietrznej i transfer masy z jednej osi pojazdu na drugą.

Jak wynika to z przedstawionej charakterystyki zjawisko to może powodować zmianę wyniku ważenia pojazdu nawet o 2%.

## Strategia autokalibracji

Metodę autokalibracji po raz pierwszy zaproponował Stańczyk [11], wprowadzając tzw. algorytm autokalibracji systemów WIM. Został on rozwinięty i ulepszony przez Burnosa, a efekty jego pracy zostały opublikowane w 2009 roku [12].

Autokalibracja systemu WIM polega na przestrajaniu nachylenia charakterystyki statycznej systemu (wzmocnienia) w taki sposób, aby uzyskiwać poprawny wynik pomiaru wielkości referencyjnej. Realizacja tej idei wymaga okresowego występowania pojazdów charakterystycznych, przy równoczesnej, automatycznej detekcji tego stanu przez kalibrowany system. W przypadku systemów WIM rolę wielkości referencyjnej pełni nacisk pierwszej osi pojazdów, które na podstawie opisanego wcześniej działania zostały wybrane jako pojazdy charakterystyczne.

Do nadążnego przestrajania współczynnika kalibracji  $S$  wykorzystany został znany z literatury rekursywny algorytm najmniejszych kwadratów (RLS) [13], którego współczynnik zapomnienia został dobrany z punktu widzenia minimalizacji błędu ważenia (1).

$$\hat{S}_n = \hat{S}_{n-1} + K_n (\bar{w} - Wd_n \cdot \hat{S}_{n-1}) \quad (1)$$

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

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

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

w którym:

- $\bar{w}$  – ocena wartości referencyjnej, wyznaczona na podstawie statycznego ważenia wielu pojazdów charakterystycznych,
- $\lambda$  – współczynnik zapomnienia o wartościach zawartych w przedziale (0 – 1),
- $Wd_n$  – wynik dynamicznego ważenia (pomiaru wartości referencyjnej)  $n$ -tego pojazdu charakterystycznego na stanowisku WIM,
- $n$  – numer kolejnego pojazdu charakterystycznego, który przejechał przez stanowisko WIM,
- $\hat{S}_n$  – ocena współczynnika kalibracji systemu WIM wyznaczona w  $n$ -tej iteracji.

Realizacja tego algorytmu pozwala na ciągłą aktualizację nachylenia  $\hat{S}_n$  charakterystyki statycznej systemu WIM. Zmiana tego nachylenia jest możliwa po każdorazowym przejeździe pojazdu charakterystycznego przez kalibrowany system WIM. O dynamice (szybkości) przestrajania tego parametru decyduje przyjęta wartość współczynnika zapomnienia  $\lambda$ . Wyniki badań tego algorytmu zostały opublikowane w pracy [10].

## Wykorzystanie wyników badań

W oparciu o wnioski z badań przeprowadzonych przez zespół z Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, w firmie Neurosoft zaimplementowana została metoda nazwana kalibracją statystyczną. Metoda ta polega na przeprowadzaniu kalibracji systemu okresowo, zgodnie z wymaganiami klienta (np. raz na miesiąc lub pół roku). Wyniki kalibracji statystycznej służą do okresowego sprawdzania poprawności działania systemów WIM i ewentualnej zmiany ich współczynników kalibracji  $S$ . Obliczona korekta współczynnika ważenia nie jest automatycznie aplikowana w systemie – każdorazowo decyduje o tym operator. W celu zastosowania metody kalibracji statystycznej oraz zwiększenia jej dokładności zaproponowany został statystyczny wzorzec wielkości charakterystycznej obliczony na podstawie wyników ważeń dynamicznych. Wartość referencyjna została obliczona na podstawie pomiarów z systemów WIM, które zostały wcześniej skalibrowane metodą pojazdów wstępnie zważonych. Implementacja metody dotyczyła systemów zainstalowanych w Niemczech. Wszystkie systemy po zastosowaniu nowego wzorca i wprowadzeniu poprawek współczynnika kalibrującego  $S$  przed kolejną kalibracją pojazdami wstępnie zważonymi uzyskały dokładność systemu ważenia na poziomie A5 lub B7(+) wg TLS2012 [14].

## Podsumowanie

Identyfikacja przyczyn powodujących zmianę dokładności ważenia w systemach WIM stała się podstawową motywacją do poszukiwania rozwiązań umożliwiających stabilizację właściwości metrologicznych tych systemów. Zaproponowana metoda polega na autokalibracji systemu WIM realizowanej w sposób ciągły lub okresowy na żądanie operatora. Warunkiem praktycznego wdrożenia tej metody było zbudowanie statystycznego wzorca nacisku. Badania przeprowadzone przez zespół z Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie oraz prace konstrukcyjne i eksperymentalne zespołu z NeuroSoft Sp. z o.o. doprowadziły do opracowania skutecznej metody budowy takiego wzorca. W efekcie podjętych prac badawczych, konstrukcyjnych oraz eksperymentalnych wykazano, że możliwe jest budowanie systemów WIM, zachowujących wysoką i stałą dokładność. Zwiększenie dokładności ważenia pojazdów samochodowych w systemach WIM przynosi wymierne skutki. Niezależnie od tego czy systemy WIM są stosowane w charakterze systemów preselekcyjnych (obecnie jest to najbardziej popularne zastosowanie systemów WIM), czy też pełnią rolę systemów administracyjnych, poprawa dokładności ważenia zwiększa efektywność kontroli masy pojazdów i eliminacji pojazdów przeciążonych. To zaś przekłada się bezpośrednio na ochronę infrastruktury drogowej, zwiększenie bezpieczeństwa uczestników ruchu drogowego, ochronę środowiska oraz zapewnienie warunków uczciwej konkurencji w transporcie.

## Dodatkowe informacje

Niniejsze badania współfinansowane były przez firmę Neurosoft Sp. z o.o. oraz przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach dofinansowania projektu p.t. „*Inteligentny Neuronowy System Ważenia Pojazdów w Ruchu o Wysokiej Dokładności – NEUROWIM*” – POIR.01.01.01-00-0612/16

### Bibliografia

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] A. T. Papagiannakis, E. C. Johnston, S. Alavi, and J. A. Mactutis, “Laboratory and field evaluation of piezoelectric Weigh-in-Motion sensors,” *J. Test. Eval.*, vol. 29, no. 6, 2001.
- [4] S. H. Vaziri, C. Haas, L. Rothenburg, R. Haas, and X. Jiang, “Investigation of the effects of air temperature and speed on performance of piezoelectric weigh-in-motion systems,” *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 40, no. 10, pp. 935–944, 2013.
- [5] P. Burnos, J. Gajda, and R. Sroka, “Implementacja administracyj-

nych systemów Weigh-in-Motion (WIM) w Polsce,” *Drogownictwo*, no. 3, pp. 103–105, 2017.

- [6] J. Gajda, P. Burnos, and R. Sroka, “Administracyjne systemy dynamicznego ważenia pojazdów,” *Drogownictwo*, no. 7–8, pp. 240–245, 2016.
- [7] B. Jacob, E. O’Brien, and S. Jehaes, “COST 323: Weigh-in-Motion of road vehicles - final report,” Paris, 2002.
- [8] J. Gajda, R. Sroka, T. Zeglen, and 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.
- [9] F. Scheuter, “Evaluation of Factors Affecting WIM System Accuracy,” in *COST 323 Weigh in Motion of Road vehicles, Proceedings of the Second European conference on WIM*, 1998.
- [10] P. Burnos, “Enhanced autocalibration of WIM systems,” in *Proceedings of the International Conference on Weigh-In-Motion (ICWIM 6)*, 2012, pp. 197–208.
- [11] D. Stanczyk, “New calibration procedure by axle rank,” in *Weigh-in-motion of Road Vehicles Proceedings of the Final Symposium of the project WAVE (1996-99)*, 1999.
- [12] P. Burnos, “Autokalibracja systemów ważących pojazdy samochodowe w ruchu oraz analiza i korekcja wpływu temperatury na wynik ważenia.” Kraków, 2009.
- [13] L. Ljung, *System Identification: Theory for the User*. NJ: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1987.
- [14] BAST, “BAST,” *Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen*, 2012. [Online]. Available: [https://www.bast.de/BAST\\_2017/DE/Publikationen/Regelwerke/Verkehrstechnik/Unterseiten/V5-tls-2012.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Publikationen/Regelwerke/Verkehrstechnik/Unterseiten/V5-tls-2012.pdf?__blob=publicationFile&v=1). [Accessed: 20-Jan-2006].

### Z serwisu GDDKiA

W ramach 4,6-kilometrowego odcinka drogi ekspresowej S2 węzeł Puławska – węzeł Warszawa Wilanów (Południowa Obwodnica Warszawy) powstał ponad 2,3-kilometrowy tunel wraz z wyposażeniem. To pierwszy tak długi tunel drogowy w Polsce i pierwsze tego rodzaju wyzwanie zarówno dla GDDKiA, jak i dla podmiotów, które brały i biorą udział w procesie odbioru robót budowlanych i dopuszczeniu do użytkowania. Aktualnie trwa etap testowania, kalibracji i odbioru systemów bezpieczeństwa i zarządzania ruchem w tunelu i obszarze komunikacyjnym, na jaki oddziałuje.

Tunel będzie wyposażony w jedne z najnowocześniejszych systemów bezpieczeństwa oraz monitoringu środowiska. Między innymi przewidziano pomiar zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego na obszarze terenu inwestycji. Celem planowanego monitoringu jakości powietrza będzie sprawdzenie zawartości w powietrzu dwutlenku azotu, pyłu zawieszonego (PM<sub>2,5</sub> oraz PM<sub>10</sub>) i benzenu. Wszystkie niezbędne pomiary i badania powietrza atmosferycznego wykonane będą zgodnie z Postanowieniem Regionalnego Dyrektora Ochrony Środowiska w Warszawie. Pomiary zbierane będą m.in. dane z rejonu wyrzutni spalin zlokalizowanych przy obu wylotach z tunelu oraz z okolic portali. Prowadzone będą całodobowo przez 365 dni na wyrzutniach oraz minimum przez 70 dni w ciągu roku w rejonie portali. Wyniki badań znane będą wiosną w 2023 roku, w przypadku gdy okażą się złe może zapaść decyzja o montażu filtrów.

*Oprac. na podstawie materiałów GDDKiA*

### Z serwisu Ministerstwa Infrastruktury

Ministerstwo Infrastruktury opracowało projekt nowego programu drogowego, w którym została zaprezentowana lista inwestycji na drogach krajowych zaplanowanych przez rząd do realizacji w rozpoczętej III dekadzie XXI w. Są wśród nich takie drogi jak m.in. Zachodnia Obwodnica Szczecina, droga ekspresowa S11 z Pomorza Środkowego na Górny Śląsk, droga S10 od Szczecina do Warszawy i Obwodnica Aglomeracji Warszawskiej. Przebudowana zostanie autostrada A2 Warszawa–Łódź i autostrada A4 Krzyżowa–Wrocław i Wrocław–Tarnów.

Nowy Rządowy Program Budowy Dróg Krajowych (RPBDK) określa cele polityki transportowej w zakresie budowy drogowej sieci TEN-T na terenie Polski oraz drogowych połączeń komplementarnych. Podstawowym źródłem finansowania inwestycji ujętych w RPBDK jest Krajowy Fundusz Drogowy, zasilany m.in. środkami UE. Limit finansowy nowego programu powinien pozwolić na dokończenie praktycznie całej sieci autostrad i dróg ekspresowych w Polsce.

Celem RPBDK jest stworzenie spójnej sieci dróg krajowych zapewniającej efektywne funkcjonowanie drogowego transportu osobowego i towarowego. Poprawa przepustowości głównych arterii jest jednym z kluczowych elementów, które mogą zwiększyć dynamikę rozwoju zarówno regionów, jak i całego kraju poprzez łatwiejszy, szybszy i tańszy przepływ towarów oraz usług. Realizacja planowanych w Programie inwestycji pozwoli również zaspokoić oczekiwania mieszkańców związane z bezpieczną i szybką komunikacją. Ponadto zmniejszona zostanie luka infrastrukturalna pomiędzy krajami tzw. starej unii a Polską oraz zostaną dotrzymane unijne zobowiązania dotyczące budowy sieci TEN-T, w tym sieci bazowej, składającej się z połączeń priorytetowych, istotnych z punktu widzenia realizacji celów europejskiej polityki transportowej, której realizacja ma zostać zakończona do 2030 r.

*Oprac. na podstawie materiałów Ministerstwa Infrastruktury*