



**Politechnika Krakowska**  
im. Tadeusza Kościuszki

# **Diagnostyka układu hamulcowego samochodu z zastosowaniem sieci neuronowych**

**ROZPRAWA DOKTORSKA**

mgr inż. Krzysztof Dobaj

promotor: dr hab. inż. Andrzej Gajek

promotor pomocniczy: dr inż. Michał Maniowski

Kraków, 5.04.2023

## Spis treści

1. Wprowadzenie.....	2
1.1. Wstęp oraz uzasadnienie podjęcia tematu.....	2
1.2. Plan realizacji pracy.....	3
2. Metody diagnostycznych badań układów hamulcowych- analiza literaturowa.....	4
2.1. Okresowa diagnostyka układu hamulcowego.....	4
2.2. Bieżąca diagnostyka układu hamulcowego w warunkach jazdy.....	8
2.3. Wnioski z analizy aktualnego stanu wiedzy.....	19
3. Cel naukowy, użyteczny oraz tezy pracy.....	23
4. Zasada działania monitora diagnostycznego w systemie diagnostycznym OBD pojazdu.....	24
5. Model matematyczny proponowanego monitora układu hamulcowego.....	28
5.1. Algorytm diagnozowania układu hamulcowego jako całości.....	28
5.2. Analiza możliwości diagnozowania hamulców poszczególnych kół pojazdu.....	32
5.3. Metoda różnicowa- różnica stanu technicznego hamulców tej samej osi.....	40
6. Metodyka prowadzonych badań doświadczalnych.....	43
7. Weryfikacja doświadczalna monitora diagnostycznego .....	47
7.1. Ustalenie wzorców diagnostycznych.....	47
7.2. Wyznaczanie parametrów niezbędnych dla realizacji monitora diagnostycznego....	52
7.3. Badania monitora diagnostycznego całości układu hamulcowego.....	64
7.4. Wnioski z badań monitora diagnostycznego całości układu hamulcowego.....	80
7.5. Monitor diagnostyczny hamulców poszczególnych kół.....	85
7.6. Wnioski z badań monitora diagnostycznego hamulców poszczególnych kół.....	90
8. Monitor całości układu hamulcowego wykorzystujący sztuczne sieci neuronowe.....	95
8.1. Wprowadzenie - podstawy tworzenia sieci neuronowych.....	95
8.2. Zastosowanie samoorganizującego się odwzorowania (SOM).....	99
8.3. Zastosowanie nieliniowej autoregresji.....	108
9. Analiza skuteczności diagnostyki hamulców dla wybranych niesprawności układu.....	113
10. Wnioski i plan dalszych prac.....	121
11. Literatura.....	124
12. Streszczenie.....	129
13. Summary.....	130

# 1. Wprowadzenie

## 1.1. Wstęp oraz uzasadnienie podjęcia tematu

Rozwój techniki motoryzacyjnej opiera się obecnie w dużej mierze na rozwoju mechatronicznych układów sterowania różnorodnymi komponentami pojazdu samochodowego. Zwiększanie dokładności sterowania mechatronicznymi układami w pojazdach pociąga za sobą konieczność zwiększania dokładności ich diagnostyki, rozumianej zarówno jako ocena stanu części elektronicznej jak i mechanicznej danego układu. Maksymalizacja efektów działania algorytmu sterowania możliwa jest do uzyskania wyłącznie w stanie sprawności technicznej wszystkich składowych mechatronicznego obiektu sterowania. Stosowanie coraz bardziej wydajnych sterowników pozwala na ich wykorzystanie nie tylko do realizacji algorytmów sterujących ale także do równoczesnego wykonywania kompleksowych procedur diagnostycznych, pozwalających na całościową ocenę sprawności danego układu podczas jego pracy. Obecnie procedury te, zwane monitorami diagnostycznymi, wprowadzone zostały do sterownika silnika spalinowego w celu przeprowadzania diagnostyki kluczowych podzespołów, odpowiedzialnych za emisję toksycznych składników spalin (przykładowo monitor reaktora katalitycznego lub monitor procesu spalania) [27]. W przypadku wielu innych mechatronicznych układów w pojazdach, ich diagnostyka realizowana przez sterownik obejmuje wyłącznie kontrolę stanu ich części elektronicznej. Przykład stanowią systemy ABS oraz ESP, które do efektywnej pracy wymagają sprawności działania hydraulicznych (lub pneumatycznych) oraz mechanicznych elementów układu hamulcowego. Jednakże elementy te nie podlegają bieżącej diagnostyce, realizowanej poprzez sterownik ABS/ESP. Ich szybka oraz dokładna diagnostyka, pozwalająca na wykrycie wczesnych stadiów zużycia ma kluczowy wpływ na bezpieczeństwo czynne pojazdu, nie tylko w kontekście wykorzystania układu hamulcowego podczas sytuacji zagrożenia, powodującej uruchomienie systemów ABS/ESP, lecz podczas każdego procesu hamowania pojazdu.

Rozwój układów sterowania w pojazdach zmierza w stronę upowszechniania tzw. pojazdów autonomicznych. W ich przypadku, ocena sprawności hamulców przez użytkownika jest utrudniona, lub nawet niemożliwa, ponieważ zadanie sterowania przejmuje automatyka. Opracowanie algorytmu bieżącej diagnostyki całości układu hamulcowego jest istotne również z uwagi na postępującą popularyzację samochodów hybrydowych oraz elektrycznych. Cechą szczególną tego typu pojazdów jest zastosowanie mechatronicznego sterowania układem hamulcowym w każdej chwili jego pracy, nie tylko podczas realizacji funkcji ABS i ESP. Algorytm sterowania układem hamulcowym w pojazdach hybrydowych oraz elektrycznych uwzględnia ponadto odzysk energii kinetycznej podczas hamowania. Zastosowanie sterownika, całkowicie kontrolującego działanie układu

hamulcowego pozwala na sformułowanie algorytmu diagnostycznego, działającego równoległe do algorytmu sterowania układem hamulcowym.

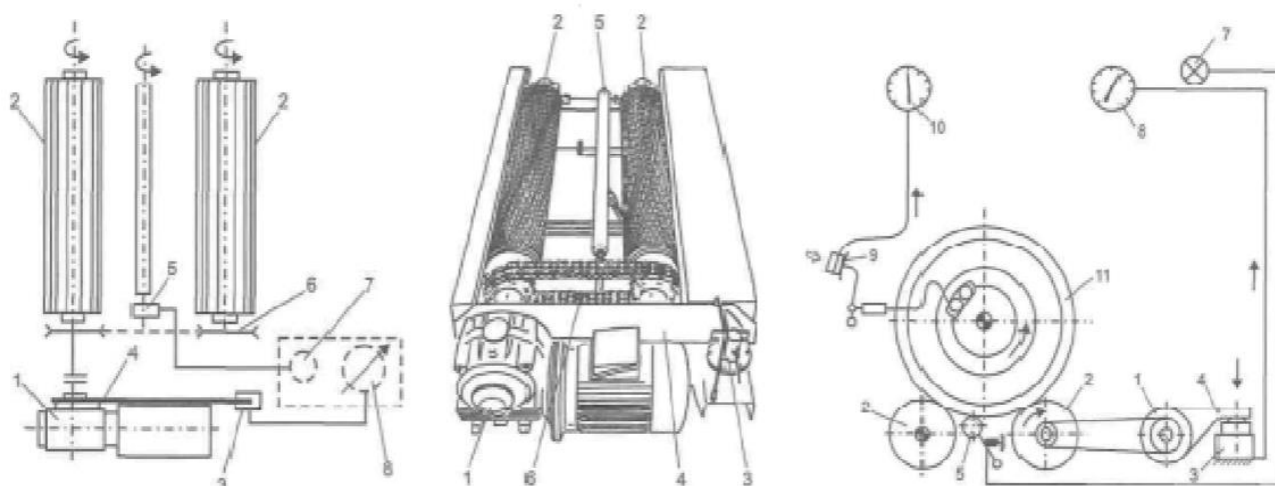
## **1.2. Plan realizacji pracy**

Pierwszą część pracy stanowi analiza literaturowa obecnego stanu wiedzy w zakresie diagnostyki układów hamulcowych. Po wstępnej analizie literatury dokonano jej podziału na dotyczącą stanowiskowej kontroli układu hamulcowego oraz bieżącej diagnostyki tych układów na podstawie eksploatacyjnych procesów hamowania. Podział ten pozwolił na umiejscowienie podejmowanego w rozprawie problemu na tle aktualnego stanu wiedzy. Na podstawie analizy literaturowej wyciągnięto wnioski dotyczące konieczności uzupełnienia aktualnego stanu wiedzy w zakresie algorytmów bieżącej diagnostyki układu hamulcowego. Wnioski te rzutują na dalszy kształt rozprawy. Pierwszy krok, wynikający z analizy literaturowej, to sformułowanie monitora diagnostycznego, pozwalającego na bieżącą diagnostykę układu hamulcowego, w formie możliwej do zastosowania zarówno w układach hamulcowych sterowanych elektrohydraulicznie jak i w układach sterowanych mechanicznie, które zawierają okresowo uruchamiane systemy ABS i ESP. Sformułowano dwa warianty monitora diagnostycznego. Pierwszy umożliwia diagnostykę układu hamulcowego jako całości. Drugi wariant pozwala na ocenę stanu hamulców poszczególnych kół pojazdu. Kolejnym krokiem, wynikającym z wyciągniętych na podstawie analizy literaturowej wniosków, było opracowanie metod ograniczania rozrzutu wyników działania monitora diagnostycznego oraz metod pozwalających na zwiększenie dokładności działania monitora diagnostycznego na podstawie krótkotrwałych procesów hamowania występujących w czasie eksploatacji pojazdu. Ze względu na konieczność analizy danych, pochodzących z eksploatacyjnych procesów hamowania o różnorodnym charakterze, metody te oparto o sztuczne sieci neuronowe. Zostały one opisane w rozdziałach 8.1 oraz 8.2 oraz zweryfikowane praktycznie. Dalszy krok stanowiło sprawdzenie możliwości rozpoznawania zmniejszeń skuteczności hamulców za pomocą opracowanych wariantów monitora diagnostycznego, szczególnie dla hamowań krótkotrwałych. Ostatni etap pracy stanowi sformułowanie wniosków końcowych oraz plany dalszych prac.

## 2. Metody diagnostycznych badań układów hamulcowych- analiza literaturowa

### 2.1. Okresowa diagnostyka układu hamulcowego

Metody diagnostyki układów hamulcowych w pojazdach samochodowych można podzielić na dwie grupy - metody diagnostyki przeprowadzanej okresowo oraz metody realizowane podczas bieżącej eksploatacji hamulców. Pierwsza związana jest z okresową kontrolą skuteczności działania układu oraz organoleptyczną oceną jego elementów mechanicznych oraz hydraulicznych. Najczęściej odbywa się ona w warunkach serwisowych oraz podczas okresowych badań technicznych pojazdów. Następuje wówczas kontrola organoleptyczna, obejmująca m. in. sprawdzenie stanu okładzin ciernych, ocenę szczelności układu, obecność uszkodzeń mechanicznych [4]. Kolejnym stopniem diagnostyki jest sprawdzenie poprawności działania układu hamulcowego w zakresie możliwości wytwarzania sił hamujących oraz opóźnień pojazdu o odpowiednich wartościach. Sprawdzenie to odbywa się poprzez przeprowadzenie procesu hamowania w warunkach stanowiskowych lub drogowych. Badania drogowe nie są powszechnie stosowane podczas badań kontrolnych pojazdów ze względu na czasochłonność i niedogodności związane z zapewnieniem wymaganego odcinka jezdni do przeprowadzenia pomiaru [5]. Metodyka stanowiskowej oceny działania układu hamulcowego zależy od wykorzystywanego stanowiska pomiarowego. Najczęściej stosowanym stanowiskiem pomiarowym jest rolkowe stanowisko do kontroli działania układu hamulcowego według metody quasi- statycznej (rys.1).



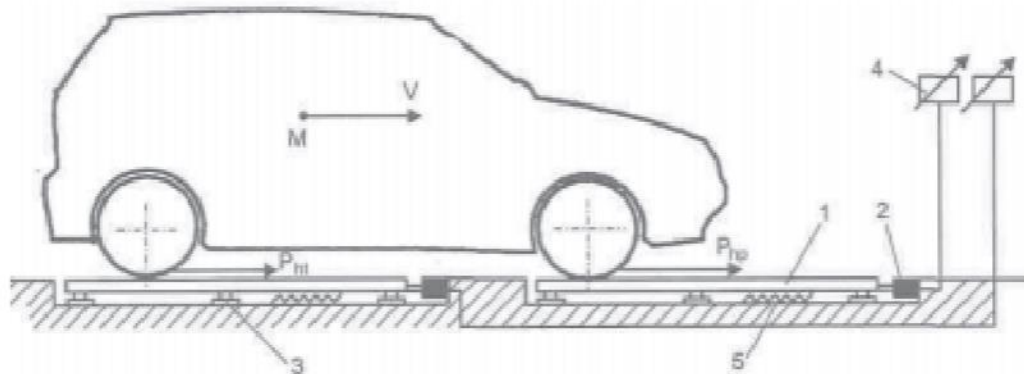
Rys. 1. Budowa oraz schematy ideowe rolkowego stanowiska do kontroli układów hamulcowych [6]: motoreduktor (1), rolki główne stanowiska (2), układ pomiarowy (3), ramie reakcyjne (4), rolka sygnalizacyjna (5), łańcuch łączący rolki (6), lampka sygnalizująca zablokowanie koła (7), wskaźnik do odczytu wartości siły hamującej (8).

Warunki pomiarowe na stanowisku rolkowym są zbliżone do statycznych [4]. Metoda pozwala na pomiar siły stycznej między kołem, a rolkami głównymi stanowiska w funkcji siły

nacisku na pedał hamulca. W warunkach stałej prędkości obrotowej koła, mierzona jest suma sił hamowania hamulca i siły oporów toczenia po bębnach stanowiska.

Konieczność pomiaru siły nacisku na pedał hamulca wynika z przyjmowanych kryteriów diagnostycznych układu hamulcowego, według których wymagane jest osiągnięcie określonych wartości sił hamujących koła przy nacisku na pedał hamulca nie przekraczającym określonej wartości (w przypadku polskich norm prawnych- 50 daN dla samochodów osobowych). Prędkość obwodowa rolek stanowiska do quasi- statycznej kontroli układu hamulcowego przyjmuje wartości od 1,8 km/h (samochody ciężarowe) do 5,4 km/h (samochody osobowe). Tak niewielkie prędkości skutkują współczynnikiem tarcia pary czarnej hamulca o wartościach większych niż podczas hamowania z większych prędkości, występującego podczas eksploatacji pojazdu [4]. Kolejną wadą omawianego typu stanowisk jest nie uwzględnienie zmian obciążenia osi pojazdu, które występuje w procesie hamowania drogowego - dociążenia przedniej osi i odciążenia osi tylnej. Do zalet quasi-statycznej metody diagnostyki hamulców należy, oprócz szybkości pomiarów i ich powtarzalności, także możliwość oceny skrzywienia tarcz hamulcowych oraz owalizacji bębnów hamulcowych.

Stanowisko rolkowe do quasi- statycznej kontroli układów hamulcowych możliwe jest ponadto do wykorzystania w celu realizacji procedur diagnostycznych modulatorów systemów ABS/ ESP, które są procedurami wymuszonymi w sterownikach ABS/ ESP poprzez tester diagnostyczny. Analizę tych procedur przedstawiono w pracy [35]. Stanowisko rolkowe pozwala na pomiar zmian sił hamujących. Zmiany te były rezultatem przesterowań pompy i zaworów elektromagnetycznych ABS/ ESP, przy nacisku na pedał hamulca zgodnie z daną procedurą diagnostyczną. Tego typu procedury stanowią dokładniejszą, w porównaniu do kontroli sprawności elektrycznej elementów ABS/ESP, metodę diagnostyki. Oprócz kontroli sprawności elektrycznej ABS/ESP, pozwalają one na ocenę rezultatu przesterowań mechatronicznych komponentów ABS/ ESP w postaci zmian sił hamujących koła pojazdu. Zatem możliwa jest ocena diagnostyczna nie tylko mechatronicznej części układu hamulcowego ale także jego komponentów mechanicznych i ich współpracy z zaworami i pompą ABS. Kolejną metodą oceny działania układu hamulcowego jest metoda dynamiczna, wykorzystująca stanowisko płytowe. Schemat stanowiska przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat płytowego stanowiska do dynamicznej kontroli hamulców [6]: płyta najazdowa (1), czujniki sił (2), bieżnie rolkowe płyt najazdowych (3), układ pomiarowy (4), sprężyny śrubowe (5)

Badany pojazd najężdża na płyty pomiarowe z prędkością od 10 do 20 km/h. W momencie, gdy koła najężdżają na płyty pomiarowe, diagnosta rozpoczyna proces hamowania. Siły działające między kołami, a płytami stanowiska, powodują przemieszczenie poszczególnych płyt, które podczas ruchu powodują nacisk na czujniki sił. Nacisk ten jest proporcjonalny do sił hamujących, generujących siły styczne na styku kół oraz płyt. Sztywność sprężyn podpierających płyty stanowiska oraz bezwładność samych płyt są czynnikami, które wpływają na wynik pomiaru sił hamujących. Zasadniczą wadą tego typu stanowisk jest ograniczona powtarzalność uzyskiwanych wyników [6].

W opisanych powyżej, stanowiskowych metodach kontroli układu hamulcowego jak i podczas badania drogowego, istnieje wymóg aby nacisk na pedał hamulca podczas badania nie przekraczał określonych wartości. Zostały one ujęte w stosownych rozporządzeniach [5].

Nacisk na pedał hamulca, nieprzekraczający maksymalnych, dopuszczalnych wartości, powinien umożliwić uzyskanie wymaganej, minimalnej wartości skuteczności układu hamulcowego, którą definiuje poniższe wyrażenie [5]:

$$sk_h = \frac{\sum T}{P} * 100[\%] \quad (1)$$

gdzie:

$sk_h$ - obliczona skuteczność hamowania w [%],

$\sum T$ - suma sił hamujących wszystkich czterech kół

P- siła ciężkości pojazdu o masie równej jego dopuszczalnej masie całkowitej

W przypadku drogowych badań diagnostycznych układu hamulcowego mierzone jest opóźnienie hamowania, a skuteczność hamowania ( $sk_h$ ) wyznaczamy na podstawie poniższego wzoru:

$$sk_h = \frac{b}{g} * 100[\%] \quad (2)$$

gdzie:

*b*- średnie opóźnienie hamowania zmierzone podczas badania drogowego,

*g*- przyspieszenie ziemskie.

Minimalne, wymagane wartości współczynnika skuteczności hamowania dla grupy pojazdów, dla których opracowywany jest monitor diagnostyczny układu hamulcowego (samochodów osobowych o dopuszczalnej masie całkowitej do 3,5 tony) przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Minimalne wartości współczynnika  $sk_h$  dla samochodów osobowych [5]

Użyty hamulec	Pojazd rejestrowany po raz pierwszy			
	do 31.12.1993	od 1.04.1994 do 31.12.1998	od 1.01.1999 do 27.07.2010	od 28.07.2010
Roboczy	50 %	50 %	50 %	58 %
Awaryjny	23 %	25 %	25 %	29 %

W przypadku, gdy siła hamowania zmierzona dla hamulca roboczego, a co za tym idzie także wskaźnik skuteczności hamowania nie osiągną minimalnych, ustalonych rozporządzeniem [5] wartości, wówczas do obliczenia wskaźnika skuteczności hamowania wykorzystujemy wartości sił hamujących wszystkich kół, przemnożone przez stosunek dopuszczalnego nacisku na hamulec (50 daN dla samochodów osobowych) do nacisku uzyskanego podczas pomiaru (dla hamulców hydraulicznych) lub przez stosunek obliczeniowego ciśnienia układu hamulcowego do rzeczywistego, zmierzonego ciśnienia działającego w siłownikach hamulców (dla hamulców pneumatycznych).

Szczegółowe warunki kontroli układu hamulcowego, związane m. in. z wymaganą prędkością początkową oraz innymi warunkami drogowego badania diagnostycznego hamulców czy badaniami pojazdów wieloosiowych znajdują się w [5].

Obecnie prowadzone prace, związane ze stanowiskową kontrolą układu hamulcowego, polegają na formułowaniu układów diagnostycznych działających zgodnie z ideą HIL (Hardware-in-loop) [7]. Idea ta polega na zasymulowaniu pracy obiektu sterowania (przykładowo samochodu z hamującym kierowcą) dla rzeczywistego sterownika (np. sterownik układu hamulcowego znajdujący się w pojeździe). Następnie sygnały wyjściowe z rzeczywistego sterownika, będące odpowiedzią na symulacyjnie zadawane parametry wejściowe (np. symulowany proces hamowania przez kierującego) są porównywane z wzorcami diagnostycznymi adekwatnymi do znanych, zadawanych symulacyjnie parametrów wejściowych. Podejście to może być jednak zastosowane do oceny skuteczności hamowania wyłącznie w pojeździe wyposażonym w sterowany mechatronicznie układ hamulcowy (głównie pojazdy hybrydowe i elektryczne) [30, 31].



W pozostałych rodzajach pojazdów metody te mogą znaleźć zastosowanie do okresowej kontroli efektywności układu sterowania systemami ABS i ESP.

Krok w celu opracowania metody diagnostycznej układu hamulcowego w warunkach drogowych stanowi praca [34]. Dokonano w niej analizy możliwości wyznaczenia współczynnika tarcia par ciernych układu hamulcowego samochodu osobowego podczas procesów jego hamowania na kinetycznym, szybkoobrotowym stanowisku do kontroli układów hamulcowych. Wykorzystano sztuczną sieć neuronową, uczoną w sposób nadzorowany (z nauczycielem). Jej zdolności do generalizacji spowodowały, że szacowanie współczynnika tarcia z jej wykorzystaniem zapewniło zmniejszenie rozrzutu otrzymywanych jego wartości w danym procesie w porównaniu z wyłącznie obliczeniowym jego wyznaczeniem, bez stosowania sztucznej sieci neuronowej. Warunki hamowania pojazdu na stanowisku kinetycznym odpowiadają w większym stopniu warunkom hamowania drogowego w porównaniu do hamowania na stanowisku rolkowym do quasistatycznej kontroli hamulców. Jednakże, podobnie jak w przypadku quasistatycznego stanowiska rolkowego, również w przypadku stanowiska kinetycznego wyleminowany jest wpływ warunków drogowych oraz zmiennych w procesie eksploatacji parametrów pojazdu (na przykład jego obciążenia) na wyniki badania (skuteczność układu hamulcowego, wartości współczynnika tarcia okładzin ciernych). Zatem stanowiskowa weryfikacja metod bieżącej diagnostyki układu hamulcowego stanowi wstępny krok badań, determinujący przydatność tych metod warunkowo, przy założeniu sformułowania efektywnych metod określania warunków procesu hamowania (m.in. przyczepność jezdni) i parametrów pojazdu, które są zmienne w procesie eksploatacji (m.in. jego obciążenie).

## **2.2. Bieżąca diagnostyka układu hamulcowego w warunkach jazdy**

Druga z grup metod diagnostycznych układów hamulcowych to metody bieżącej diagnostyki hamulców. Związane są one z wykorzystaniem systemu diagnostyki pokładowej samochodu. Znaczna część obecnie przeprowadzanych prac, związanych z rozwojem diagnostyki układu hamulcowego w warunkach jazdy, dotyczy oceny skuteczności hamowania pojazdu autonomicznego. Ma to szczególne znaczenie z uwagi na hamowanie automatyczne i konieczność zastąpienia odczucia kierującego przez odpowiedni algorytm diagnostyczny, który pozwoli sterownikowi na „zauważenie” niesprawności układu hamulcowego.

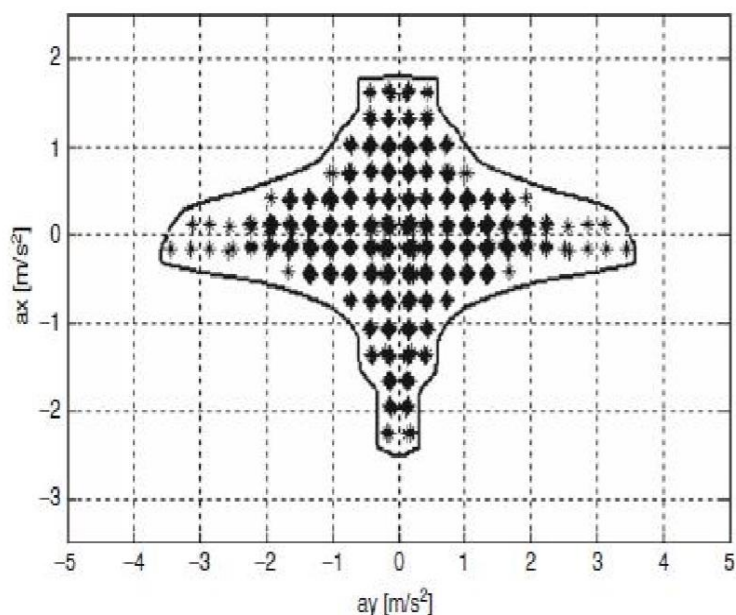
W pracy [8] wprowadzono procedurę bieżącej diagnostyki układu hamulcowego w pojeździe autonomicznym. Zwrócono uwagę na fakt, że ocena działania układu hamulcowego w pojeździe autonomicznym, która opiera się wyłącznie na analizie skutków jego działania (np. momentu hamującego koło, lub opóźnienia hamowania) nie jest kompletna. Nie uwzględnia ona faktu, że niedobór siły hamującej może wynikać z niesprawności w układzie sterowania

elektrohydraulicznym układem hamulcowym, przy sprawnych elementach wykonawczych (zaciskach hamulcowych oraz okładzinach ciernych), lub z niesprawności elementów wykonawczych przy sprawnym układzie sterowania. Ponadto, niesprawność elementów wykonawczych może wystąpić równocześnie z niesprawnością układu sterowania. Ponadto zwrócono uwagę na fakt, że diagnostyka pokładowa elektronicznie sterowanego układu hamulcowego, oparta wyłącznie na analizie sygnałów elektrycznych nie wyczerpuje problemu. Przykładowo nie jest wówczas możliwe wykrycie zmian przekroju poprzecznego kanałów w modulatorze, spowodowane zanieczyszczeniami, czy zwłoki działania zaworów, będącej skutkiem wprowadzenia do sterownika niedokładnego sygnału prędkości obrotowej koła, co również wynika z zanieczyszczeń czujnika czy jego uszkodzeń mechanicznych. Niedokładność ta może również wynikać z wypracowania układu mocującego czujnik. Zaproponowano rozwiązanie diagnostyczne składające się z dwóch etapów: pierwszy stanowi kontrola sprawności działania układu hamulcowego w warunkach jazdy, bazująca na parametrach opisujących działanie układu hamulcowego jako całości (np. opóźnienie hamowania). Natomiast drugim etapem, pozwalającym na wykrycie rodzaju niesprawności, wpływającego na skuteczność hamowania, jest kontrola stanowiskowa. Zwrócono uwagę na wady i zalety stanowiskowej kontroli układów hamulcowych. Zaproponowano możliwość uwzględnienia w sterowniku układu hamulcowego pojazdu autonomicznego specjalnego programu, który wprowadzał będzie sygnały wejściowe, wyzwalające proces hamowania, wykorzystywany do diagnostyki stanowiskowej układu hamulcowego. Sygnały wejściowe powinny uwzględniać wpływ pracy układu koło ogumione - rolka stanowiska na charakter zmian prędkości obrotowej kół.

Pierwszym krokiem przedstawionej w pracy [8] koncepcji monitora diagnostycznego układu hamulcowego w pojazdach autonomicznych jest wprowadzenie charakterystyk czujników prędkości obrotowej kół oraz czujnika opóźnienia pojazdu do systemu diagnostycznego. Wprowadzone charakterystyki czujników pozwalają na programowe generowanie przebiegów sygnału z tych czujników, i przeprowadzenie procesu diagnostyki na podstawie analizy odpowiedzi układu na te sygnały. Po uprzednim wprowadzeniu pojazdu na stanowisko badawcze, połączenia między sterownikiem układu hamulcowego a czujnikami prędkości kół oraz samochodu są odłączane. Zamiast czujników, do sterownika dołączone są układy generujące sygnały diagnostyczne. W pracy [8] przedstawiono omawianą koncepcję monitora diagnostycznego, wykonując poglądowe, wstępne badania na stanowisku rolkowym do badań układów hamulcowych. Jednak zamiast ustalonych procesów hamowania na stanowisku, do diagnostyki można wykorzystać procesy hamowania drogowego w warunkach eksploatacji pojazdu. W przypadku badań stanowiskowych, po rozpędzeniu kół pojazdu na bębnach stanowiska następuje wprowadzenie sygnałów wejściowych (prędkości kół oraz prędkości samochodu na początku hamowania) z rzeczywistego procesu hamowania do sterownika układu hamulcowego w pojeździe. W odpowiedzi na te sygnały sterownik realizuje

proces hamowania, którego efekty, czyli przebiegi prędkości hamowanych bębnow stanowiska są rejestrowane. Po ich zarejestrowaniu, przebiegi te porównywane są z wzorcowymi przebiegami prędkości hamowanych bębnow stanowiska dla tych samych sygnałów wejściowych.

W pracy [9] przedstawiono koncepcję monitorowania dynamiki samochodu oraz zachowania kierowcy z wykorzystaniem systemu nawigacyjnego. Zakres zastosowania rozwiązania obejmuje, oprócz diagnostyki układu hamulcowego, szacowanie warunków przyczepności na różnych odcinkach drogi i przekazanie informacji o obszarach ograniczonej przyczepności dla innych kierowców. Dane pomiarowe pozyskiwane były za pomocą urządzenia VBOX. Uzyskiwane dane pomiarowe pozwalają na wyznaczanie wykresów przyspieszenia wzdłużnego w funkcji przyspieszenia poprzecznego, osiągniętych podczas jazdy (rys. 3).

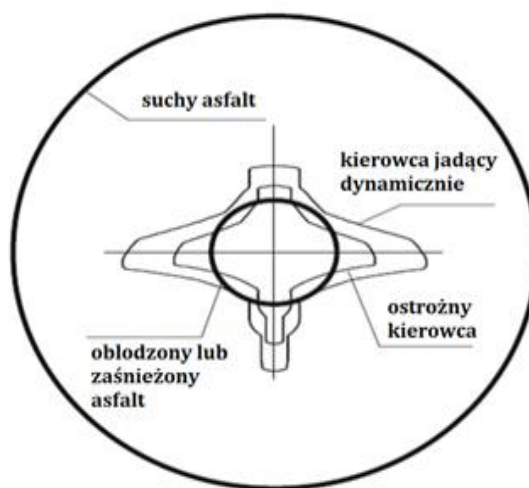


Rys. 3. Wartości przyspieszenia pojazdu w ruchu złożonym ( $a_x$ - przyspieszenie w kierunku wzdłużnym,  $a_y$ - przyspieszenie w kierunku poprzecznym) uzyskiwane podczas eksploatacji pojazdu [9]

Przedstawione na rys. 3 wartości przyspieszenia działającego na pojazd zostały uzyskane na podstawie przejazdu określonego odcinka jezdni w określonym czasie. Jest to tzw. diagram  $a_x$ - $a_y$ , obrazujący jakie wartości przyspieszenia w kierunku wzdłużnym, były osiągnięte przy określonych wartościach przyspieszenia poprzecznego. Kierowca, który porusza się z dużą dynamiką będzie często wykonywał proces hamowania oraz rozpędzania równocześnie z wykonywaniem skrętu oraz będzie powodował uzyskiwanie większych wartości przyspieszenia i opóźnienia, zarówno w kierunku równoległym jak i prostopadłym do wzdłużnej osi symetrii pojazdu. Zestawiając wartości wypadkowego przyspieszenia osiąganego przez pojazd ze znanymi, mierzonym wymuszeniami kierującego (ciśnienie hamowania, kąt skrętu kierownicy itp.) można przeprowadzać bieżącą diagnostykę układu hamulcowego oraz kierowniczego pojazdu. W celu zebrania danych,

przeprowadzono przejazdy różnorodnych odcinków jezdni na suchym, mokrym oraz ośnieżonym asfalcie, z różną dynamiką. Dane te pozwoliły na wyznaczenie granicznych wartości wypadkowego przyspieszenia, działającego na poruszający się samochód badawczy na różnych nawierzchniach.

Na rys. 4 przedstawiono schematycznie różnice między wypadkowym przyspieszeniem, uzyskiwanym przez kierowcę poruszającego się dynamicznie i ostrożnie. Wartości wypadkowego przyspieszenia dla dynamicznego i ostrożnego kierowcy zostały przedstawione w odniesieniu do maksymalnych wartości wypadkowego przyspieszenia pojazdu, możliwymi do uzyskania na suchym oraz oblodzonym lub zaśnieżonym asfalcie. Maksymalne, możliwe do uzyskania wartości wypadkowego przyspieszenia działającego na pojazd, zostały przedstawione jako dwie elipsy opisane jako „suchy asfalt” oraz „oblodzony lub zaśnieżony asfalt”.



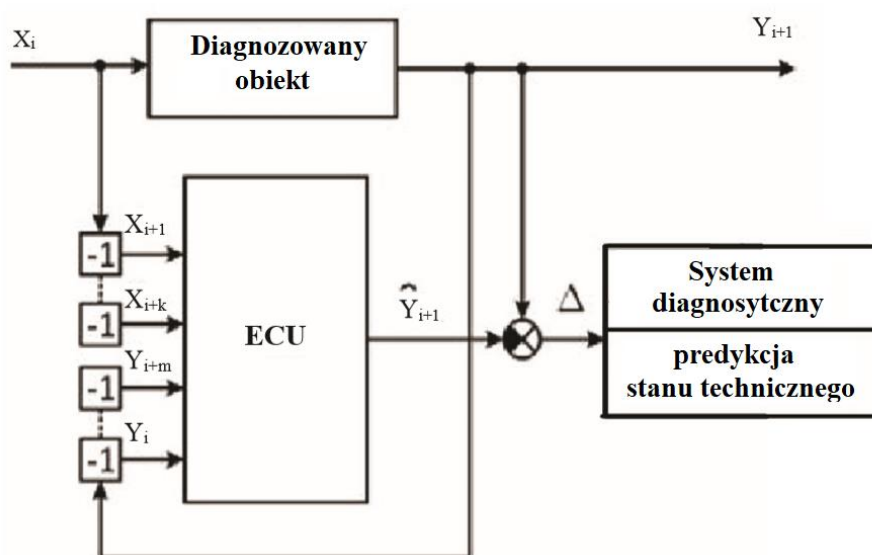
Rys. 4. Poglądowy diagram  $a_x$ - $a_y$  w przypadku jazdy dynamicznej oraz ostrożnej wraz z poziomami odniesienia (asfalt suchy oraz mokry) [9]

W pracy [9] zwrócono ponadto uwagę, że stan nawierzchni oraz stan techniczny pojazdu mogą być szacowane za pomocą uczenia maszynowego oraz metod sztucznej inteligencji, poprzez określenie podobieństwa uzyskanych wyników pomiarów do wzorców uczących, uprzednio wprowadzonych do algorytmu decyzyjnego. W pracy przeprowadzono identyfikację współczynnika przyczepności jezdni bazując na analizie nachylenia przebiegów zmian prędkości w czasie rozpędzania i hamowania pojazdu. Potwierdzono zasadność stosowania i efektywność tej metody.

W obecnie prowadzonych pracach, związanych z ciągłą diagnostyką układu hamulcowego w warunkach jazdy, istnieje pewna grupa prac polegających na formułowaniu algorytmów diagnostycznych, bazując na analizie sygnałów elektrycznych w sterowniku układu hamulcowego [9,10,11,12,15]. Jest to podejście efektywne oraz wymagające relatywnie niewielkich nakładów. Wynika to z możliwości wykorzystania sygnałów wejściowych oraz sygnałów wyjściowych, które są wprowadzane do sterownika (w pętli sprzężenia zwrotnego) do diagnostyki układu,

bez konieczności stosowania dodatkowych układów pomiarowych oraz przetwarzających dane. Jednakże, sterowniki, które pozwalają na zastosowanie omawianego podejścia występują wyłącznie w samochodach hybrydowych, elektrycznych oraz w niewielkiej grupie samochodów o napędzie wyłącznie spalinowym z elektrohydraulicznym układem hamulcowym.

W pracy [10] przedstawiono ogólną koncepcję monitora systemów bezpieczeństwa czynnego samochodu, z wykorzystaniem sztucznej inteligencji. Koncepcja ta, przedstawiona w formie schematu na rys. 5, bazuje na analizie wejść oraz wyjść w sterownikach układów bezpieczeństwa czynnego. Może ona zostać zastosowana do diagnostyki układu hamulcowego w warunkach jazdy.



Rys. 5. Schematyczne przedstawienie koncepcji monitora diagnostycznego systemów bezpieczeństwa czynnego [10]

Diagnozowany układ (przykładowo układ hamulcowy samochodu) stanowi obiekt, do którego wprowadzane są sygnały wejściowe w kroku „i” działania układu, oznaczone na powyższym rysunku jako  $X_i$ . Na podstawie tych sygnałów generowana jest odpowiedź układu w postaci sygnałów wyjściowych na kolejny krok jego działania – krok  $i+1$ . Sygnały te oznaczono na jako  $Y_{i+1}$ . Diagnostyka musi się odbyć w oparciu o pewien skończony przebieg czasowy działania układu hamulcowego. Wobec tego do sterownika systemu diagnostycznego (ECU na powyższym rysunku) wprowadzane są sygnały wejściowe dla przedziału czasowego działania układu hamulcowego dla  $i = 1...k$ , ostatnia wartość sygnału wejściowego to  $X_{i+k}$ . Sterownik systemu diagnostycznego, który jest zbudowany w oparciu o sztuczną sieć neuronową, oszacowuje wzorcowe wartości sygnału wyjściowego dla sygnałów wejściowych, występujących podczas pracy układu. Jest to realizowane po przeprowadzonym procesie uczenia sieci neuronowej, z wykorzystaniem wzorcowych odpowiedzi układu (od  $Y_i$  do  $Y_{i+m}$ ) dla określonych sygnałów wejściowych, które mogą być pozyskane podczas badań układu przyjmowanego za całkowicie sprawny.

Diagnostyka stanu układu odbywa się na zasadzie porównania wzorcowych odpowiedzi układu na dane sygnały wejściowe, ze zmierzonymi, rzeczywiście występującymi wartościami sygnałów wyjściowych, będącymi rezultatem sterowania.

Podobna idea diagnostyki, jednak bazująca na znacznie mniejszej liczbie analizowanych wielkości, została przedstawiona w pracy [33]. Stanowi ona wstępny etap związanych z zastosowaniem sztucznej inteligencji do oceny stanu obiektów związanych z bezpieczeństwem czynnym samochodu w rzeczywistych warunkach jego eksploatacji. W pracy tej zastosowano sztuczną sieć neuronową do identyfikacji stanu technicznego ogumienia kół samochodu i zgodności jego rodzaju z warunkami przyczepności (zaśnieżona jezdnia). Identyfikacja ta odbywała się na podstawie analizy podobieństwa opóźnień kół i ich poślizgu, uzyskiwanych przy typowych manewrach drogowych (hamowanie, jazda po łukach drogi) do przebiegów opóźnień oraz poślizgu kół uzyskanych z wykorzystaniem ogumienia o znanym rodzaju (letnie i zimowe) oraz stopniu zużycia. Przebiegi o znanym rodzaju i stanie zużycia uzyskano przy zbliżonych manewrach drogowych względem przebiegów opóźnień i poślizgu kół uzyskanych z wykorzystaniem ogumienia, którego stan techniczny identyfikowano. Całość badań wykonywano na nawierzchni zaśnieżonej. Praca ma charakter poglądowy - obrazuje przykład zastosowania sformułowanej koncepcji modelu diagnostycznego gdy wyniki bieżących badań oraz dane, z którymi te wyniki porównujemy uzyskane są przy zbliżonych warunkach. Jednakże zastosowanie sieci neuronowej powoduje, że przy pewnej ilości wyników badań, względem których porównujemy badania bieżące, będzie się ona charakteryzować zmniejszoną wrażliwością na różnice warunków drogowych, przy których uzyskano bieżące i porównawcze (wykonane z ogumieniem o znanym rodzaju i stopniu zużycia) przebiegi analizowanych parametrów. Analogiczna metodyka jest możliwa do zastosowania w celu diagnostyki układu hamulcowego, jednakże jej wadą jest wymóg zbliżonego charakteru wymuszenia procesu hamowania przez kierującego do charakteru wymuszenia procesu hamowania wzorcowego, z którego dane stanowią wartości porównawcze dla bieżących procesów hamowania. Zatem istnieje konieczność obliczeniowej korekcji wymuszeń bieżącego procesu hamowania względem wymuszeń hamowań wzorcowych, co stanowi dodatkowy czynnik pogarszający dokładność omawianej metody diagnostycznej. Alternatywą dla omawianej obliczeniowej korekcji wymuszeń procesu hamowania jest wykorzystanie danych pochodzących ze znacznej liczby hamowań wzorcowych, przeprowadzanych z różnorodną intensywnością. Oprócz omawianej wady, istnieje konieczność sformułowania metodyki określania parametrów pojazdu (m.in. jego obciążenia) i warunków drogowych, rzutujących na wynik diagnostyki hamulców.

W pracy [11] zaproponowano koncepcję ciągłej diagnostyki układu hamulcowego pojazdu elektrycznego zorientowaną na zapewnienie stabilności procesu hamowania z odzyskiem energii kinetycznej. Sformułowano model równoległego, hybrydowego układu hamulcowego. Układ

ten został zdefiniowany jako zapewniający możliwość równoczesnego hamowania ciernego oraz elektrodynamicznego. Do hamowania elektrodynamicznego wykorzystywał on asynchroniczny silnik prądu stałego, który wykonywał pracę prądnicową. Wprowadzono pojęcie efektywnego współczynnika przyczepności, związanego z hamowaniem regeneracyjnym. Jego wartość rzutuje na efektywność procesu hamowania regeneracyjnego, który realizowany jest poprzez elektrohydrauliczny układ hamulcowy z odzyskiem energii. Dla przedniej osi pojazdu współczynnik ten został opisany poniższym wzorem:

$$\varphi_f = \frac{F_{xb1}}{F_{z1}} = \frac{[z \cdot \beta + (1 - \beta) \cdot F_d / G] \cdot L}{L_2 + z} \quad (3)$$

gdzie:

$F_{z1}$  – pionowa siła reakcji podłoża na koła przedniej osi pojazdu

$z$  – współczynnik intensywność hamowania, określający udział hamowania elektrodynamicznego oraz ciernego w całości procesu hamowania, przyjmujący wartości zdefiniowane w pracy [11]

$\beta$  – współczynnik rozkładu sił hamujących między przednią i tylną osią

$G$  - całkowity ciężar pojazdu

$L$  – rozstaw osi pojazdu

$L_2$  – odległość od środka ciężkości pojazdu do jego tylnej osi

$F_d$  – część siły hamującej, będąca wynikiem wyłącznie hamowania elektrodynamicznego

$F_{xb1}$  - wypadkowa siła hamująca, działająca między kołami przedniej osi a nawierzchnią, dana wzorem:

$$F_{xb1} = F_d + F_\mu + \beta \cdot G \cdot z \quad (4)$$

w którym  $F_\mu$  to część siły hamującej, będąca wynikiem wyłącznie hamowania ciernego.

Z kolei efektywny współczynnik przyczepności dla kół osi tylnej definiowany jest jako:

$$\varphi_f = \frac{F_{xb2}}{F_{z2}} = \frac{[(1 - \beta) \cdot z + \beta \cdot F_d / G] \cdot L}{L_1 - z \cdot h_g} \quad (5)$$

gdzie:

$L_1$  – odległość między przednią osią pojazdu a jego środkiem ciężkości,

$h_g$  – wysokość środka ciężkości pojazdu

Pozostałe wielkości występujące w powyższym wzorze zdefiniowano przy opisie wzoru 3. Na podstawie modelu symulacyjnego, wyznaczono zależności efektywnego współczynnika przyczepności od unormowanej intensywności hamowania ( $z$ ):

$$z = \frac{du}{dt \cdot g} \quad (6)$$

gdzie:

$dt$ - krok czasowy,

$du$ - zmiana opóźnienia w kroku czasowym  $dt$ ,

$g$ - przyspieszenie ziemskie.

Przebieg efektywnego współczynnika przyczepności ( $\varphi_f$ ) w funkcji unormowanej intensywności ( $z$ ) został wyznaczony w oparciu o cykl jezdny UDSS i hamowania mające miejsce podczas jego trwania, przy różnych przełożeniach skrzyni biegów, co rzutuje na wpływ momentu hamującego silnika na hamowanie regeneracyjne. Porównywanie uzyskiwanej na bieżąco zależności efektywnego współczynnika przyczepności od intensywności hamowania (danej wzorem nr 5) z przebiegiem wzorcowym pozwala na diagnostykę układu odzyskiwania energii podczas hamowania. Wykazano doświadczalnie, że pojazd z hybrydowym, równoległym układem napędowym kół tylnych zapewnia znacząco mniejszą efektywność procesu hamowania odzyskowego w porównaniu do pojazdu z równoległym, hybrydowym napędem przednich kół. Wynika to z konieczności zapewnienia odpowiedniego rozdziału sił hamujących przez sterownik pojazdu.

Podobna koncepcja została wprowadzona w pracy [12]. W jej przypadku wykorzystano różnorodne techniki klasyfikacji usterek elektrohydraulicznego układu hamulcowego. Sformułowano model pojazdu z szeregowo- równoległym, hybrydowym układem napędowym kół przednich. W tym celu wykorzystano oprogramowanie Matlab z pakietem PSAT (Power System Analysis Toolbox). Zasymulowano układ komunikacji między sterownikami poszczególnych komponentów hybrydowego układu napędowego oraz elementami wykonawczymi- połączenie to było realizowane poprzez model sieci CAN. Stworzono model kierującego pojazdem, tak aby pozwalał on na realizację cyklu jezdny UDSS poprzez zaprogramowane oddziaływanie na pedał przyspieszenia oraz hamulca. Zamodelowano charakterystykę akumulatora trakcyjnego, wykorzystywanego w hybrydowym układzie napędowym, jako zależność rezystancji i napięcia w obwodzie otwartym w funkcji unormowanego stopnia naładowania (SOC) oraz temperatury.

Zastosowano cztery metody klasyfikacji usterek w elektrohydraulicznym układzie hamulcowym. Wstępnym krokiem pierwszej z nich jest redukcja danych z wykorzystaniem wielokierunkowej analizy głównych składowych. Kolejny krok to zastosowanie algorytmu klasyfikacji danych, pozwalającego na rozpoznanie usterki. Wykorzystano porównano efektywność dwóch algorytmów klasyfikacyjnych- maszyny wektorów nośnych oraz metody K-najbliższych sąsiadów. Klasyfikacja była dokonywana w oparciu o analizę przebiegu różnic między rzeczywistymi a wzorcowymi przebiegami sygnałów wejściowych w każdej chwili badawczej. Druga z zastosowanych metod klasyfikacji usterek jest metodą zbliżoną względem pierwszej. Jedyną różnicę stanowi fakt wykorzystania przez algorytmy klasyfikacyjne wyników transformaty falkowej (współczynników falkowych) przebiegu różnic między rzeczywistymi a wzorcowymi przebiegami



sygnałów wejściowych. Zastosowano falę Daubechies 2 oraz wykorzystano współczynniki falkowe dla 6 poziomu dekompozycji sygnału.

Dwie kolejne metody klasyfikacyjne to euklidesowa miara odległości oraz algorytm interferencyjny (którego działanie pozwala na prognozowanie stanu układu). Obydwie metody bazują na analizie średnich wartości przebiegu różnic między rzeczywistymi a wzorcowymi przebiegami sygnałów wejściowych. Wykazano, że najlepszą dokładność rozpoznawania usterek uzyskano w przypadku pierwszej z omawianych metod klasyfikacyjnych, w wariantcie wykorzystującym algorytm maszyny wektorów nośnych. Ze względu na szybkość działania oraz satysfakcjonującą dokładność omawianych metod, zwrócono uwagę na zasadność ich stosowania w systemach bieżącej diagnostyki procesu hamowania regeneracyjnego w pojazdach hybrydowych.

Diagnostyka układu hamulcowego w warunkach jazdy obejmuje także kontrolę systemów wsparcia kierowcy, które bazują na układzie hamulcowym (ABS, ESP). Kontrola ta realizowana jest obecnie za pomocą testu sprawności elektrycznej poszczególnych elementów, wchodzących w skład tych układów. Jednakże, w pracy [26] została zaproponowana metoda kontroli układu ABS w warunkach jego pracy. Wykorzystano model funkcjonalny systemu ABS oraz złożenie różnorodnych metod statystycznych oraz metod estymacji stanu obiektu. Wykorzystanie takiego podejścia do diagnostyki systemu ABS jest wyłącznie przykładem jej zastosowania. Wynika to z faktu, że układ ABS jest systemem oczekującym, który, statystycznie dla ogółu kierowców działa w niewielkich chwilach czasu całkowitej eksploatacji pojazdu. Opisywana w pracy [26] metoda może więc być realizowana podczas okresowej kontroli pojazdu, na przykład z wykorzystaniem stanowiska bębnowego do kinetycznej kontroli hamulców. Sformułowano model funkcjonalny pojazdu z układem ABS, który uwzględnia jako sygnały wejściowe następujące wielkości: prędkości kół, prędkość pojazdu, moment hamujący koła oraz zmianę momentu hamującego koła w czasie. Model ten przyporządkowuje określonym zmianom poślizgu kół poszczególne fazy działania układu ABS, związane z działaniem pompy elektrohydraulicznej oraz zaworów elektromagnetycznych z wykorzystaniem tablic podglądu (look-up table). Ponadto uwzględniono zakłócenia pomiarowe oraz procesowe. Sformułowano model pojazdu z układem ABS posłużył do sformułowania modelu estymacji stanu układu, opartego o nieliniowy obserwator stanu Levenbergera. Posłużył on do dalszej analizy, w której zasymulowano usterki czujników prędkości obrotowej kół oraz zmiany efektywności przepływu płynu hamulcowego, skutkujące ubytkami ciśnienia. Do identyfikacji usterek wykorzystano klasyfikator sformułowany jako maszyna wektorów nośnych.

W pracy [13] przedstawiono z kolei metodę bieżącej kontroli pneumatycznego układu hamulcowego w pojeździe ciężarowym. Tego typu układy, we współczesnych rozwiązaniach, pracują jako zespoły sterowane mechatroniczne, podobnie jak w przypadku elektrohydraulicznego układu hamulcowego pojazdu hybrydowego czy elektrycznego. Sformułowano model

pneumatycznego układu hamulcowego, bazujący na równaniach opisujących przemieszczenia elementów wykonawczych w elementach pneumatycznego układu hamulcowego. Model uwzględnia charakterystyki elementów roboczych w pneumatycznym układzie hamulcowym, zdefiniowane jako zależności przemieszczenia elementów wykonawczych w funkcji ciśnienia sterującego. Diagnostyka usterek polega na wykrywaniu występujących w eksploatacji odchyłeń od wzorcowych charakterystyk elementów roboczych pneumatycznego układu hamulcowego. Zdefiniowane oraz wykrywane usterki związane są z nieszczelnościami, usterkami mechanicznymi oraz wypracowaniem elementów wykonawczych. Model, uwzględniający zależności ciśnień sterujących od przemieszczeń elementów pozwalał na aproksymację czasową procesów hamowania na podstawie krótkotrwałych fragmentów procesu hamowania. Aproksymacja pozwoliła na zwiększenie efektywności procesu diagnostyki.

Zwiększanie szybkości działania mechatronicznych układów sterowania hamulców, wymaga zwiększania szybkości procesów ich diagnostyki. Wobec tego faktu, w systemach diagnostyki pokładowej, celowym wydaje się stosowanie sztucznych sieci neuronowych. Pozwalają one na ograniczenie konieczności przeprowadzania obliczeń z wykorzystaniem złożonych modeli matematycznych, przeprowadzanych w warunkach ruchu pojazdu, a więc przyspieszenie procesu wykrywania niesprawności.

W pracy [14] wprowadzono metodę diagnostyczną, związaną z zastosowaniem sieci neuronowej Bayesa. Zwrócono uwagę, że w hydraulicznym układzie hamulcowym mogą wystąpić niejednoznaczności między określonymi symptomami usterek a ich rodzajami. Wykazano, weryfikując doświadczalnie przyjęte modele diagnostyczne, że model oparty na Regularyzacji Bayesa pozwala na osiągnięcie większej dokładności przyporządkowywania rodzajów usterek do występujących symptomów niż wykorzystanie modelu opartego na logice rozmytej. Regularyzacja Bayesa jest metodą uczenia sztucznej sieci neuronowej w oparciu o Twierdzenie Bayesa. Zostało ono opisane w pracy [15]. Zastosowanie twierdzenia Bayesa zapewnia brak konieczności przeprowadzania procesu walidacji sieci neuronowej, czyli oceny jakości procesu jej uczenia [1], co pozwala na zapewnienie większej szybkości obliczeń. Idea Regularyzacji Bayesa została szerzej opisana w pracach [21, 22, 23].

Zdefiniowano cztery rodzaje usterek w układzie hamulcowym: łagodne osłabienie skuteczności hamowania, nagłą utratę siły hamującej, występowanie siły hamującej mimo odpuszczenia hamulca i zmiana toru jazdy podczas hamowania (nadmierna nierówność sił hamujących danej osi). W pracy [9] przeanalizowano występowanie siły hamującej pomimo zwolnienia pedału hamulca oraz sformułowano model jej identyfikacji (w postaci schematu blokowego) na podstawie złożenia możliwych do wystąpienia przyczyn. Przyczyny te (usterki mechaniczne) wprowadzono w rzeczywistym obiekcie badań (samochód osobowy klasy średniej)

i przeprowadzono badawcze procesy hamowania, podczas których mierzono parametry związane z dynamiką samochodu. Wyniki tych badań posłużyły do weryfikacji działania sieci neuronowej oraz procesu jej uczenia z wykorzystaniem Regularyzacji Bayesa. Ponadto, dzięki przeprowadzonym badaniom zweryfikowano działanie porównawczego modelu diagnostycznego, zbudowanego w oparciu o reguły logiki rozmytej. Zastosowanie Regularyzacji Bayesa do uczenia sieci neuronowej zapewniło większą dokładność procesu diagnostyki niż zastosowanie modelu diagnostycznego, wykorzystującego logikę rozmytą. Algorytm Regularyzacji Bayesa działa efektywniej wobec występujących niejednoznaczności między wprowadzonymi usterkami układu hamulcowego a mierzonymi parametrami, opisującymi proces hamowania.

Praca [15] obejmuje zastosowanie metody diagnostycznej, sformułowanej w poprzednio omawianej pracy do rozpoznawania zmniejszonej skuteczności hamowania. W tym przypadku również porównano działanie sieci neuronowej, uczonej z zastosowaniem Regularyzacji Bayesa oraz modelu rozmytego. Zwrócono uwagę, że algorytm Regularyzacji Bayesa pozwala na wyodrębnienie najbardziej typowych zależności między przyczynami usterek a mierzonymi objawami i oddzielenie ich od zależności mniej prawdopodobnych. Są one pomijane w dalszych krokach działania pętli algorytmu Regularyzacji Bayesa. Podobnie jak w pracy [9] sformułowano model identyfikacji występowania zmniejszonej skuteczności hamowania. Również w tym przypadku zastosowanie sieci neuronowej, poddanej uczeniu z wykorzystaniem Regularyzacji Bayesa zapewniło większą dokładność identyfikacji przyczyn zmniejszonej skuteczności hamowania niż w przypadku modelu wykorzystującego logikę rozmytą. Jednak różnice w dokładności identyfikacji przyczyn obniżonej skuteczności są w tym przypadku mniejsze niż podczas identyfikacji przyczyn występowania siły hamującej pomimo odpuśczenia pedału hamulca. Wynika to z faktu występowania większej liczby jednoznacznych zależności między przyczynami usterek a ich wyznaczanymi doświadczalnie objawami. Przyczyny usterek, rzutujące na obniżenie skuteczności hamowania (zdefiniowane m. in. jako zapowietrzenie układu hamulcowego czy wycieki płynu hamulcowego) były łatwo wykrywalne przy analizie wpływu załączania układu hamulcowego na efektywność jego pracy.

Znaczna część prac, związanych z zastosowaniem sieci neuronowych w układach hamulcowych, dotyczy sterowania procesami hamowania w pojazdach autonomicznych [16, 17]. W pracy [16] przeanalizowano zastosowanie spłotowych sieci neuronowych (CNN) oraz rekurencyjnych sieci neuronowych (RNN) do sterowania procesami rozpędzania i hamowania w pojeździe autonomicznym. Wykorzystano obraz zarejestrowany za pomocą kamer jako zbiór uczący dla sieci neuronowej. Sieć ta (po procesie uczenia z wykorzystaniem danych zarejestrowanych kamerą na wzorcowych trasach) szacowała tor jazdy, realizowany przez układ wykonawczy. Sprawdzono efektywność różnorodnej architektury sterowania. W pracy [17] wykazano z kolei,

że uzupełnienie sterowania opartego o regulator proporcjonalno – różniczkująco - całkujący o sieć neuronową, służącą szacowaniu parametrów systemu, znacząco zwiększa efektywność sterowania pojazdem autonomicznym w jeździe po łukach. Aktywacje układu wykonawczego pojazdu (powodujące rozpędzanie, hamowanie i skręt pojazdu), dobierane do realizacji w określonych fragmentach trasy przez sieć neuronową, mogą również stanowić bazę do diagnostyki stanu technicznego pojazdu autonomicznego (w tym jego układu hamulcowego). Możliwe jest sprawdzenie, czy rezultat danej aktywacji (np. opóźnienie hamowania) różni się nadmiernie od rezultatu tej samej aktywacji dla pojazdu fabrycznie nowego. Procedura ta musi uwzględniać warunki drogowe działające na pojazd. Należy także oszacować zakres możliwości bieżącego korygowania różnic między wzorcową a uzyskaną odpowiedzią na daną aktywację w pętli sprzężenia zwrotnego.

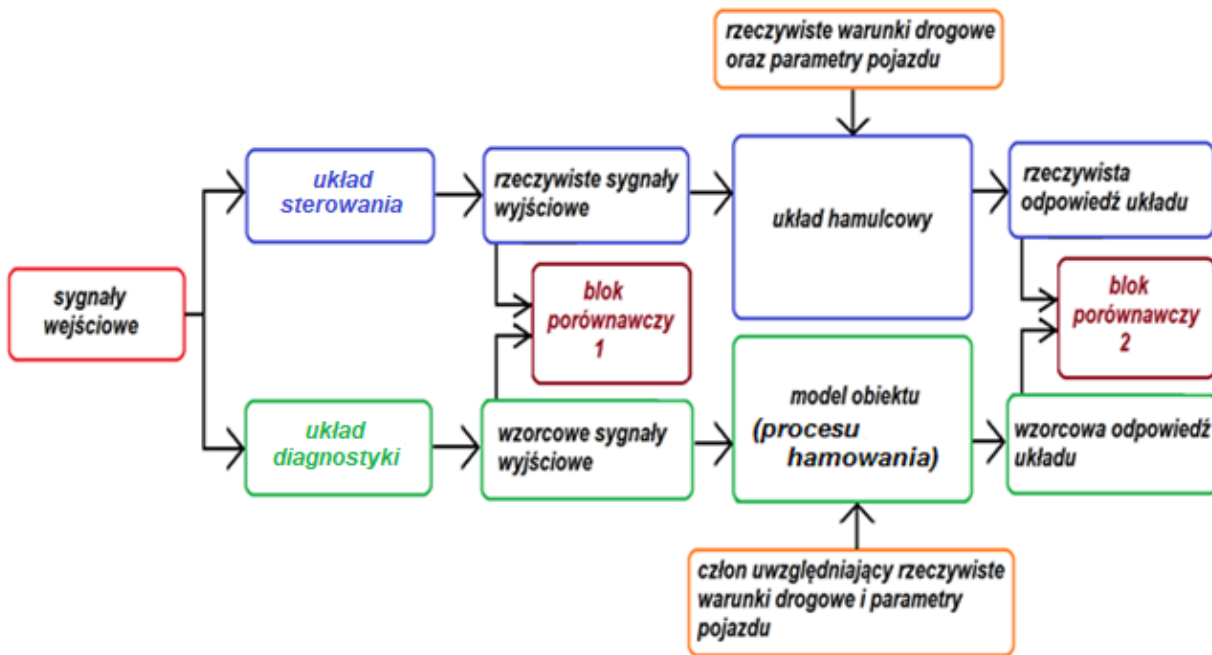
### **2.3 Wnioski z analizy aktualnego stanu wiedzy**

Podczas przeprowadzonej analizy literaturowej nie spotkano się z pracami, związanymi z opracowaniem uniwersalnego monitora diagnostycznego, możliwego do zastosowania w diagnostyce zarówno elektrohydraulicznych układów hamulcowych jak i układów hamulcowych sterowanych mechanicznie, w których część elektrohydrauliczną stanowią systemy ABS i ESP.

Ponadto w przeanalizowanych pracach nie spotkano się ze złożonymi metodami ograniczania rozrzutu otrzymanych wartości parametrów diagnostycznych, co wobec różnorodności eksploatacyjnych procesów hamowania, zwiększyłoby jednoznaczność oceny stanu technicznego hamulców. Istotnym, a pomijanym przez autorów przeanalizowanych prac, jest problem zwiększenia dokładności oceny stanu technicznego hamulców na podstawie krótkotrwałych procesów hamowania, które występują często podczas eksploatacji pojazdu.

Powyższe fakty rzutują na konieczność opracowania algorytmu bieżącej diagnostyki układu hamulcowego (monitora diagnostycznego), który jest możliwy do zastosowania w pojeździe o dowolnym rodzaju sterowania układem hamulcowym, przy wykorzystaniu czujników wchodzących w skład obowiązkowego wyposażenia pojazdu. Ponadto istotną kwestię stanowi opracowanie metody ograniczania rozrzutu wyników diagnostyki oraz metody zwiększania dokładności diagnostyki hamulców na podstawie krótkotrwałych procesów hamowania. Korzystnym wydaje się oparcie tych metod o sztuczne sieci neuronowe. Wynika to z faktu, że sieci te dostosowują swoje działanie do różnorodnego charakteru danych wejściowych, które pochodzą z eksploatacyjnych procesów hamowania.

Ogólna koncepcja algorytmu uniwersalnego monitora diagnostycznego została omówiona z wykorzystaniem schematu, przedstawionego na rys. 6.



Rys. 6. Schemat ideowy modelu współpracy algorytmu diagnostycznego układu hamulcowego z algorytmem sterowania hamulców

Powyższy schemat przedstawia zasadę współpracy algorytmu diagnostycznego układu hamulcowego z algorytmem sterującym tym układem. Sygnały wejściowe do układu sterowania są zależne od rodzaju poszczególnych rozwiązań, stosowanych przez producentów pojazdu, w ogólności obejmują parametry związane z prędkością samochodu, naciskiem na pedał hamulca, szybkością zmiany nacisku na pedał hamulca, zapotrzebowaniem na energię kinetyczną odzyskiwaną podczas hamowania regeneracyjnego. Wprowadzane są one równocześnie do układu sterowania układem hamulcowym jak i do układu jego diagnostyki (rys. 6). Na podstawie sygnałów wejściowych układ sterowania tworzy rzeczywiste sygnały wyjściowe, wprowadzane do układów wykonawczych. Układ diagnostyki na podstawie tych samych sygnałów wejściowych generuje wzorcowe sygnały wyjściowe, które powinny być rezultatem działania układu sterowania, gdy znajduje się w stanie sprawności technicznej. Następnie w bloku porównawczym 1 następuje porównanie wzorcowych oraz rzeczywistych sygnałów wyjściowych. W ten sposób dokonywana jest diagnostyka układu sterowania, pozwalająca na wykrycie m. in. usterek elektrycznych w tym układzie oraz błędów oprogramowania sterującego.

Możliwe jest sformułowanie algorytmu rozpoznającego rodzaj ustereki na podstawie określonych zestawień rzeczywistych sygnałów wyjściowych uzyskiwanych przy określonych sygnałach wejściowych z sygnałami wzorcowymi. W tym celu zasadnym wydaje się zastosowanie sztucznej sieci neuronowej. Jej zastosowanie polega wówczas na określaniu stopnia podobieństwa rzeczywistych sygnałów wyjściowych, uzyskanych przez algorytm sterowania do sygnałów wzorcowych, związanych z różnymi rodzajami usterek.

Rzeczywiste sygnały wyjściowe są sygnałami sterującymi elementy wykonawcze układu hamulcowego (rys. 6). Rezultatem sterowania elementów wykonawczych jest rzeczywista odpowiedź układu. Stanowią ją wielkości opisujące hamowany pojazd, związane m. in. z opóźnieniem samochodu oraz kół. Odpowiedź układu zależy nie tylko od działania samych hamulców, lecz także od szeregu wielkości nie związanych z układem hamulcowym. Zostały one ujęte na rys. 1, w bloku „rzeczywiste warunki drogowe oraz parametry pojazdu” i obejmują m. in. masę samochodu, warunki przyczepności jezdni oraz jej pochylenie. Równocześnie z doprowadzeniem rzeczywistych sygnałów wyjściowych ze sterownika do elementów wykonawczych układu hamulcowego, wzorcowe sygnały wyjściowe są doprowadzane do modelu obiektu (procesu hamowania). Działanie modelu układu hamulcowego jest opisane poprzez równania bazujące na prawach mechaniki oraz tarcia. Model procesu hamowania musi ponadto uwzględniać, podobnie jak w przypadku działania rzeczywistego układu hamulcowego, parametry pojazdu oraz warunki przyczepności i pochylenia jezdni. Model układu hamulcowego stanowi w istocie model zjawiska hamowania określonego pojazdu, na jezdni o określonej przyczepności oraz pochyleniu.

W bloku porównawczym 2 dokonywane jest porównanie rzeczywistej oraz wzorcowej odpowiedzi układu. W celu dokonania tego porównania, konieczne jest ujednoczenie parametrów pojazdu oraz warunków drogowych, występujących realnie podczas procesu hamowania pojazdu z parametrami pojazdu oraz warunkami drogowymi w modelu obiektu (procesu hamowania). Zatem w modelu procesu hamowania musi zostać zastosowany człon uwzględniający rzeczywiste parametry pojazdu i warunki drogowe (rys. 6.)

Mimo, że opisana powyżej zasada, według której algorytm diagnostyczny układu hamulcowego współpracuje z algorytmem sterującym pracą układu hamulcowego, możliwa jest do wdrożenia w pojeździe z mechatronicznie sterowanym układem hamulcowym, możliwe jest sformułowanie monitora diagnostycznego konwencjonalnego, hydraulicznego układu hamulcowego według podobnej idei. Wówczas następuje pominięcie pierwszego kroku diagnostyki, realizowanego w bloku porównawczym 1. Kierujący oddziałuje na pedał hamulca z określoną siłą oraz prędkością zmiany tej siły w czasie. Następstwem tego oddziaływania jest określony przyrost ciśnienia płynu hamulcowego, doprowadzanego do hamulców każdego z kół. Najłatwiejszym, z punktu widzenia możliwości wdrożenia algorytmu monitora bieżącej diagnostyki układu hamulcowego, jest rozwiązanie polegające na pomiarze ciśnienia w układzie hamulcowym z wykorzystaniem czujnika ciśnienia, wchodzącego w skład systemu ESP. Istnieje możliwość sformułowania modelu diagnostycznego, który porównuje uzyskiwane bieżąco wartości ciśnienia w układzie hamulcowym z wartościami wzorcowymi dla zmiany nacisku na pedał hamulca oraz jego

wartości maksymalnej, występujących podczas określonego fragmentu hamowania. Wzorcowe wartości ciśnienia hamowania mogą być szacowane z wykorzystaniem algorytmu opartego o sztuczną sieć neuronową, wykorzystującą zbiór uczący w postaci określonych przebiegów czasowych ciśnienia hamowania wraz z odpowiadającymi przebiegami czasowymi nacisku na pedał hamulca. Zbiór taki możliwy jest do uzyskania na drodze pomiarów - realizacji procesów hamowania z różnorodną dynamiką. Pomiarów te powinny zostać przeprowadzone przez producenta pojazdu, wdrażającego taki monitor diagnostyczny układu hamulcowego do określonego modelu samochodu.

Omówiona część algorytmu diagnostycznego, sprawdzającego czy ciśnienie hamowania jest właściwe, pozwala na diagnostykę początkowych elementów występujących na drodze płynu hamulcowego od pompy hamulcowej do zacisków kół. Możliwe jest sformułowanie algorytmu przyporządkowującego rodzaj usterki do określonych zestawień przebiegu czasowego ciśnienia w układzie hamulcowym wraz z odpowiadającym przebiegiem czasowym nacisku na pedał hamulca.

Osobny algorytm diagnostyczny stanowi, podobnie jak w przypadku diagnostyki mechatronicznie sterowanego układu hamulcowego, procedura pozwalająca na diagnostykę części mechanicznej układu hamulcowego. Jest ona realizowana analogicznie do działania przedstawionego na rys. 1 bloku porównawczego 2. Przy czym, wielkości wejściowe do układu hamulcowego stanowią, zamiast sygnałów wyjściowych ze sterownika, wartości ciśnienia hamowania, które występują w każdej chwili czasowej przebiegu hamowania wykorzystywanego do diagnostyki. Rzeczywiste wartości ciśnienia hamowania stanowią również wejście do modelu obiektu (procesu hamowania). Blok porównawczy porównuje wzorcową odpowiedź układu (na przykład związaną z przebiegiem opóźnienia pojazdu) z odpowiedzią rzeczywistą.

W niniejszej pracy opracowano tą część algorytmu diagnostycznego, która obejmuje nadzór nad elementami hydrauliczno- mechanicznymi układu hamulcowego. Działanie algorytmu powinno umożliwiać ocenę stanu układu w ramach diagnostyki pokładowej pojazdu. Taki algorytm będzie szczególnie przydatny, a nawet konieczny w pojazdach autonomicznych. Użytkownik tego pojazdu nie będzie miał bezpośredniego odczucia, czy hamulce działają nieprawidłowo. Tą rolę przejmuje program diagnostyczny.

### **3. Cel naukowy, użyteczny oraz tezy pracy**

**Celem naukowym pracy jest opracowanie i weryfikacja diagnostycznej metody oceny skuteczności działania układu hamulcowego podczas bieżącej eksploatacji samochodu oraz próba wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do uściślenia wyników diagnozowania.**

Dokładność tej metody powinna zapewnić klasyfikację stanu technicznego układu hamulcowego jako sprawny bądź niesprawny, w świetle obowiązujących norm prawnych i zapewnić możliwość rozpoznawania pogorszenia skuteczności hamowania względem stanu pełnej sprawności. Jest to istotne z punktu widzenia rozwoju dokładności sterowania systemami bezpieczeństwa czynnego, wykorzystującymi układ hamulcowy.

**Celem użytecznym pracy jest zastosowanie opracowanego monitora diagnostycznego do diagnostyki pokładowej układu hamulcowego.**

Na podstawie analizy literaturowej i badań wstępnych postawiono następującą tezę pracy:  
**Możliwe jest sformułowanie algorytmu diagnostycznego pozwalającego na bieżącą ocenę skuteczności działania układu hamulcowego w czasie jego użytkowania.**

Przebieg hamowania pojazdu zależy od wielu różnorodnych czynników, związanych nie tylko z wymuszeniem zadawanym przez kierującego i stanem technicznym układu hamulcowego. Czynniki te są często nieliniowo związane z parametrami ruchu samochodu, są zmienne w czasie oraz w funkcji prędkości pojazdu. Ich przykłady stanowią: zmienna prędkość jazdy, zmienna przyczepność jezdni, siła oporu powietrza, masa pojazdu, oddziaływanie procesu hamowania silnikiem.

Wyznaczenie tych czynników w rzeczywistych warunkach ruchu pojazdu stanowi trudność. Są one spowodowane ciągle zmieniającymi się warunkami drogowymi oraz zmienną dynamiką procesu hamowania. Zatem w celu sformułowania monitora diagnostycznego układu hamulcowego, wymagana jest analiza wpływu tych czynników na przebieg hamowania. Analiza ta pozwoli na wyodrębnienie wpływu stanu technicznego układu hamulcowego spośród wszystkich czynników wpływających na opóźnienie samochodu.



#### 4. Zasada działania monitora diagnostycznego w systemie diagnostycznym OBD pojazdu

Jak wykazano we wstępie, na podstawie obecnego stanu rozwoju układów mechatronicznych w pojazdach samochodowych, zasadnym rozwiązaniem jest realizacja monitora diagnostycznego układu hamulcowego jako procedury wykonywanej poprzez sterownik systemu ABS/ESP, lub sterownik mechatronicznie sterowanego układu hamulcowego. Monitor diagnostyczny powinien analizować symptomy diagnostyczne, które zagrażają bezpieczeństwu ruchu drogowego, a możliwe są do wykrycia za pomocą czujników układu ABS/ESP i odpowiedniego oprogramowania.

Podczas eksploatacji samochodu osobowego, mogą występować różnorodne symptomy diagnostyczne - objawy niesprawności poszczególnych elementów układu hamulcowego, które rzutują na efektywność jego działania jako całości, czyli na opóźnienie hamowania. Symptomy te mogą objawiać się między innymi jako:

- za mała skuteczność hamowania,
- wycieki w obwodzie hydraulicznym,
- zbyt duża wartość skoku pedału hamulca,
- konieczność wywierania zbyt dużej siły na pedał hamulca aby osiągnąć odpowiednią skuteczność hamowania,
- niemożność utrzymania prostoliniowego toru jazdy przez hamowany pojazd.

Sformułowana w niniejszej pracy koncepcja monitora diagnostycznego skupia się na sygnalizacji zbyt małej skuteczności hamowania zarówno całości układu hamulcowego jak i hamulców związanych z poszczególnymi kołami pojazdu. Zbyt mała skuteczność hamowania to symptom diagnostyczny możliwy do opisu matematycznego oraz możliwy do rozpoznania poprzez analizę wielkości mierzonych w procesie hamowania za pomocą czujników, których sygnały są już wykorzystywane i możliwe do wprowadzenia w sterownik realizujący monitor diagnostyczny. Są to czujniki: przyspieszenia działającego na pojazd, prędkości liniowej pojazdu, prędkości obrotowej kół pojazdu, ciśnienia w układzie hydraulicznym. Matematycznie zmniejszenie skuteczności hamowania może zostać odzwierciedlone poprzez zmniejszenie wartości sił hamujących koła pojazdu, które występują w równaniach ruchu obrotowego kół oraz równaniu ruchu postępowego całego pojazdu.

Kolejnym symptomem diagnostycznym, możliwym do sygnalizacji jest konieczność wytwarzania zbyt dużego nacisku na pedał hamulca w celu osiągnięcia odpowiedniej skuteczności hamowania. Jest to symptom diagnostyczny możliwy do sygnalizacji przy wykorzystaniu czujnika siły nacisku na pedał hamulca, który nie stanowi obowiązkowego wyposażenia współczesnych pojazdów samochodowych.

W układzie hamulcowym ze sterowaniem mechatronicznym (elektrohydraulicznym) możliwe jest opracowanie metodyki rozpoznawania omawianego symptomu diagnostycznego z wykorzystaniem występujących w tym układzie czujników: czujnika przemieszczenia pedału hamulca oraz czujników ciśnienia płynu hamulcowego.

Pozostałe, opisane powyżej symptomy diagnostyczne mogą towarzyszyć zmniejszonej skuteczności hamowania oraz wręcz ją powodować.

Sformułowanie monitora diagnostycznego, sygnalizującego niewielkie pogorszenia skuteczności hamowania często pozwoli na uniknięcie występowania innych usterek w procesie eksploatacji. Opracowany monitor diagnostyczny układu hamulcowego jest monitorem bieżącej diagnostyki, przeprowadzanym w warunkach jazdy samochodu. Należy zatem znajdować parametry diagnostyczne, możliwe do wyznaczenia na podstawie eksploatacyjnych procesów hamowania, które pozwolą na jednoznaczne ustalenie stanu technicznego diagnozowanego obiektu.

Przyjęty w pracy parametr diagnostyczny to współczynnik, który jest współczynnikiem proporcjonalności między siłą hamującą wynikającą z działania układu hamulcowego, a ciśnieniem płynu hamulcowego doprowadzanego do siłowników hamulców, przy założeniu, że podczas hamowania układ ABS nie jest uruchamiany. Współczynnik ten osiąga inną wartość dla hamulca koła przedniego i hamulca koła tylnego. Monitor diagnostyczny układu hamulcowego został w niniejszej pracy sformułowany dla dwuosobowego samochodu osobowego z hydraulicznym układem hamulcowym i układem EBD i ABS. Samochód badawczy, wykorzystywany do realizacji monitora diagnostycznego, był wyposażony w hamulce tarczowe kół przednich oraz hamulce bębnowe kół tylnych. Siły hamujące koła przednie oraz tylne wyrażone z wykorzystaniem omawianego współczynnika proporcjonalności można zapisać w poniższej postaci:

$$F_{hpl} = k_{pl} \cdot p_{pl} \quad (7)$$

$$F_{hpp} = k_{pp} \cdot p_{pp} \quad (8)$$

$$F_{htl} = k_{tl} \cdot p_{tl} \quad (9)$$

$$F_{htp} = k_{tp} \cdot p_{tp} \quad (10)$$

gdzie;

$F_{hpl}$ ,  $F_{hpp}$ ,  $F_{htl}$ ,  $F_{htp}$  – siła hamująca odpowiednio koła przedniego lewego, przedniego prawego, tylnego lewego, tylnego prawego,

$k_{pl}$ ,  $k_{pp}$ ,  $k_{tl}$ ,  $k_{tp}$  – współczynniki proporcjonalności między siłami hamującymi koła, a ciśnieniem w układzie hamulcowym odpowiednio dla kół: przedniego lewego, przedniego prawego, tylnego lewego, tylnego prawego,

$p_{pl}$ ,  $p_{pp}$ ,  $p_{tl}$ ,  $p_{tp}$  – ciśnienie w układzie hamulcowym odpowiednio dla kół: przedniego lewego, przedniego prawego, tylnego lewego, tylnego prawego.

Powyższe zależności (wzory 7 do 10) są słuszne zarówno dla hamulców tarczowych jak i bębnowych, przy czym dla hamulców bębnowych zależność ta jest bardziej skomplikowana (uwzględnia większą liczbę parametrów konstrukcyjnych niż w hamulcach tarczowych). W przypadku bębnowych hamulcowych wpływ współczynnika tarcia szczęk hamulcowych i bębnowych na wartość współczynników  $k_{tl}$  oraz  $k_{tp}$  jest większy niż w wpływ współczynnika tarcia klocków i tarcz hamulcowych na wartości współczynników  $k_{pl}$  oraz  $k_{pp}$ .

Jeżeli układ hamulcowy pojazdu nie zawiera mechanicznego korektora sił hamowania (pojazdy z funkcją EBD), to w zakresie nie działania układu ABS możliwe jest zastąpienie ciśnień  $p_{pl}, p_{pp}, p_{tl}, p_{tp}$  wspólną wartością ciśnienia  $p$ . Wyrażenie opisujące sumę sił hamujących pojazd  $\sum F_h$ , uwzględniające uprzednio zdefiniowane współczynniki  $k_{pl}, k_{pp}, k_{tl}, k_{tp}$  ma wtedy postać:

$$\sum F_h = (k_{pl} + k_{pp} + k_{tl} + k_{tp}) \cdot p \quad (11)$$

Stąd współczynnik proporcjonalności  $\sum k$  między sumą sił hamujących, a ciśnieniem  $p$  jest równy:

$$\sum k = (k_{pl} + k_{pp} + k_{tl} + k_{tp}) = \frac{\sum F_h}{p} = \frac{\sum M_h}{p \cdot r_D} \quad (12)$$

gdzie:

- $\sum F_h$  – suma sił hamujących koła pojazdu,
- $\sum M_h$  – suma momentów hamujących koła pojazdu,
- $r_D$  – promień dynamiczny koła, założono taką samą wartość  $r_D$  dla kół przednich i tylnych.

Między parametrem  $\sum k$ , a skutecznością hamowania  $sk$  wyrażaną jako stosunek opóźnienia hamowania  $b_h$  do przyspieszenia ziemskiego  $g$  zachodzi zależność uproszczona:

$$sk_h = \frac{b_h}{g} = \frac{\sum k \cdot p}{G} \quad (13)$$

Parametr  $\sum k$  może zatem zostać wykorzystany do bieżącego określenia współczynnika skuteczności hamowania. Ponadto, coraz mniejsza wartość parametru  $\sum k$  sygnalizuje o konieczności wywierania coraz większej siły na pedale hamulca aby osiągnąć dane opóźnienie hamowania, co stanowi symptom diagnostyczny nie sygnalizowany bezpośrednio w monitorze układu hamulcowego. Jest to zagadnienie o szczególnym znaczeniu praktycznym, ponieważ kierowca eksploatujący dany pojazd, często przyzwyczajają się do łagodnie postępującego osłabienia hamulców, nieświadomie hamując z coraz większym naciskiem na pedał hamulca. Gdy wartość współczynnika

$\Sigma k$ , uzyskana na podstawie danego przebiegu hamowania, jest mniejsza niż wzorcowa wartość tego współczynnika, wówczas ciśnienie w układzie hamulcowym, konieczne do wytworzenia danej siły hamującej i zadanego opóźnienia jest większe niż dla hamulców sprawnych.

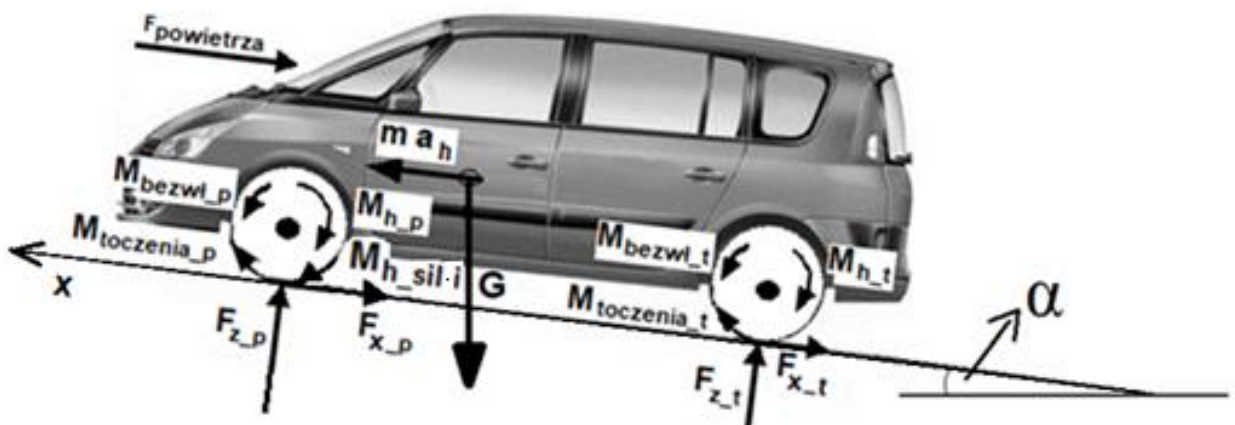
W przypadku układu hamulcowego z korektorem sił hamowania w celu wyznaczenia wartości  $\Sigma k$  istnieje konieczność znajomości rozdziału sił hamujących na poszczególne koła lub wartości ciśnienia, dochodzącego do siłowników hamulców wszystkich kół pojazdu.

## 5. Model matematyczny proponowanego monitora układu hamulcowego

### 5.1. Algorytm diagnozowania układu hamulcowego jako całości

Model matematyczny proponowanego monitora diagnostycznego układu hamulcowego bazuje na równaniach opisujących ruch samochodu oraz jego kół podczas hamowania prostoliniowego. Nie uwzględniono dynamiki poprzecznej hamowanego samochodu, co warunkuje ocenę stanu technicznego hamulców na podstawie procesów hamowania prostoliniowego. Sformułowano dwa warianty modelu matematycznego monitora układu hamulcowego. Pierwszy wariant pozwala na całościową ocenę stanu hamulców. Jego działanie polega na obliczaniu wartości współczynnika  $\Sigma k$  w każdej chwili procesu prostoliniowego hamowania samochodu.

Zaletą takiego podejścia jest kontrola stanu hamulców w szerokim zakresie opóźnień hamowania, a nie tylko dla hamowań maksymalnie intensywnych, jak to jest realizowane w okresowych badaniach hamulców. Teoretyczne podstawy wyznaczania tego współczynnika i wielkości fizyczne do jego obliczania przedstawiono poniżej (rys. 7).



Rys. 7. Wielkości fizyczne działające na samochód w procesie hamowania prostoliniowego [49]

Równanie ruchu prostoliniowego hamowanego pojazdu, wyznaczone w oparciu o wielkości przedstawione na rys. 7, opisuje poniższy wzór:

$$m \cdot a_h = \sum F_x + F_{powietrza} \pm G \cdot \sin(\alpha) \quad (14)$$

gdzie:

$\sum F_x$  – suma sił wzdłużnych, działających między każdym kołem pojazdu, a nawierzchnią,

$m$  – masa pojazdu,

$a_h$  – opóźnienie hamowania pojazdu,

$G$  – ciężar pojazdu,

$\alpha$  – kąt pochylenia jezdni,

$F_{powietrza}$  – siła oporów powietrza, dana wzorem:

$$F_{powietrza} = \frac{A \cdot c_x \cdot \rho \cdot v_s^2}{2} \quad (15)$$

gdzie:

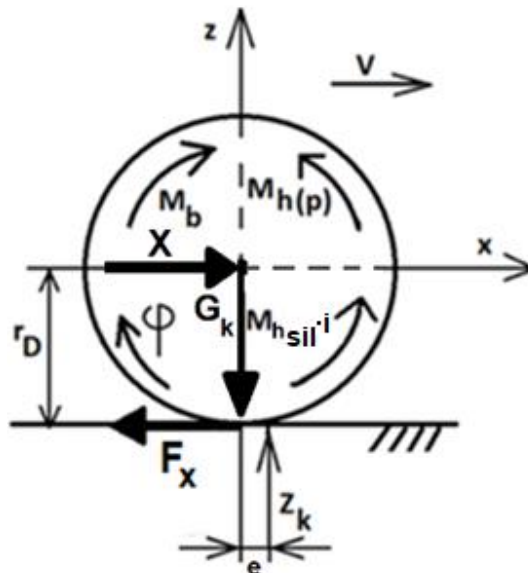
$A$  – pole powierzchni czołowej pojazdu,

$c_x$  – współczynnik kształtu,

$\rho$  – gęstość powietrza,

$v_s$  – prędkość pojazdu.

Siły  $F_x$  czyli wypadkowe siły działające na styku poszczególnych kół z nawierzchnią i będące składowymi sumy sił  $\sum F_x$  można wyznaczyć wykorzystując równanie momentów sił hamowanego koła, które przedstawia rys. 8.



Rys.8. Hamowane koło samochodu wraz z występującymi podczas procesu hamowania wielkościami fizycznymi

Na podstawie przedstawionych na powyższym rysunku wielkości fizycznych można zapisać równanie równowagi momentów sił działających na koło w ruchu obrotowym:

$$F_x \cdot r_D - M_h(p) - M_{h_{sil}} \cdot i + M_b - Z_k \cdot e = 0 \quad (16)$$

gdzie:

$F_x$  – wypadkowa siła działająca na styku koła z jezdnią w kierunku wzdłużnym,

$r_D$  – promień dynamiczny koła,

$M_h(p)$  – moment hamujący pojedyncze koło, określony jako funkcja ciśnienia w układzie hamulcowym ( $p$ ),

$M_{h_{sil}}$  – moment hamujący silnika, przypadający na koło napędzane, w przypadku analizy ruchu koła nienapędzanego jest on pomijany,

$M_b$  – moment bezwładności koła,

$i$  – przełożenie w układzie napędowym,

$Z_k$  – siła reakcji podłoża na hamowane koło samochodu,

$e$  -wartość przemieszczenia osi działania siły reakcji  $Z_k$  względem osi symetrii koła, związana z oporami toczenia.

Przedstawione powyżej równanie dotyczy napędzanego koła pojazdu. W przypadku koła nienapędzanego moment hamujący silnika nie jest uwzględniany. Na rys. 8 przedstawiono ponadto siły, które nie generują momentów obrotowych, oddziałujące na obracające się koło pojazdu. Siły te oddziałują na oś koła. Są to poprzeczna oraz pionowa siła reakcji między osią koła, a jej połączeniem z nadwoziem pojazdu poprzez zawieszenie, oznaczone odpowiednio jako X oraz  $G_k$ .

Na podstawie równań ruchu obrotowego kół pojazdu, wyznaczone są siły wzdłużne, działające na styku koła przedniego ( $F_{x_p}$ ) oraz tylnego ( $F_{x_t}$ ) z nawierzchnią. Do ich wyznaczenia przyjęto kierunek i zwrot osi ruchu pojazdu (osi x) zgodne z rysunkiem 8. Siły  $F_{x_p}$  oraz  $F_{x_t}$  opisywane są przez poniższe wyrażenia:

$$F_{x_p} = \frac{M_{h_p}(p) + M_{h_{sil}} \cdot i - M_{b_p} + Z_{k_p} \cdot e}{r_D} = \frac{M_{h_p}(p)}{r_D} + Z_{k_p} \cdot f + \frac{M_{h_{sil}} \cdot i}{r_D} - \frac{J_{k_p} \cdot \ddot{\varphi}_{k_p}}{r_D} \quad (17)$$

$$F_{x_t} = \frac{M_{h_t}(p) - M_{b_t} + Z_{k_t} \cdot e}{r_D} = \frac{M_{h_t}(p)}{r_D} + Z_{k_t} \cdot f - \frac{J_{k_t} \cdot \ddot{\varphi}_{k_t}}{r_D} \quad (18)$$

gdzie:

$M_{h_p}(p)$  – moment hamujący koło przednie, zależny od ciśnienia w układzie hamulcowym  $p$ ,

$M_{h_t}(p)$  – moment hamujący koło tylne, zależny od ciśnienia w układzie hamulcowym  $p$ ,

$r_D$  – promień dynamiczny kół pojazdu,

$f$  – współczynnik oporu toczenia kół,  $f = \frac{e}{r_D}$ ,

$Z_{k_p}$  – nacisk koła przedniego na jezdnię,

$Z_{k_t}$  – nacisk koła tylnego na jezdnię,

$M_{b_p}$  – moment oporów bezwładności koła przedniego,  $M_{b_p} = J_{k_p} \cdot \ddot{\varphi}_{k_p}$ ,

$M_{b_t}$  – moment oporów bezwładności koła tylnego,  $M_{b_t} = J_{k_t} \cdot \ddot{\varphi}_{k_t}$ ,

$J_{k_p}$  – masowy moment bezwładności koła przedniego,

$J_{k_t}$  – masowy moment bezwładności koła tylnego,

$\ddot{\varphi}_{k_p}, \ddot{\varphi}_{k_t}$  – opóźnienie kątowe odpowiednio koła przedniego i tylnego,

$M_{h_{sil}}$  – moment hamowania silnikiem spalinowym, przypadający na jedno z kół napędowych,

$i$  – przełożenie w układzie napędowym pojazdu.

Wykorzystując zdefiniowane uprzednio parametry  $k_{pl}, k_{pp}, k_{tl}$ , i  $k_{tp}$  oraz powyższe zależności, możliwe jest zapisanie sumy sił działających na styku każdego z kół przednich z nawierzchnią  $\sum F_x$  w poniższej postaci:

$$\sum F_x = (k_{pl} + k_{pp} + k_{tl} + k_{tp}) \cdot p + (Z_{k_{pl}} + Z_{k_{pp}} + Z_{k_{tl}} + Z_{k_{tp}}) \cdot f + \frac{2 \cdot M_{h_{sil}} \cdot i}{r_D} - \frac{2 \cdot M_{b_p} + 2 \cdot M_{b_t}}{r_D} \quad (19)$$

gdzie

$Z_{k_{pl}}, Z_{k_{pp}}, Z_{k_{tl}}$  i  $Z_{k_{tp}}$  oznaczają naciski kół pojazdu na jezdnię - odpowiednio koła przedniego lewego, przedniego prawego, tylnego lewego oraz tylnego prawego.

Dla kół tylnych, nienapędzanych, pomijamy moment hamujący silnika. Po wstawieniu powyższego wzoru do równania ruchu hamowanego pojazdu w kierunku prostoliniowym (wzór 14) i przekształceniu tego równania, otrzymujemy zależność między parametrem diagnostycznym  $\sum k$  a opóźnieniem hamowania i wielkościami fizycznymi wpływającymi na przebieg procesu hamowania:

$$\sum k = k_{pl} + k_{pp} + k_{tl} + k_{tp} = \frac{m \cdot a_h - G \cdot \cos(\alpha) \cdot f - \frac{2 \cdot M_{h_{sil}} \cdot i}{r_D} + \frac{2 \cdot M_{b_p} + 2 \cdot M_{b_t}}{r_D} - \frac{A \cdot c_x \cdot \rho \cdot v_s^2}{2} \pm G \cdot \sin(\alpha)}{p} \quad (19a)$$

Powyższy wzór pozwala na obliczeniowe wyznaczanie wielkości  $\sum k$  na podstawie danych pomiarowych, pozyskanych w bieżących procesach hamowania pojazdu. Obliczoną wartość porównujemy z  $\sum k$  wyznaczoną dla samochodu ze sprawnym układem hamulcowym. Sposoby wyznaczania wzorcowych wartości parametru  $\sum k$  sprawnego układu przedstawiono w kolejnym rozdziale.

W dalszej części pracy dokonano rozbudowy monitora diagnostycznego, pozwalającej na wyznaczenie wartości współczynnika  $k$  dla każdego z kół w oparciu o model współpracy koła ogumionego z nawierzchnią jezdni. Omawiane podejście teoretyczne poparto badaniami doświadczalnymi. Przeanalizowano rzeczywiste możliwości wyznaczania parametrów  $k$  dla każdego z kół pojazdu, ukierunkowane na ocenę nierówności sił hamujących koła.



Realizacja monitora diagnostycznego procesu hamowania, polegająca na wyznaczeniu wartości  $\sum k$  w każdej chwili procesu hamowania z wykorzystaniem wzoru (19a), wymaga pomiaru podstawowych wielkości fizycznych związanych z ruchem pojazdu i przebiegiem hamowania.

Wielkości te stanowią:

- prędkość pojazdu,
- prędkości obrotowe kół pojazdu
- ciśnienie w układzie hamulcowym
- opóźnienie hamowania pojazdu,
- przełożenie w układzie napędowym,
- pochylenie jezdni,
- moment obrotowy hamowania silnikiem,
- masa pojazdu,
- opory toczenia.

Wyznaczanie powyższych wielkości stanowi problemy, wymagające opracowania odpowiedniej metodyki badawczo - obliczeniowej. Istotnym czynnikiem, z punktu widzenia wdrożenia monitora diagnostycznego w produkowanych pojazdach samochodowych jest możliwość wyznaczenia przedstawionych powyżej wielkości z wykorzystaniem czujników będących standardowym wyposażeniem pojazdu. Prędkość liniową pojazdu dla celów realizacji monitora diagnostycznego można obliczać w sposób, stosowany w algorytmie sterowania systemem ABS, w sytuacjach nie powodujących jego uruchomienia [42]:

$$v_s = \dot{\phi}_{kmax} \cdot r_D \quad (20)$$

gdzie

$\dot{\phi}_{kmax}$  to prędkość kątowna koła pojazdu, które w procesie hamowania obraca się z największą prędkością.

## 5.2. Analiza możliwości diagnozowania hamulców poszczególnych kół pojazdu

Drugi wariant monitora diagnostycznego stanowi rozbudowanie monitora dokonującego całościowej oceny stanu technicznego hamulców pojazdu w celu zapewnienia możliwości oceny stanu technicznego hamulców poszczególnych kół. W tym celu wprowadzone zostają parametry diagnostyczne  $k_{pl}, k_{pp}, k_{tl}, k_{tp}$  związane z poszczególnymi kołami (odpowiednio: przednie lewe, przednie prawe, tylne lewe, tylne prawe). Związki między tymi parametrami oraz momentami hamującymi poszczególnych kół, przy przyjęciu równego ciśnienia w obwodzie kół przednich i tylnych, są następujące:

$$M_{h_{pl}}(p) = k_{pl} \cdot p \cdot r_D \quad (21)$$

$$M_{h_{pp}}(p) = k_{pp} \cdot p \cdot r_D \quad (22)$$

$$M_{h_{tl}}(p) = k_{tl} \cdot p \cdot r_D \quad (23)$$

$$M_{h_{tp}}(p) = k_{tp} \cdot p \cdot r_D \quad (24)$$

gdzie:

$M_{h_{pl}}(p)$  – moment hamujący koło przednie lewe,

$M_{h_{pp}}(p)$  – moment hamujący koło przednie prawe,

$M_{h_{tl}}(p)$  – moment hamujący koło tylne lewe,

$M_{h_{tp}}(p)$  – moment hamujący koło tylne prawe.

Na podstawie równania ruchu hamowanego koła (wzór nr 15), z uwzględnieniem powyższych wyrażeń opisujących momenty hamujące, można wyznaczyć parametry  $k_{pl}$ ,  $k_{pp}$ ,  $k_{tl}$  i  $k_{tp}$ :

$$k_{pl} = \frac{F_{x_{pl}} \cdot r_D - M_{h_{sil}} \cdot i + M_{b_p} - Z_{k_p} \cdot e}{r_D \cdot p} \quad (25)$$

$$k_{pp} = \frac{F_{x_{pp}} \cdot r_D - M_{h_{sil}} \cdot i + M_{b_p} - Z_{k_p} \cdot e}{r_D \cdot p} \quad (26)$$

$$k_{tl} = \frac{F_{x_{tl}} \cdot r_D + M_{b_t} - Z_{k_t} \cdot e}{r_D \cdot p} \quad (27)$$

$$k_{tp} = \frac{F_{x_{tp}} \cdot r_D + M_{b_t} - Z_{k_t} \cdot e}{r_D \cdot p} \quad (28)$$

gdzie

$F_{x_{pl}}$ ,  $F_{x_{pp}}$ ,  $F_{x_{tl}}$ ,  $F_{x_{tp}}$  – siła wzdłużna działająca na styku nawierzchni i odpowiednio koła przedniego lewego, przedniego prawego, tylnego lewego i tylnego prawego.

W celu zastosowania powyższych wzorów do obliczenia wartości parametrów  $k_{pl}$ ,  $k_{pp}$ ,  $k_{tl}$  i  $k_{tp}$  konieczna jest znajomość przebiegu sił działających na styku kół z nawierzchnią w kierunku prostoliniowym. W celu ich wyznaczenia konieczna jest znajomość charakterystyki współczynnika przyczepności wzdłużnej w funkcji poślizgu obwodowego kół, czyli modelu współpracy koła ogumionego z nawierzchnią jezdni. Zastosowanie takiego modelu w monitorze diagnostycznym układu hamulcowego wymaga obliczania wartości poślizgu obwodowego koła  $s_x$ . danego wzorem:

$$s_x = \frac{v_s - \dot{\phi}_k \cdot r_D}{v_s}; \text{ dla } v_s \neq 0 \quad (29)$$

gdzie  $\dot{\phi}_k$  to prędkość kątowa koła,  $v_s$  to prędkość liniowa osi koła.

Dokładne wyznaczenie poślizgu koła wymaga pomiaru jego prędkości obwodowej oraz prędkości liniowej osi koła. Często występującym i zastosowanym również w niniejszej pracy uproszczeniem jest zastąpienie pomiaru prędkości liniowej osi koła, którego poślizg wyznaczamy, pomiarem prędkości liniowej samochodu. Zastosowana metodyka pomiarowa pozwoliła na przyjęcie prędkości  $v_{sam}$  we wzorze (29) jako prędkości liniowej samochodu, mierzonej za pomocą głowicy optycznej Correvit. Natomiast prędkość obwodowa koła obliczana była we wzorze jako iloczyn jego prędkości obrotowej (mierzonej za pomocą czujnika impulsowego) oraz promienia dynamicznego koła.

W praktycznej realizacji monitora dla poszczególnych kół do obliczenia prędkości samochodu możliwe jest wykorzystanie prędkość koła obracającego się najszybciej. Taki sposób stosowany jest w metodyce wyznaczania prędkości samochodu w algorytmie sterowania systemem ABS [42].

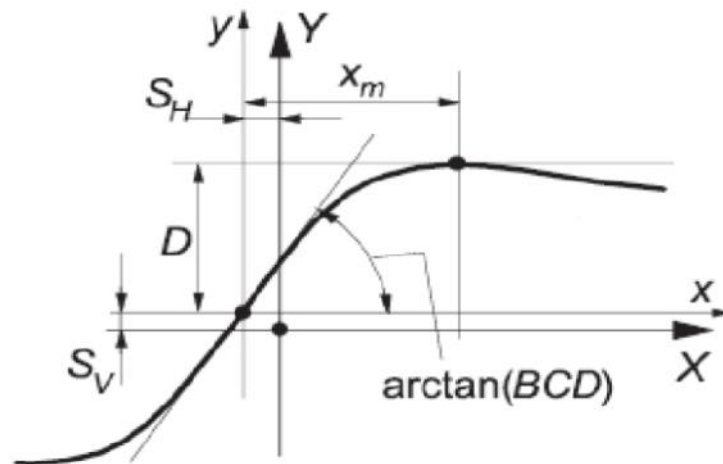
Realizacja przedstawionego monitora diagnostycznego hamulców poszczególnych kół pojazdu przewidywana jest jako realizacja warunkowa, odbywająca się po wcześniejszym porównaniu przebiegów prędkości obrotowej kół tej samej osi. Gdy ich przebieg jest zbliżony (z odpowiednim, wymagającym doświadczalnego wyznaczenia zakresem tolerowanych różnic) wówczas procedura wykrywania osłabienia hamulców poszczególnych kół nie jest realizowana. Wówczas w przypadku wykrycia całościowego osłabienia układu hamulcowego przyjmuje się, że parametr diagnostyczny  $k_i$  dla każdego z kół danej osi pojazdu zmniejszył się w procencie równym procentowej wartości zmniejszenia się parametru  $\sum k$  dla całego pojazdu względem wartości wzorcowej. W przypadku wystąpienia różnic prędkości obrotowej kół tej samej osi, zaproponowano indywidualne wyznaczenie parametru  $k_i$  dla poszczególnych kół.

Wyznaczenie parametrów  $k_p$  i  $k_t$  według zależności (25) – (28) wymaga znajomości siły wzdłużnej  $F_x$  (rys. 8).

Poniżej przedstawiono opis wybranych modeli współpracy koła ogumionego z nawierzchnią, pozwalających na określenie zależności siły wzdłużnej na styku kół z jezdnią od ich poślizgu obwodowego. Wybrane modele to:

- model „MF” (Magic Formula), sformułowany przez H. B. Pacejkę [20],
- model Dugoff’a [28],
- model liniowy, wykorzystujący kąt nachylenia zależności współczynnika przyczepności wzdłużnej od poślizgu wzdłużnego koła.

Pierwszy ze stosowanych modeli („MF”) to model semi-empiryczny [20]. Umożliwia on analizę sił przenoszonych poprzez styk koła z jezdnią w warunkach ruchu prostoliniowego pojazdu jak i złożenia siły wzdłużnej i poprzecznej, działających na styku koła z jezdnią w warunkach jazdy po łukach drogowych. Na podstawie badań szerokiego zakresu typów ogumienia oraz nawierzchni drogowych, wyznaczono pewne podobieństwa geometryczne zależności sił na styku koła z jezdnią od poślizgu koła, uzyskiwanych przy zastosowaniu opon różnych typów i rozmiarów, na różnorodnych typach nawierzchni. Graficzne przedstawienie wielkości charakteryzujących zależność siły przenoszonej na styku koła z jezdnią od poślizgu wzdłużnego koła przedstawia rys. 9.



Rys.9. Schematyczna zależność siły przenoszonej przez styk koła z jezdnią (Y) od poślizgu wzdłużnego koła (x) wraz z opisującymi ją wielkościami charakterystycznymi, zgodnie z modelem „Magiczna Formuła”. [20]

Ogólna postać modelu „MF”, wykorzystująca przedstawione na powyższym rysunku wielkości, dana jest wzorami:

$$y = D \cdot \sin[C \cdot \arctan\{B \cdot x - E \cdot (B \cdot x - \arctan(B \cdot x))\}] \quad (30)$$

$$Y(X) = y(x) + S_V \quad (31)$$

$$x = X + S_H \quad (32)$$

gdzie:

X- wartości wejściowe do modelu - poślizg obwodowy koła lub kąt znoszenia bocznego,

Y- wartości wyjściowe z modelu - siła wzdłużna na styku koła z jezdnią lub siła poprzeczna na styku koła z jezdnią lub moment centrujący,

x, y- odpowiednio wartości wejściowe oraz wyjściowe modelu MF bez uwzględnienia zakłóceń, którymi są zaburzenia stateczności oraz kierowności pojazdu oraz znaczne opory toczenia koła,

$S_H$  – wartość przesunięcia krzywej opisywanej przez zależność  $Y(X)$  względem początku układu współrzędnych w kierunku wzdłużnym, rys. 9,

$S_V$  – wartość przesunięcia krzywej  $Y(X)$  względem początku układu współrzędnych w kierunku poprzecznym, rys. 9.

Współczynniki  $B$ ,  $C$ ,  $D$  i  $E$  są parametrami modelu „MF” związanymi ze stanem nawierzchni drogowej, których wartości możliwe są do wyznaczenia na podstawie badań doświadczalnych [24]. Badania te są często przeprowadzane z wykorzystaniem tzw. przyczepy dynamometrycznej [37].

W monitorze diagnostycznym hamulców poszczególnych kół możliwe jest zastosowanie uproszczonego wariantu tego modelu, nie obejmującego przypadku konkretnego pojazdu z jego rodzajem i zużyciem ogumienia. Wariant ten to zależność siły działającej na styku koła z jezdnią w kierunku wzdłużnym od poślizgu obwodowego koła  $s$ , zdefiniowana wzorem (33):

$$F_x = Z_k \cdot D \cdot \sin\{C \cdot \arctan[B \cdot s - E \cdot (B \cdot s - \arctan(B \cdot s))]\} \quad (33)$$

Ze względu na nadmierne zwiększenie ceny samochodu, przy wdrażaniu monitora układu hamulcowego nie istnieje możliwość wyposażenia pojazdu w aparaturę pozwalającą na bieżące wyznaczenie współczynników  $D$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $E$  modelu „MF”. Zatem zastosowanie omawianej formy modelu Magiczna Formuła (wzór 33) w monitorze diagnostycznym możliwe jest jedynie przy przyjęciu wartości współczynników  $B$ ,  $C$ ,  $D$  i  $E$ , dla określonego stanu nawierzchni jezdni. Zostały one podane w pracy [25] i ujęte w tab. 2.

Tab.2. Typowe wartości współczynników modelu “Magiczna Formuła” dla czterech stanów nawierzchni [25]

<b>rodzaj nawierzchni</b>	$D = \mu_h$	$B$	$C$	$E$
<b>suchy asfalt</b>	1	10	1.9	0.97
<b>mokry asfalt</b>	0.82	12	2.3	1
<b>śnieg</b>	0.3	5	2	1
<b>lód</b>	0.1	4	2	1

Na podstawie powyższej tabeli można stwierdzić że zależność siły na styku koła z jezdnią od poślizgu wzdłużnego koła, opisywana przez model “Magic Formula” dla suchego i mokrego asfaltu różni się nieznacznie. Z kolei warunki jezdni ośnieżonej i oblodzonej powodują znaczne różnice w przebiegu zależności  $F_x(s)$  względem suchego i mokrego asfaltu. Ponieważ monitor diagnostyczny działa prawidłowo dla opóźnień dużych, metodykę określania przyczepności jezdni dla monitora diagnostycznego należy uznać za wystarczającą, gdy pozwala ona na klasyfikację warunków przyczepności na dwa poziomy: suchy i mokry asfalt oraz śnieg i lód. Pierwszy

z tych poziomów pozwala na realizację procesu diagnostyki hamulców. Rozpoznanie takiego stanu jezdni wiąże się z oceną opóźnienia pojazdu. Będą to wartości większe od występujących na jezdni oblodzonej i zaśnieżonej. Zgodna z tym założeniem metodyka rozpoznawania warunków przyczepności jezdni została przedstawiona w rozdziale 7.2.

Kolejnym, stosowanym modelem współpracy koła ogumionego z nawierzchnią jest model Dugoff'a [28]. Model ten, podobnie jak uprzednio opisywany model „Magiczna Formuła” pozwala na wyznaczenie siły działającej na styku koła z nawierzchnią zarówno w kierunku wzdłużnym jak i poprzecznym. Model ten zakłada jednorodny rozkład nacisku pionowego opony na całą powierzchnię jej kontaktu z nawierzchnią jezdni. W przeciwieństwie do modelu „Magic Formula” model Dugoff'a jest modelem uzyskanym analitycznie, z wykorzystaniem równań równowagi sił działających na pojazd [28]. Wykorzystuje on sztywność opony w kierunku osiowym oraz promieniowym jako niezależne parametry. Wartość siły działającej na styku koła ogumionego z nawierzchnią w kierunku wzdłużnym, opisywana jest w modelu Dugoff'a za pomocą poniższego wzoru:

$$F_x = C_\sigma \frac{s}{1+s} \cdot f(\lambda) \quad (34)$$

gdzie:

- s-poślizg wzdłużny koła,
- $C_\sigma$ -sztywność wzdłużna opony,
- $f(\lambda)$ -funkcja przyjmująca wartości:

$$f(\lambda) = (2 - \lambda) \cdot \lambda, \text{ dla } \lambda < 1, \quad (35)$$

$$f(\lambda) = 1, \text{ dla } \lambda \geq 1. \quad (36)$$

gdzie  $\lambda$  to parametr dany wzorem:

$$\lambda = \frac{\mu \cdot Z_k (1-s)}{2 \cdot \{(C_\sigma \cdot s)^2 + (C_\alpha \cdot \tan \alpha)^2\}^{\frac{1}{2}}} \quad (37)$$

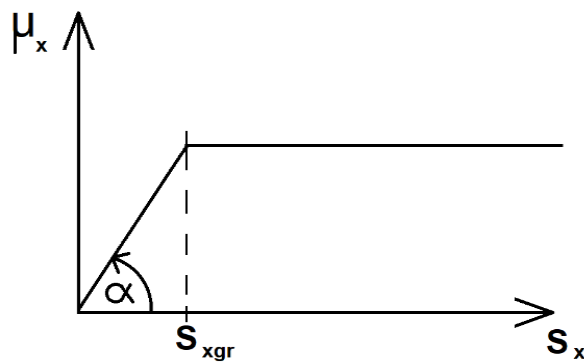
gdzie:

- $C_\alpha$ -sztywność skrętna opony,
- $\alpha$ - kąt znoszenia bocznego opony.

Wobec założenia działania monitora diagnostycznego układu hamulcowego, związanego z hamowaniem prostoliniowym, powyższy wzór w wykorzystywanej formie przyjmuje postać:

$$\lambda = \frac{\mu \cdot Z_k (1 - s)}{2 \cdot \{(C_\sigma \cdot s)^2\}^{\frac{1}{2}}} \quad (38)$$

Trzeci, z wykorzystywanych modeli współpracy koła ogumionego z nawierzchnią drogową to model, opisujący liniową zależność współczynnika przyczepności wzdłużnej jezdni od poślizgu wzdłużnego koła w zakresie niewielkich poślizgów, nie powodujących uruchomienia systemu ABS podczas hamowania pojazdu (rys. 10). Ponieważ monitor diagnostyczny układu hamulcowego działa wyłącznie w przypadku hamowań bez działania systemu ABS, zastosowanie omawianego modelu współpracy koła z nawierzchnią jest możliwe. Na rys. 10 przedstawiono poglądową zależność współczynnika przyczepności wzdłużnej koła  $\mu_x$  od jego poślizgu wzdłużnego  $s_x$ .



Rys. 10. Schematyczna zależność współczynnika przyczepności wzdłużnej koła  $\mu_x$  od jego poślizgu obwodowego  $s_x$  dla modelu liniowego

Kąt  $\alpha$  oznacza kąt nachylenia rosnącego fragmentu zależności  $\mu_x(s_x)$  (rys. 10). Wielkość  $s_{xgr}$  stanowi graniczną wartość poślizgu obwodowego koła. Jest to wartość poślizgu, której przekroczenie skutkuje uruchomieniem układu przeciwblokującego ABS. Monitor diagnostyczny układu hamulcowego działa dla wartości poślizgu  $s_x < s_{xgr}$ . Dla tego zakresu poślizgu obwodowego można zapisać:

$$\tan(\alpha) = \frac{\mu_x}{s_x} \quad (39)$$

Współczynnik przyczepności wzdłużnej dany jest wzorem:

$$\mu_x = \frac{F_x}{Z_k} \quad (40)$$

Zatem na podstawie powyższych wzorów wypadkowa siła wzdłużna między kołem a nawierzchnią w zakresie działania monitora diagnostycznego może być opisana jako:

$$F_x = Z_k \cdot s_x \cdot \tan(\alpha) \quad (41)$$

Wstępne badania wykonano z zastosowaniem modelu MF. Wykazały one, że uzyskiwane wartości parametrów diagnostycznych hamulców kół pojazdu  $k_{pl}$ ,  $k_{pp}$ ,  $k_{tl}$  i  $k_{tp}$  w przypadku badania pojazdu o sprawnym układzie hamulcowym cechowały się zawyżeniem względem wartości wzorcowych. Prawdopodobną przyczyną tego faktu jest zastosowanie ogólnej formy modelu MF, z typowymi wartościami jego współczynników do rodzaju opon używanych w pojeździe badawczym i nawierzchni jezdni, na której wykonywano próby hamowania. Wobec powyższych trudności, do analizy działania monitora diagnostycznego hamulców poszczególnych kół pojazdu wykorzystano zależność  $F_x(s)$  wyznaczoną na podstawie literatury [29]. Jej zastosowanie zostało szerzej omówione w rozdziale 7.1.

Różnica sił  $F_x$  kół danej osi może wynikać z niesprawności hamulców ale również z chwilowej różnicy w przyczepności pod prawym i lewym kołem. Aby program diagnostyczny właściwie ocenił przyczynę nierówności, sprawdzenie różnicy sił  $F_x$  koła prawego i lewego powinno być powtórzone wielokrotnie.

Realizacja monitora diagnostycznego wymaga znajomości parametrów konstrukcyjnych samochodu, jego obciążenia, warunków ruchu pojazdu, parametrów pracy silnika i układu napędowego. Metodykę wyznaczania tych wielkości opracowano z wykorzystaniem czujników, stanowiących wyposażenie współczesnych pojazdów samochodowych.

Parametry związane z cechami konstrukcyjnymi pojazdu powinny być wprowadzane przez producenta pojazdu do algorytmu monitora diagnostycznego w sterowniku pojazdu. Natomiast parametry związane z warunkami ruchu pojazdu oraz jego obciążeniem powinny być wyznaczone bieżąco w eksploatacyjnych procesach hamowania pojazdu. Są to: przyczepność jezdni, siła oporu wzniesienia pojazdu, moment hamujący silnika oraz masa pojazdu.

Ponadto kolejnym czynnikiem, przeanalizowanym pod kątem wpływu na efektywność działania monitora diagnostycznego są nierówności nawierzchni drogowej. Pozwala to na sformułowanie warunków zadziałania monitora, związanych z ewentualnym przekroczeniem nierówności jezdni. Hamowanie na nierównej nawierzchni ma wpływ na pomiar prędkości kół i wyniki obliczeń parametru  $k_i$  dla kół pojazdu.



### 5.3. Metoda porównawcza oceny hamulców poszczególnych kół

Prostszym sposobem oceny hamulców kół jest obliczenie względnej różnicy parametrów diagnostycznych kół [43, 48]. Dla hamulców kół przednich różnica parametrów  $k_{pp}$  i  $k_{pl}$  względem parametru dla koła o większej jego wartości ( $k_w$ ) wynosi:

$$\Delta k_p = \frac{k_{pp} - k_{pl}}{k_w} \quad (42)$$

Przyjmując, że większy moment hamujący występuje na kole prawym, oraz wprowadzając zależności (25) - (28) można obliczyć, że dla kół przednich różnica  $\Delta k_p$  wynosi:

$$\Delta k_p = \frac{k_{pp} - k_{pl}}{k_{pp}} = \frac{F_{x_{pp}} \cdot r_D - F_{x_{pl}} \cdot r_D}{F_{x_{pp}} \cdot r_D - M_{hsil} \cdot i + M_{bp} - Z_k \cdot e} \quad (43)$$

Różnica:

$$M_{bp} - Z_k \cdot e = J_k \cdot (\ddot{\phi}_{pp} - \ddot{\phi}_{pl}) - Z_k \cdot e \quad (44)$$

dla ustalonych okresów hamowania wynosi około 1% wartości momentu hamującego koła.

Przez  $\ddot{\phi}_{pp}$  oraz  $\ddot{\phi}_{pl}$  oznaczono opóźnienie kątowe odpowiednio koła przedniego prawego i przedniego lewego. Siła  $F_x$  opisana jest jako:

$$F_x = Z \cdot \mu = Z_k \cdot s_x \cdot \tan(\alpha) \quad (45)$$

Wstawiając tą zależność do wyrażenia (43) i pomijając różnicę  $M_{bp} - Z_k \cdot e$  jako małą otrzymujemy:

$$\Delta k_p = \frac{(Z_{k_{pp}} \cdot s_{x_{pp}} \cdot \tan(\alpha_1) - Z_{k_{pl}} \cdot s_{x_{pl}} \cdot \tan(\alpha_2)) \cdot r_D}{Z_{k_{pp}} \cdot s_{x_{pp}} \cdot \tan(\alpha_1) \cdot r_D - M_{hsil} \cdot i} \quad (46)$$

gdzie  $s_{x_{pp}}$  oraz  $s_{x_{pl}}$  to wartości poślizgu odpowiednio koła przedniego lewego i przedniego prawego.

Przyjmując równe obciążenie kół badanej osi:  $Z_{k_{pp}} = Z_{k_{pl}}$ , oraz hamowanie na nawierzchni o podobnej przyczepności pod kołem lewym i prawym:  $\tan(\alpha_1) \approx \tan(\alpha_2) = \tan(\alpha)$ , równanie (46) można przekształcić do postaci:

$$\Delta k_p = \frac{(s_{x_{pp}} - s_{x_{pl}}) \cdot r_D}{s_{x_{pp}} \cdot r_D - A} \quad (47)$$

gdzie składnik  $A$  wynosi:

$$A = \frac{M_{hsil} \cdot i}{Z_{kp} \cdot \tan(\alpha)} \quad (48)$$

Jeżeli ten składnik pominiemy jako mały, to względna różnica  $\Delta k_p$  parametrów diagnostycznych  $k_i$  kół przednich przyjmuje postać:

$$\Delta k_p = \frac{(s_{x_{pp}} - s_{x_{pl}})}{s_{x_{pp}}} \quad (49)$$

Dla kół nienapędzanych (tylnych) składnik  $A$  ma wartość 0 ( $M_{hsin} = 0$ ), więc względna różnica parametrów diagnostycznych  $k_i$  dla tych kół wynosi:

$$\Delta k_t = \frac{s_{xtp} - s_{xtl}}{s_{xtp}} \quad (50)$$

gdzie  $s_{xtp}$  oraz  $s_{xtl}$  są wartościami poślizgu wzdłużnego koła tylnego prawego oraz tylnego lewego. Poślizg wzdłużny koła wynosi:

$$s_x = \frac{v_s - v_k}{v_s} = \frac{\frac{v_s}{r_D} - \dot{\varphi}_k}{\frac{v_s}{r_D}} \quad (51)$$

gdzie:

$v_s$  – prędkość liniowa osi koła w kierunku wzdłużnym,

$v_k$  – prędkość obwodowa koła,

$\dot{\varphi}_k$  – prędkość kątowa koła.

Wykorzystując powyższe wyrażenie opisujące poślizg wzdłużny koła, parametr  $\Delta kp$  dla kół przednich wynosi:

$$\Delta kp = \frac{\dot{\varphi}_{pl} - \dot{\varphi}_{pp}}{\frac{v_s}{r_D} - \dot{\varphi}_{pp}} \quad (52)$$

gdzie

$\dot{\varphi}_{pp}$ ,  $\dot{\varphi}_{pl}$  – prędkość kątowa koła odpowiednio koła przedniego prawego i przedniego lewego.

W formie ogólnej, jeżeli różnicę parametrów diagnostycznych kół: prawego  $k_p$  i lewego  $k_l$  odnosimy do koła hamującego intensywniej, zależność (52) przyjmuje postać:

$$\Delta kp = \frac{\dot{\varphi}_{pl} - \dot{\varphi}_{pp}}{\frac{v_s}{r_D} - \dot{\varphi}_{\min(p,l)}} \quad (53)$$

gdzie

$\dot{\varphi}_{\min(p,l)}$  – prędkość kątowa koła o mniejszej prędkości (o większym momencie hamującym).

Dla kół tylnych będzie analogicznie:

$$\Delta kt = \frac{\dot{\varphi}_{tl} - \dot{\varphi}_{tp}}{\frac{v_s}{r_D} - \dot{\varphi}_{\min(p,l)}} \quad (54)$$

gdzie

$\dot{\varphi}_{tp}$ ,  $\dot{\varphi}_{tl}$  – prędkość kątowa koła tylnego prawego oraz tylnego lewego.

Parametry  $\Delta k_p$  i  $\Delta k_t$  zawierają mniej informacji diagnostycznych w porównaniu do parametru

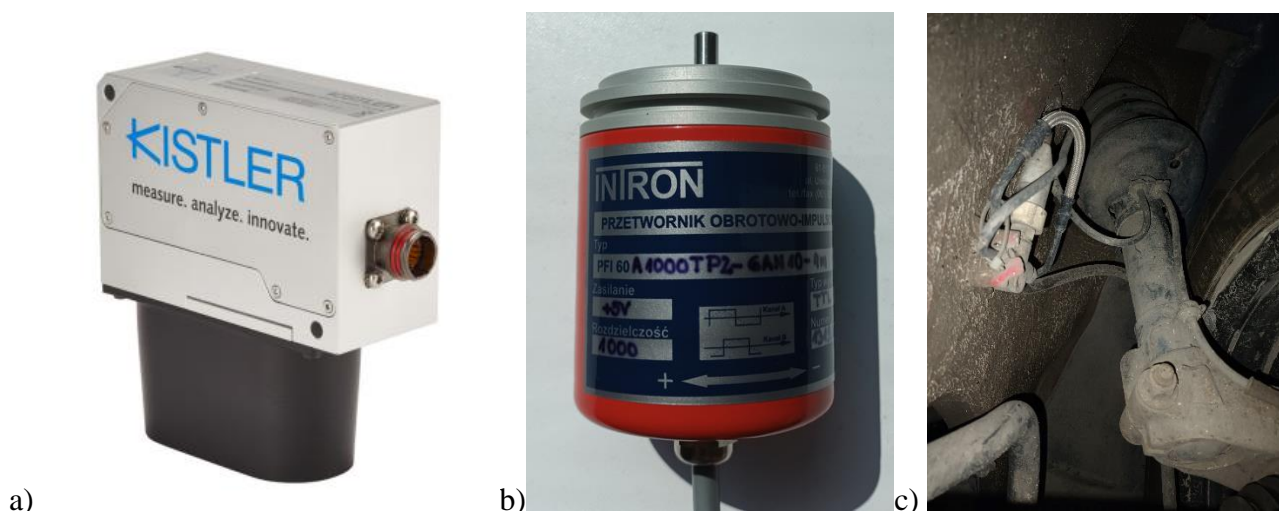
$k_i$  ale są znacznie łatwiejsze do wyznaczenia. Informują one, że występuje różnica sił hamujących kół badanej osi pojazdu, a ich znak wskazuje, na którym kole występuje mniejszy moment hamujący. Jego dokładność zależy od dokładności wyznaczania prędkości kół.

## 6. Metodyka prowadzonych badań doświadczalnych

Obiektem badań był samochód osobowy Skoda, wyposażony w hydrauliczny układ hamulcowy z systemem ABS. Badania drogowe polegały na realizacji procesów prostoliniowego hamowania tego pojazdu. Wielkościami mierzonymi były:

- ciśnienie w zaciskach hamulcowych badanego pojazdu,
- prędkość obrotowa kół,
- prędkość liniowa pojazdu.

Ponadto wielkości zmierzone to: masa pojazdu w danym procesie hamowania, położenie środka masy, powierzchnia czołowa pojazdu. Badany pojazd wyposażono w wielosezonowe ogumienie o jednakowej rzeźbie i wysokości bieżnika. Na rys. 11 przedstawiono wykorzystywaną aparaturę badawczą.



Rys. 11. Stosowana aparatura badawcza: a) głowica Correvit-L [38], b) przetwornik impulsowo- obrotowy, c) umiejscowienie czujnika ciśnienia płynu hamulcowego w pojeździe

Pomiar ciśnienia w zaciskach kół badanego pojazdu dokonywany był za pomocą czujników włączanych w obwody hydrauliczne, działających na zasadzie tensometrycznej, o dokładności 1 bar (rys. 11 c). Prędkości kół samochodu mierzono za pomocą czujników impulsowych, o rozdzielczości 1000 impulsów na obrót i napięciu zasilającym 5V (rys. 11 b). Prędkość liniowa samochodu mierzona była za pomocą głowicy Correvit-L firmy Corsys (rys. 11 a), która działa według zasady korelacyjno-optycznej [36]. W jej skład wchodzi dwie fotokomórki, obiektyw, układ oświetlający oraz raster pryzmatyczny [37]. Dane techniczne głowicy optycznej Correvit-L ujęto w tabeli 3.

Tab. 3. Główne parametry robocze głowicy Correvit-L [38]

Zakres mierzonej prędkości	km/h	$\pm 0,1 \dots 250$
Rozdzielczość pomiarowa	mm	$\leq 1,0$
Dokładność pomiaru	%FSO	$<\pm 0,1$
Częstotliwość próbkowania	Hz	500
Wymagana odległość od nawierzchni	mm	$350\pm 100$

Podczas badań drogowych starano się realizować procesy hamowania z różnorodną intensywnością. Wymuszenie procesu hamowania realizowane było poprzez kierowcę w sposób niezautomatyzowany, co powoduje różnice przebiegu czasowego ciśnienia hamowania w kolejnych próbach hamowania. Z drugiej jednak strony, brak automatyzacji wymuszenia hamowania odpowiada zmienności procesów hamowania w warunkach eksploatacji pojazdu, dla których przeznaczony jest monitor diagnostyczny. Niejednoznaczność wymuszeń na pedał hamulca jest czynnikiem przybliżającym badania drogowe weryfikujące działanie monitora diagnostycznego do rzeczywistych warunków jego działania. Badania przebiegu hamowania przeprowadzane były w różnorodnych warunkach, związanych m. in. z obciążeniem pojazdu, ciśnieniem w ogumieniu czy dynamiką procesu hamowania. Widok samochodu badawczego, przygotowanego do badań drogowych oraz sposób montażu aparatury pomiarowej, wymaganej w tym rodzaju badań, przedstawiono odpowiednio na rys. 12 a i b.



Rys. 12. a) Samochód badawczy Skoda Octavia przygotowany do badań drogowych, b) sposób montażu głowicy optycznej Correvit i czujnika impulsowego prędkości obrotowej koła, c) stanowisko rolkowe do kontroli układów hamulcowych wykorzystywane w badaniach

Kolejny rodzaj przeprowadzanych badań to badania stanowiskowe, z wykorzystaniem stanowiska rolkowego do kontroli układu hamulcowych w warunkach okresowych badań technicznych. Zastosowano stanowisko RHO- 6\l firmy UNIMETAL, którego rolki główne posiadają nawierzchnię asfaltobetonową (rys. 12c). Podstawowe dane techniczne wykorzystywanego stanowiska rolkowego zawarto w tab. 4.

Tab. 4. Dane techniczne stanowiska rolkowego UNIMETAL RHO- 6\L [50]

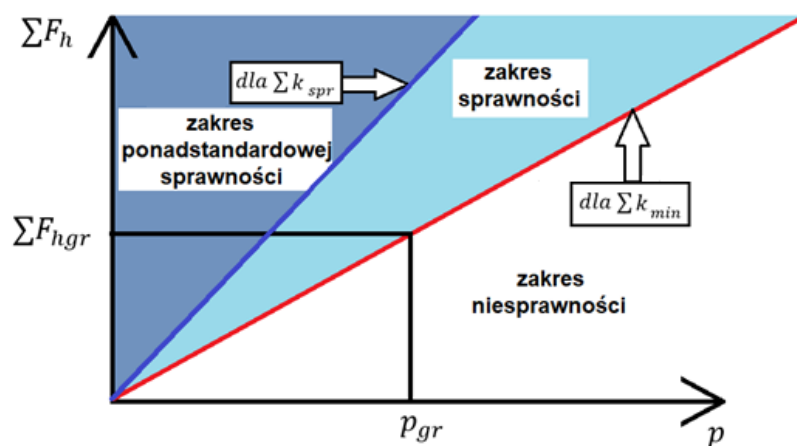
<b>Parametry</b>	<b>Wartości</b>
Średnica kół badanego pojazdu	10"-28"
Rozstaw kół badanego pojazdu	900- 2149 mm
Zakres pomiarowy	0- 8 kN
Moc silników	2x4 kW
Prędkość obwodowa rolek	5 km/h
Zakres siły nacisku na pedał hamulca	0- 1000 N

Podczas prób badawczych zmieniano ciśnienie w układzie hamulcowym, ustalając je na kilka sekund pomiaru. Ciśnienie mierzono poprzez omówione uprzednio czujniki tensometryczne, wykorzystywane również podczas badań drogowych. Dla każdego z omawianych, kilkusekundowych odcinków czasowych dokonywano odczytu sił hamujących rolki hamulcowe stanowiska. Badania stanowiskowe wykonywano przy nieobciążonym pojeździe oraz z nominalnym ciśnieniem w ogumieniu. Omawiana metodyka badań stanowiskowych pozwoliła na wyznaczenie wzorcowych wartości parametrów diagnostycznych układu hamulcowego.

## 7. Weryfikacja doświadczalna monitora diagnostycznego

### 7.1. Ustalenie wzorców diagnostycznych

Zastosowanie monitora diagnostycznego układu hamulcowego jako całości wymaga ustalenia wzorców diagnostycznych, do których porównywane będą otrzymywane wartości parametru  $\Sigma k$ . Wzorce diagnostyczne to wartości  $\Sigma k$  dla pojazdu o układzie hamulcowym w stanie sprawności technicznej  $\Sigma k_{spr}$  (odpowiadającym fabrycznie nowemu układowi hamulcowemu). Powinny one być nie mniejsze niż wartości  $\Sigma k_{min}$  pozwalające na osiągnięcie wymaganej prawnie, minimalnej skuteczności układu hamulcowego  $sk_h$  (wzór 1). Na rys. 13 tangens kątów nachylenia poszczególnych linii odpowiada wartościom parametrów  $\Sigma k_{min}$  i  $\Sigma k_{spr}$ .



Rys.13 Schematyczne przedstawienie zależności siły hamującej pojazd od ciśnienia w układzie hamulcowym, rozgraniczających zakres sprawności układu hamulcowego

Na powyższym rysunku przedstawiono poglądowo dwie zależności sumy sił hamujących koła pojazdu od ciśnienia w układzie hamulcowym. Pierwsza jest sformułowana dla wartości  $\Sigma k_{spr}$ , która jest ustalona dla stanu sprawności fabrycznie nowych hamulców pojazdu. Druga związana jest z parametrem  $\Sigma k_{min}$ , który określa graniczny stan układu hamulcowego, pozwalający na rozwinięcie sumy sił hamujących koła pojazdu o wartości pozwalającej na uzyskanie minimalnej, wymaganej prawnie skuteczności hamowania  $sk_h$  przy nacisku na pedał hamulca nie przekraczającym określonej prawnie wartości granicznej. Nacisk ten zapewnia uzyskanie wartości ciśnienia w układzie hamulcowym, oznaczonej na rys. 13 jako  $p_{gr}$ . Wartość ciśnienia zależna jest od modelu badanego pojazdu oraz typu zastosowanego w nim układu hamulcowego.



Obszar pomiędzy dwiema zależnościami siły hamowania od ciśnienia hamowania (dla  $\sum k_{spr}$  oraz dla  $\sum k_{min}$ ) zdefiniowano na rys. 13 jako zakres sprawności. Jest to obszar, w którym powinna znajdować się zależność sumy sił hamowania  $\sum F_h$  od ciśnienia hamowania tak aby minimalna skuteczność hamowania została osiągnięta. Gdy uzyskiwane wartości  $\sum F_h$  dla określonego ciśnienia hamowania są większe niż wartości rozgraniczone linią niebieską, to oznacza, że w danym pojeździe efektywność hamowania jest większa niż dla fabrycznie nowego pojazdu, lub układ został zmodyfikowany względem układu fabrycznie nowego (przykładowo powiększonych zacisków i tarcz hamulcowych oraz bardziej wydajnych okładzin ciernych). Wówczas układ hamulcowy znajduje się w wyróżnionym na rys. 13 zakresie ponadstandardowej sprawności układu hamulcowego. Jeśli wartość  $\sum F_h$  dla określonego ciśnienia hamowania jest mniejsza niż wartość znajdująca się na linii czerwonej, to układ hamulcowy znajduje się w stanie niesprawności (rys. 13).

Dokonano wyznaczenia wzorców diagnostycznych z wykorzystaniem badań na stanowisku rolkowym do kontroli układu hamulcowego, opisanym w rozdziale 6. Wyznaczono wartości współczynnika  $k_p$  dla obu kół osi przedniej oraz  $k_t$  dla obu kół osi tylnej w pojeździe badawczym o sprawnym układzie hamulcowym i wartości te uznano jako wzorcowe.

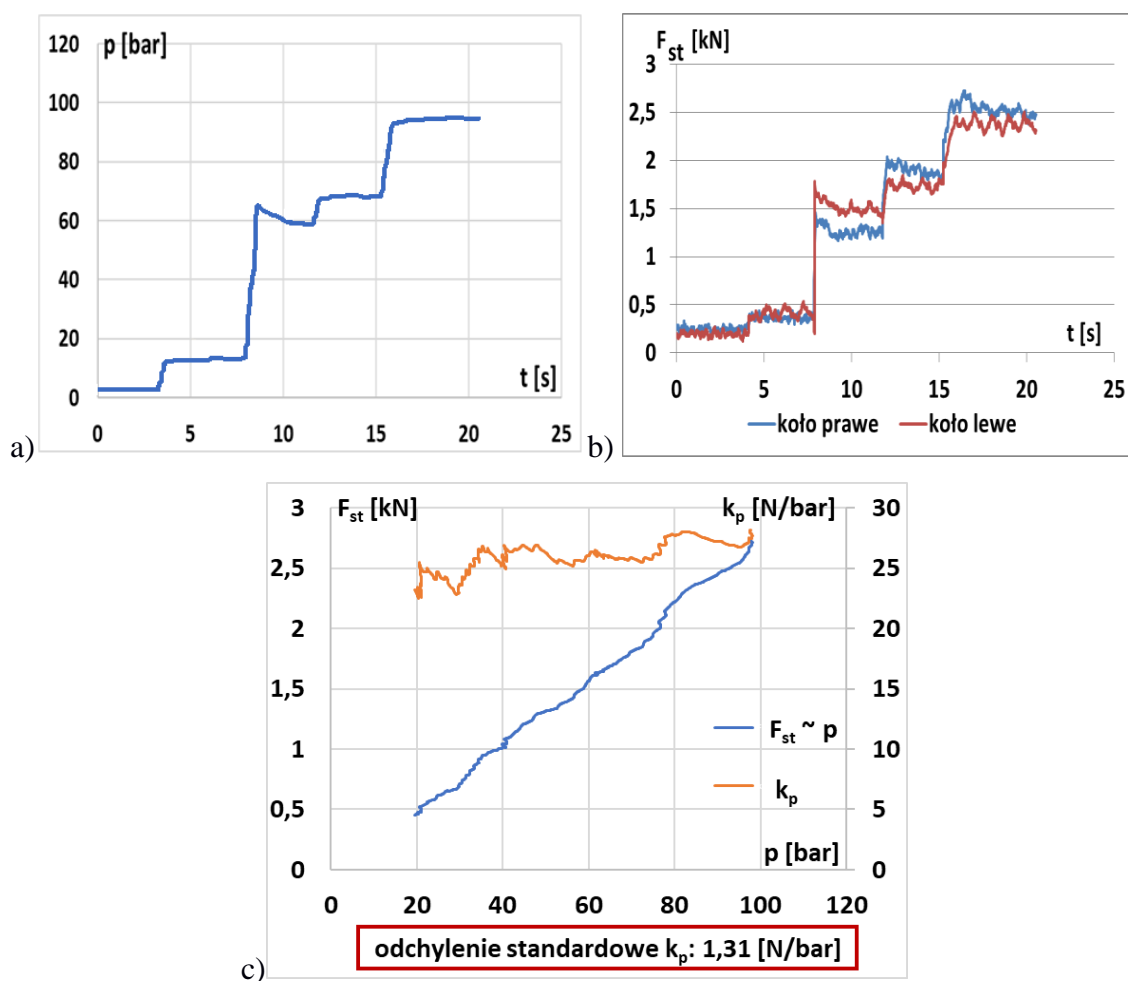
Układ pomiarowy stanowiska dokonał pomiaru sił działających między kołami przednimi pojazdu a rolkami stanowiska, oznaczonych jako  $F_{st}$ . Pomiaru ciśnienia dokonywano z wykorzystaniem aparatury pomiarowej, umieszczonej w pojeździe. Stanowisko rolkowe działało w trybie pracy stosowanym do kontroli skuteczności układu hamulcowego. Ze względu na stałe prędkości obrotowe rolek stanowiska, które napędzały koła badanego pojazdu, siły oporów bezwładności zostały pominięte. Przy wyznaczaniu wzorcowych wartości parametrów  $k_i$  dla każdego z kół uwzględniono siły oporów toczenia kół, mierzone na stanowisku rolkowym. Wartość współczynnika  $k_i$  (współczynnika  $k$  dla koła  $i$ ) wyznaczana zgodnie z przyjętą metodyką wynosi więc:

$$k_i = \frac{F_{st_i} - F_{ot_i}}{p} \quad (55)$$

gdzie:

- $F_{st_i}$  – wypadkowa siła działająca między kołem, a bieżnią stanowiska rolkowego przy ciśnieniu  $p$ ,
- $F_{ot_i}$  – siła oporów toczenia koła  $i$ ,
- $p$  - ciśnienie w układzie hamulcowym.

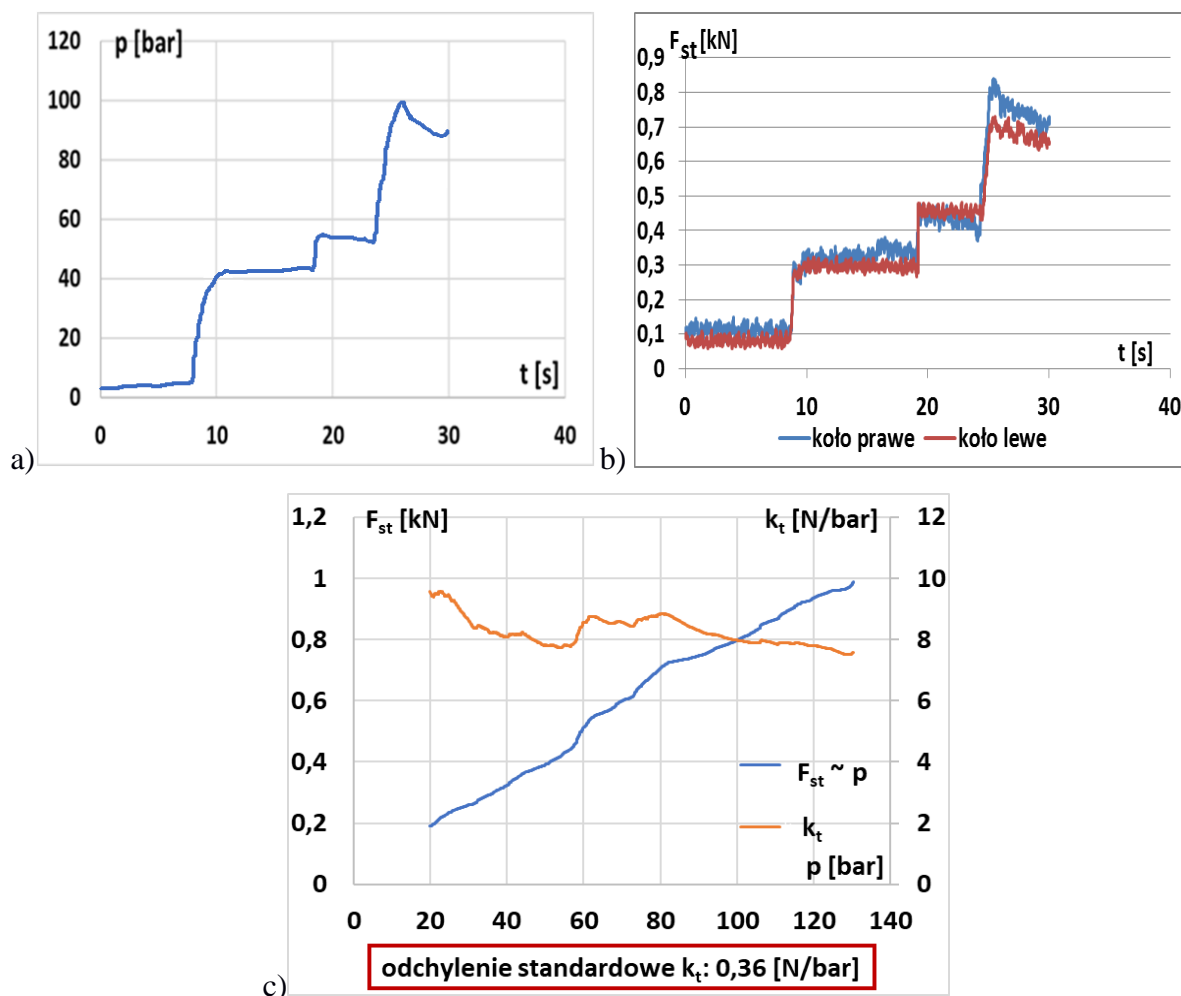
Na rys. 14 przedstawiono przykładowe wyniki badań dla kół przednich samochodu badawczego Skoda Octavia, uzyskanych z wykorzystaniem stanowiska rolkowego do kontroli układów hamulcowych.



Rys. 14. Przykład wyników badań przeprowadzonych w celu wyznaczenia wzorcowych wartości współczynnika  $k_p$  dla kół osi przedniej: a) przebieg czasowy ciśnienia hamowania, b) przebieg sił hamujących koła, c) zależność siły mierzonych na stanowisku rolkowym od ciśnienia hamowania wraz z przebiegiem  $k_p$

Po wprowadzeniu przedniej osi pojazdu na stanowisko i uruchomieniu jego rolek, kierujący czterokrotnie zwiększał nacisk na pedał hamulca, utrzymując daną wartość nacisku przez kilka sekund. Wartości te były utrzymywane przez kilka sekund i pozwalały na uzyskanie ciśnienia w układzie hamulcowym na poziomie od około 20 bar do około 100 bar (rys. 14a). Dla każdej z utrzymywanych przez kilka sekund wartości ciśnienia hamowania odczytywano na ekranie stanowiska siły  $F_{st}$  działające na styku kół z rolkami. Wynosiły one od około 0,4 kN do około 2,5 kN (rys. 14b). Uzyskane wyniki posłużyły do wyznaczenia zależności między siłą  $F_{st}$  oraz ciśnieniem w układzie hamulcowym ( $p$ ). Wykazuje ona charakter zbliżony do liniowego. Dla każdego punktu tej zależności wyznaczono wartości parametru  $k_p$  (według wzoru 55). Przykład tej zależności, uzyskany dla koła osi przedniej, przedstawiono na rys. 14c wraz z wartościami odpowiadającymi danej wartości ciśnienia hamowania. Po zastosowaniu wzoru (55) dokonano uśrednienia obliczonych wartości współczynnika  $k_p$ . Wartość średnia wyniosła 25,7 N/bar i została przyjęta jako wartość

wzorcowa. Przedstawiony na rys. 14 c przebieg współczynnika  $k_p$  cechował się rozrzutem, odchylenia standardowego tego parametru wynosiło 1,31 N/bar. W przypadku tylnych kół pojazdu metodyka wyznaczania wzorcowych wartości współczynników  $k_i$  była analogiczna jak w przypadku kół osi przedniej (rys. 15).



Rys. 15. Przebiegi czasowe mierzonych wielkości podczas doświadczalnego wyznaczania wzorcowych wartości współczynnika  $k_t$  dla kół tylnych a) ciśnienie w układzie hamulcowym, b) siły mierzone na stanowisku rolkowym, c) Zależność siła mierzona na stanowisku- ciśnienie hamowania wraz z przebiegiem  $k_t$

Wartości siły  $F_{st}$ , osiągnięte dla kół osi tylnej są o około 70% mniejsze niż wartości tej siły, osiągnięte dla kół osi przedniej przy takich samych wartościach ciśnienia hamowania (rys 14 i 15). Po uśrednieniu wartości współczynnika  $k_t$ , przyjęto jako wartości wzorcowe współczynniki  $k_t$  równe 8,2 N/bar dla każdego z kół osi tylnej.

W przypadku wprowadzonej wielkości  $\sum k$ , która stanowi sumę wartości parametrów  $k$  dla obu kół osi przedniej oraz obu kół osi tylnej, wzorcowa wartość wynosi:

$$\sum k = 2 \cdot 25,7 + 2 \cdot 8,2 = 67,8 \text{ [N/bar]} \quad (56)$$

Zastosowanie omówionej metodyki do wyznaczania wzorcowych wartości  $\Sigma k$  i przyjęcie wartości wzorcowych jako stałe stanowi uproszczenie względem dynamicznych warunków hamowania w procesie eksploatacji, gdzie wartości  $\Sigma k$  mogą wykazywać niestałość, związaną m. in. z nagrzewaniem okładzin ciernych podczas dynamicznego hamowania i zmniejszeniem współczynnika tarcia. To zagadnienie w opracowywanym monitorze diagnostycznym uwzględniono poprzez ustalenie minimalnej wartości współczynnika  $k_i$ . Jeżeli współczynnik tarcia okładzin obniży się, np. z powodów cieplnych, nie powinno to spowodować spadku wartości  $k_i$  poniżej wartości  $k_{min}$ .

Prędkości rolek stanowiska wykorzystanego do wyznaczenia wzorców diagnostycznych, wynoszące około 5 km/h, rzutują na niewielkie wartości prędkości względnych par ciernych hamulców. Wartości współczynnika tarcia okładzin ciernych w takich warunkach są o około 5- 10% większe względem wartości odpowiadających większym prędkościom tarcia ich elementów. Zatem możliwe jest pewne zawyżenie wzorcowych wartości parametrów diagnostycznych układu hamulcowego, wyznaczanych z wykorzystaniem stanowiska rolkowego, względem ich wartości odpowiadających warunkom drogowym.

Sformułowanie kryteriów oceny stanu układu hamulcowego powinno uwzględniać dopuszczalny rozrzut prawidłowych wartości  $\Sigma k$ , wynikający z dokładności pomiarów. Natomiast przy analizie z zastosowaniem sieci neuronowej korzystne jest przyjęcie stałych wartości parametru  $\Sigma k$  jako wzorców diagnostycznych.

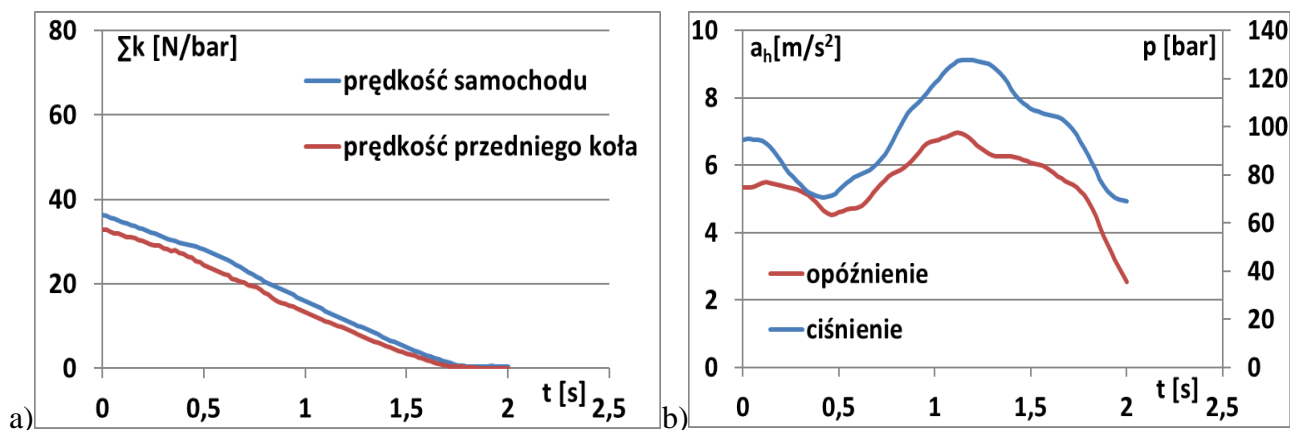
Monitor diagnostyczny powinien umożliwiać sprawdzenie, czy uzyskane wartości parametru  $\Sigma k$  mieszczą się pomiędzy wartościami skrajnymi - dla sprawności technicznej i dla minimalnej, dopuszczalnej skuteczności hamowania (rys. 13). W przypadku stwierdzenia różnic między wartościami wzorcowymi, a uzyskanymi na podstawie przebiegu hamowania, system diagnostyczny pojazdu powinien wygenerować odpowiedni komunikat. Komunikat ten informuje kierowcę o tym, że skuteczność hamowania jest za mała. W dalszym kroku kierujący może odczytać z menu programu jaka jest wartość współczynnika  $\Sigma k$ , lub jaka jest skuteczność hamowania w stosunku do minimalnej wymaganej.

Również, w przypadku elektrohydraulicznie sterowanych układów hamulcowych, które współpracują z układami odzysku energii kinetycznej podczas hamowania, kierowca może być informowany o anomaliach procesu hamowania odzyskowego. Informacja ta tworzona jest wówczas, gdy bieżące wartości magazynowanej energii elektrycznej są zbyt małe względem wartości wzorcowych dla określonych warunków hamowania, co skutkuje koniecznością nadmiernego zwiększenia przez sterownik układu hamulcowego intensywności hamowania ciernych hamulców pojazdu aby osiągnąć opóźnienie pojazdu, wymagane dla określonego wymuszenia hamowania poprzez kierującego. W przypadku osłabienia hamulców ciernych pojazdu, ich udział w procesie hamowania odzyskowego w stosunku do udziału maszyny elektrycznej, może być inny niż zakładany

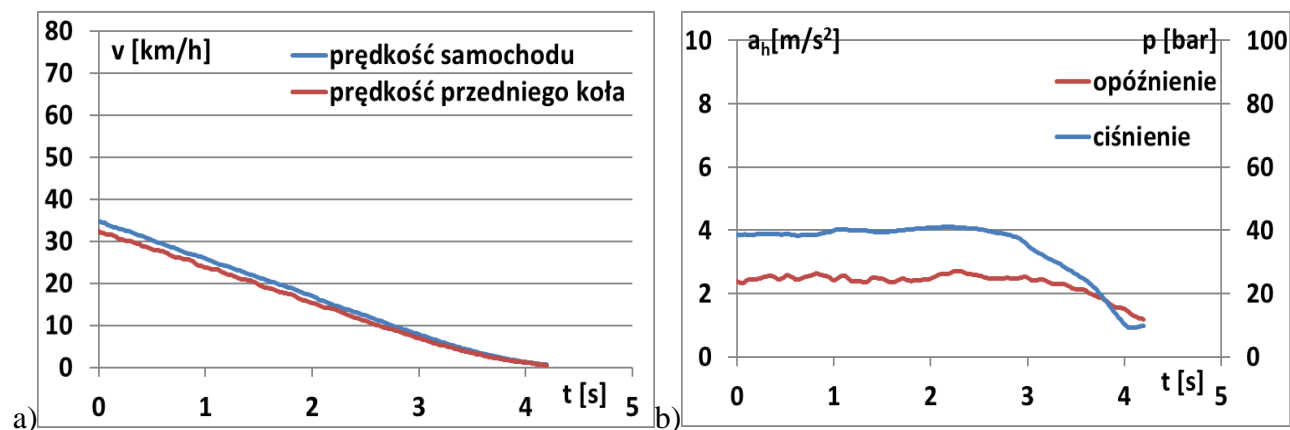
przez sterownik dla danych warunków ruchu pojazdu i zapotrzebowania na energię elektryczną. Rzutuje to na konieczność przesterowań w pętli sprzężenia zwrotnego procesu hamowania odzyskowego, co wymaga pewnego czasu na obliczenia i rzutuje na jego efektywność. Zwiększanie sprawności działania elektrohydraulicznych układów hamulcowych wymusza wprowadzanie coraz bardziej surowych kryteriów diagnostycznych układu hamulcowego, w zakresie dopuszczalnych różnic uzyskiwanych współczynników  $\Sigma k$  względem wartości wzorcowych.

## 7.2. Wyznaczanie parametrów niezbędnych dla realizacji monitora diagnostycznego

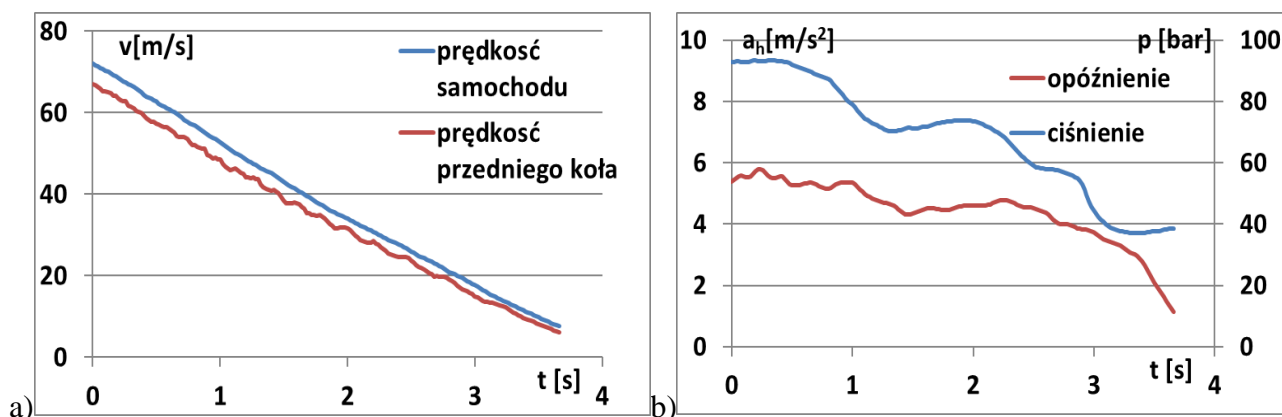
Badania wstępne miały na celu ocenę możliwości i dokładności pomiaru wielkości niezbędnych do obliczania parametrów diagnostycznych. Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów prędkości obwodowej koła i prędkości liniowej samochodu o różnej dynamice hamowania i różnych prędkościach początkowych oraz wyniki pomiarów ciśnienia płynu hamulcowego odpowiadające tym hamowaniom (rys. 16- 19).



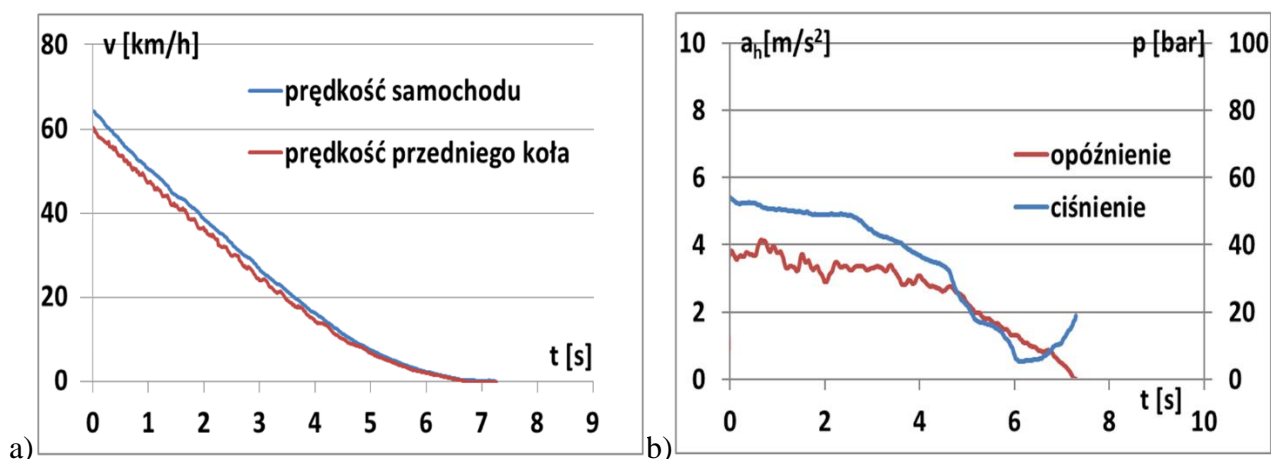
Rys. 16. Fragment procesu intensywnego hamowania z prędkości początkowej 50 km/h, pojazd bez dodatkowego obciążenia, z ciśnieniem w ogumieniu 2,0 bar: a) przebieg czasowy prędkości samochodu i przedniego koła, b) przebiegi czasowe ciśnienia hamowania i opóźnienia samochodu



Rys. 17. Fragment procesu mało intensywnego hamowania z prędkości początkowej 50 km/h, pojazd bez dodatkowego obciążenia, z ciśnieniem w ogumieniu 2,0 bar: a) przebieg czasowy prędkości samochodu i przedniego koła, b) przebiegi czasowe ciśnienia hamowania i opóźnienia samochodu



Rys. 18. Proces intensywnego hamowania z prędkości początkowej 80 km/h, pojazd bez dodatkowego obciążenia, z ciśnieniem w ogumieniu 2,0 bar: a) przebieg czasowy prędkości samochodu i przedniego koła, b) przebiegi czasowe ciśnienia hamowania i opóźnienia samochodu



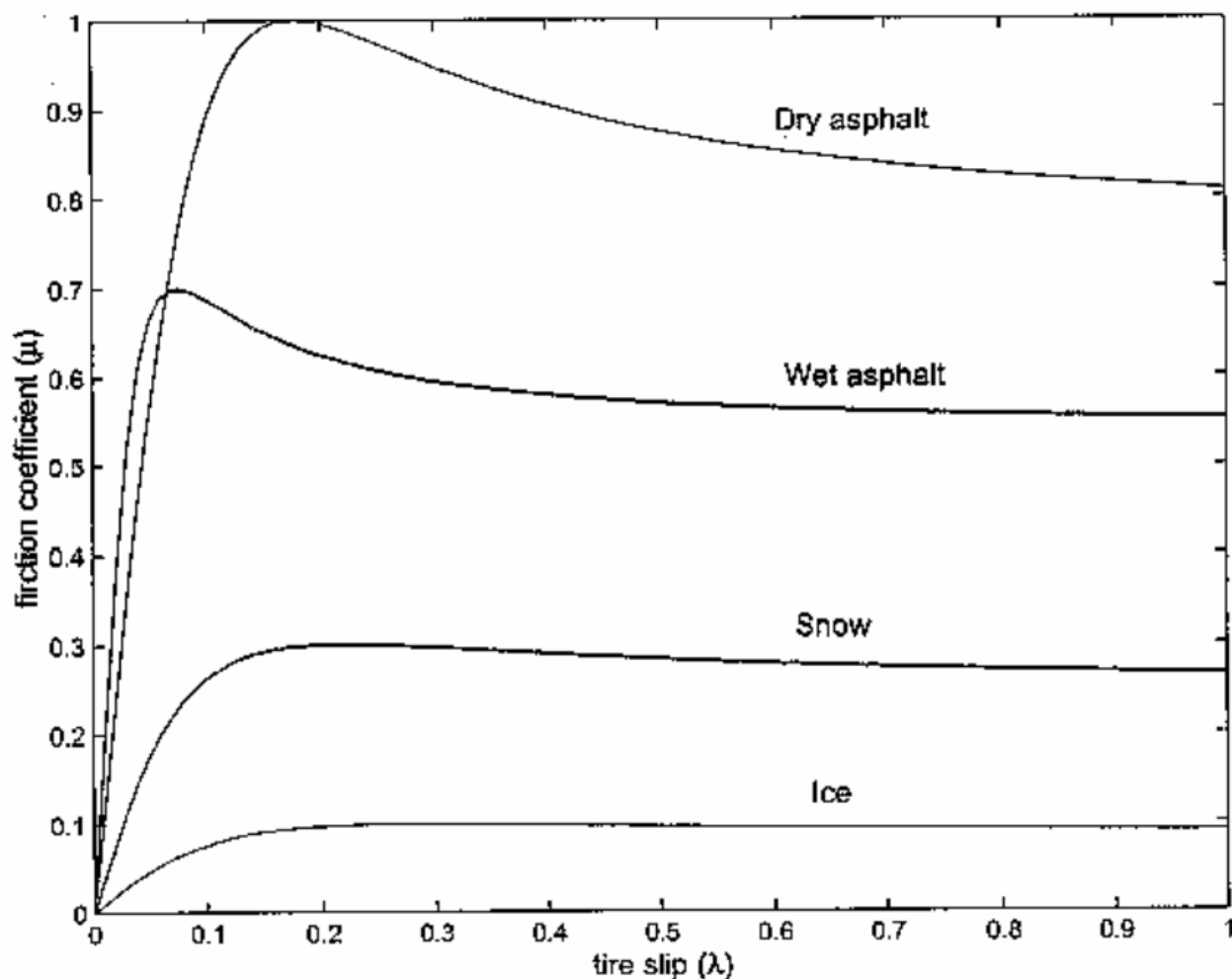
Rys. 19. Proces mało intensywnego hamowania z prędkości początkowej 80 km/h, pojazd bez dodatkowego obciążenia, z ciśnieniem w ogumieniu 2,0 bar: a) przebieg czasowy prędkości samochodu i przedniego koła, b) przebiegi czasowe ciśnienia hamowania i opóźnienia samochodu

Przebiegi prędkości liniowych przedniego koła cechują się większymi oscylacjami w porównaniu do prędkości samochodu. Dla poszczególnych warunków badań wykonywano po 3 powtórzenia pomiarów.

Przedstawione przykłady wskazują na różnorodny przebieg ciśnienia i opóźnienia w funkcji czasu hamowania. Ich charakter wpływa na szybkość zmian prędkości kół i samochodu, co w decydujący sposób wpływa na dokładność wyznaczania parametrów diagnostycznych układu hamulcowego. Zwiększona szybkość zmiany prędkości kół i mniej ustalone hamowanie stawiają gorsze warunki dla działania monitora diagnostycznego. Przedstawione wyniki dotyczą hamowań na nawierzchni o dużej przyczepności (jezdni sucha).

- Wyznaczenie zależności siły stycznej od poślizgu

Jak wynika z równań (25) - (28), do wyznaczenia parametrów  $k_i$  dla poszczególnych kół wymagana jest znajomość sił stycznych  $F_x$ . Bieżące wyznaczenie tej siły wymaga specjalistycznej aparatury (specjalistycznej piasty, lub przyczepy dynamometrycznej). Innym sposobem szacowania (przewidywania) stanu jezdni i siły stycznej jest ocena nachylenia funkcji  $\mu(s)$  uzyskiwanej na podstawie momentu napędowego silnika i pomiaru poślizgu kół napędzanych [29]. Sposób ten jest wykorzystywany w sterowaniu układem ESP. Wyznaczanie siły  $F_x$  wymaga znajomości charakterystyki ogumienia  $\mu(s_x)$ . Po analizie modeli współpracy koła ogumionego z nawierzchnią i próbie zastosowania modelu Magiczna Formuła (rozdział 5.2, wzór 33), do celów diagnostyki przyjęto charakterystykę opony  $\mu(s_x)$  na podstawie danych literaturowych, dla suchej nawierzchni asfaltowej (rys. 20).



Rys 20. Przebiegi współczynnika przyczepności wzdłużnej w funkcji poślizgu obwodowego koła dla czterech stanów nawierzchni [29]

Zastosowano liniową zależność siły  $F_x$  od poślizgu wzdłużnego koła  $s_x$  w zakresie nie powodującym uruchomienia układu przeciwblokującego kół:

$$F_x = Z \cdot \mu = Z_k \cdot s_x \cdot \tan(\alpha) \quad (57)$$

stąd

$$\tan(\alpha) = \frac{F_x}{Z_k \cdot s_x} \quad (58)$$

Wielkość  $\tan(\alpha)$  jest współczynnikiem kierunkowym prostej aproksymującej przebieg współczynnika przyczepności wzdłużnej w funkcji poślizgu obwodowego koła przed wystąpieniem maksymalnej wartości współczynnika przyczepności. Taka charakterystyka jest przybliżeniem w stosunku do charakterystyki  $\mu(s_x)$  w rzeczywistych warunkach hamowania, ale pozwala na realizację monitora diagnostycznego hamulców poszczególnych kół pojazdu (wzory 25 – 28) w warunkach drogowych.

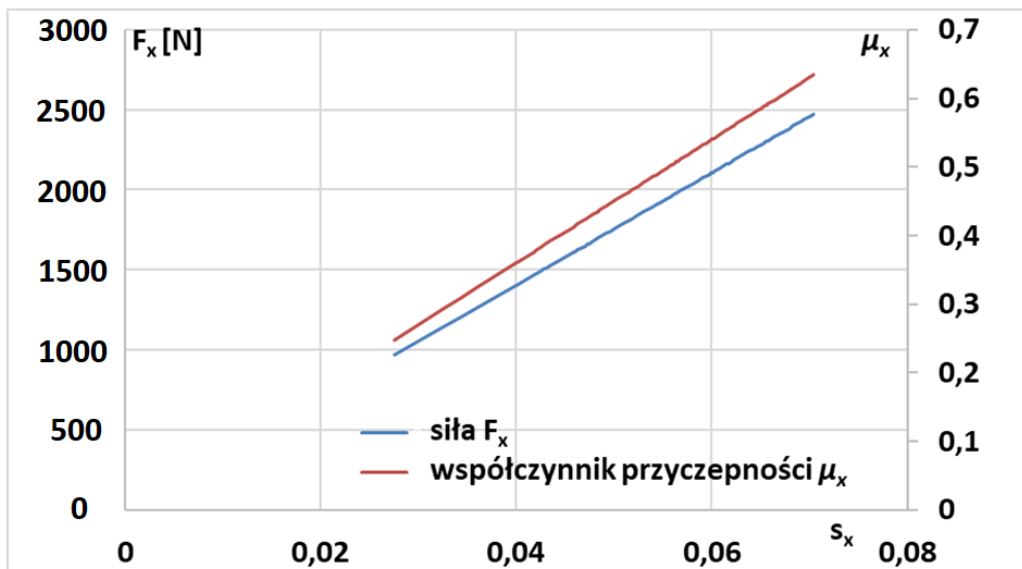
Dodatkowo, we wstępnych badaniach drogowych sprawdzono, czy dla przyjętej charakterystyki  $\mu(s_x)$  i hamowań z ustalonym ciśnieniem i opóźnieniem spełniony jest warunek, że parametr diagnostyczny  $k_i$  obliczany na podstawie danych drogowych poślizgu koła nie przekracza wartości  $k_{wz}$  uzyskanej na stanowisku bębnowym.

Podczas badań drogowych wartości poślizgu obwodowego koła  $s_x$  wyznaczano z wykorzystaniem prędkości samochodu mierzonej poprzez głowicę optyczną Correvit i prędkości kół mierzonych poprzez przetworniki impulsowo- obrotowe (zgodnie z opisem w rozdziale 6).

Dla wyznaczenia siły  $F_x$ , a następnie parametrów diagnostycznych poszczególnych kół (według wzorów 25 – 28) przyjęto stałą wartość  $\tan(\alpha)$ . Uproszczenie to jest możliwe do zastosowania ponieważ monitor diagnostyczny układu hamulcowego działa w zakresie hamowania, w którym nie jest osiągnięta maksymalna wartość współczynnika przyczepności wzdłużnej koła względem nawierzchni.

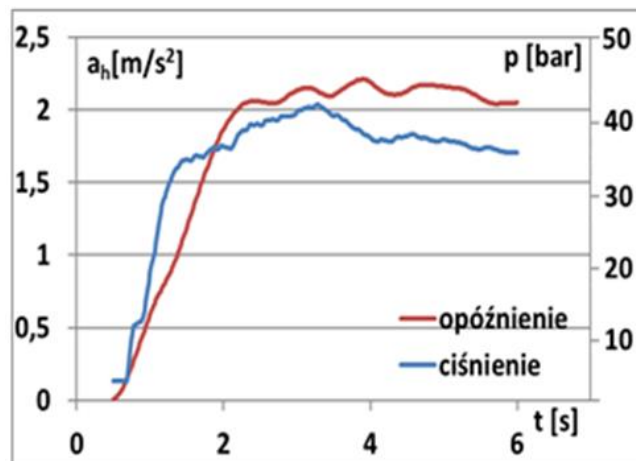
Przedstawione na rys. 21 wyniki obliczeń siły działającej na styku koła z jezdnią w kierunku wzdłużnym uzyskano z wykorzystaniem wzoru 57. Wartość  $\tan(\alpha)$ , wykorzystaną w tym wzorze, ustalono na podstawie aproksymacji liniowej przebiegu  $\mu(s)$ , przedstawionego na rys. 20, dla suchej nawierzchni asfaltowej. Wartość  $\tan(\alpha)$  wynosiła 9. Wartości poślizgu koła obliczano na podstawie danych z badań procesu hamowania samochodu, w którym dokonywano pomiaru prędkości kół za pomocą czujników impulsowo-obrotowych oraz pomiaru prędkości wzdłużnej samochodu za pomocą głowicy optycznej Correvit (zgodnie z opisem w rozdziale 6).





Rys 21. Przykładowy przebieg siły wzdłużnej  $F_x$  oraz współczynnika przyczepności wzdłużnej między kołem, a jezdnią w funkcji poślizgu obwodowego dla stałej wartości  $\tan(\alpha)$

Przebiegi opóźnienia hamowania samochodu oraz ciśnienia w układzie hamulcowym w czasie tego procesu przedstawiono na rys. 22. Podczas badawczych procesów hamowania pojazd obciążono, oprócz masą kierowcy i aparatury pomiarowej, dodatkowym obciążeniem 300 kg. Hamowania odbywały się na suchej nawierzchni asfaltowej, z prędkości początkowej 50 km/h.



Rys 22. Przebieg czasowy opóźnienia hamowania i ciśnienia w układzie hamulcowym, wykorzystany do wyznaczenia zależności  $F_x(s_x)$

Wykorzystanie w monitorze diagnostycznym zależności  $F_x(s_x)$  oraz charakter równań opisujących działanie monitora warunkują jego realizację w warunkach hamowania prostoliniowego - zarówno w przypadku wyznaczania parametrów  $k_i$  jak i  $\sum k$ . Wdrożeniowe rozwiązanie monitora diagnostycznego powinno zawierać algorytm rozpoznania ruchu prostoliniowego pojazdu, na przykład poprzez analizę sygnału przyspieszenia bocznego działającego na pojazd, które jest wielkością mierzoną przez układ sterowania systemem ESP.

- **Ocena przyczepności jezdni**

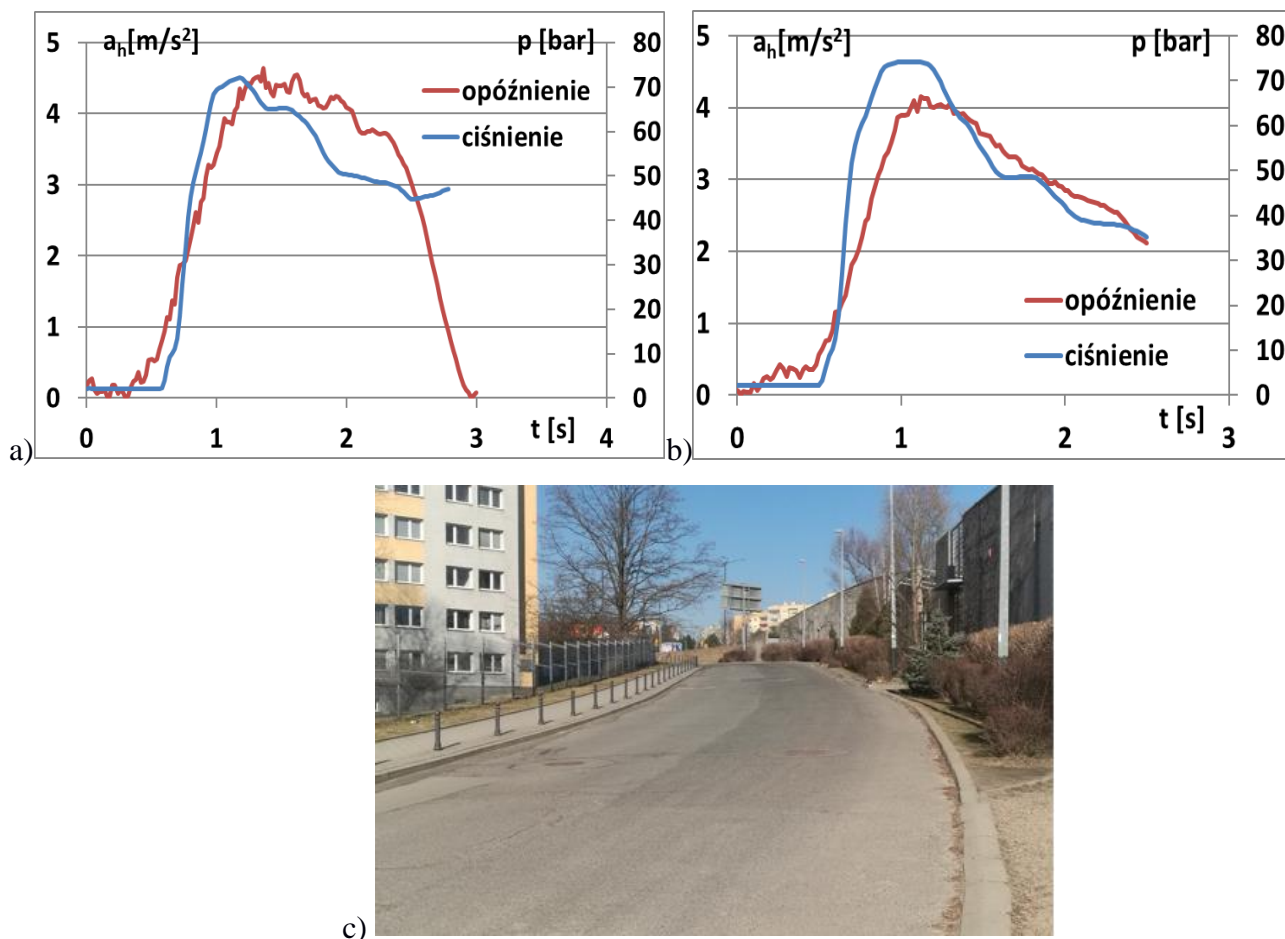
Pierwszym z niezbędnych działań w celu zastosowania monitora diagnostycznego jest zakwalifikowanie stanu nawierzchni jezdni jako pozwalającej bądź niepozwalającej na przeprowadzenie diagnostyki układu hamulcowego. Jest to spowodowane koniecznością odrzucenia w procesie diagnostyki hamowań na nawierzchni o małej przyczepności. Do diagnostyki hamulców powinien być wykorzystywany proces hamowania, w którym uzyskiwane wartości opóźnienia są znacząco większe od wartości opóźnienia hamowania silnikiem i są utrzymywane przez pewien okres czasu, pozwalający na ograniczenie rozrzutu wyników obliczeń parametrów. Jest to więc tzw. monitor diagnostyczny warunkowy.

Przyjęto, że monitor diagnostyczny układu hamulcowego powinien być realizowany począwszy od pewnej minimalnej wartości opóźnienia hamowania samochodu. Jest to równoznaczne z przyjęciem pewnej minimalnej wartości współczynnika przyczepności. Na podstawie badań wstępnych, uwzględniając wpływ siły oporów powietrza oraz moment hamujący silnika spalinowego na przebieg hamowania, przyjęto, że wartość ta wynosi nie mniej niż  $2 \text{ m/s}^2$ .

- **Wyznaczanie pochylenia jezdni**

Kolejnym analizowanym czynnikiem jest pochylenie jezdni, na której odbywa się hamowanie. Ma ono wpływ na wartość opóźnienia hamowania, a więc na parametr diagnostyczny  $\Sigma k$ . Dokonano dwóch procesów hamowania pojazdu obciążonego masą kierowcy i aparatury badawczej, z prędkości początkowej  $30 \text{ km/h}$ . Dla obu tych procesów starano się zapewnić jak najbardziej zbliżoną intensywność hamowania, rozumianą jako zmianę ciśnienia w układzie hamulcowym w czasie. Jeden z procesów przeprowadzono na jezdni płaskiej natomiast drugi na jezdni o wzniosie około  $8 \%$ .

Porównanie wartości opóźnienia pojazdu, osiągniętych w tych procesach przedstawiają wykresy na rys. 23 a) oraz b). W przypadku hamowania na jezdni płaskiej opóźnienie jest o około  $10\%$  mniejsze względem jezdni pochyłej (wznios) przy takich samych wartościach ciśnienia hamowania. Zatem spodziewane różnice w wartościach parametru  $\Sigma k$  pomiędzy hamowaniem na jezdni płaskiej i pochyłej również powinny wynosić około  $10\%$ . Wdrożeniowe rozwiązanie monitora diagnostycznego układu hamulcowego powinno uwzględniać pochylenie jezdni. Sygnał informujący o bieżącym pochyleniu może zostać przekazany ze sterownika układu poziomowania reflektorów samochodu [41].



Rys. 23. Przebiegi czasowe opóźnienia samochodu oraz ciśnienia w układzie hamulcowym dla dwóch hamowań a) prędkość początkowa 30 km/h, duża dynamika hamowania, jezdnia pochyła - wznios, b) prędkość początkowa 30 km/h duża dynamika hamowania jezdnia bez pochylenia bez obciążenia, c) widok pochyłej jezdni, wykorzystywanej do analizy

- **Wyznaczanie momentu hamującego silnika**

We wdrożeniowym rozwiązaniu monitora diagnostycznego układu hamulcowego w sterowniku zapisana powinna być mapa momentu hamującego silnika dla danej prędkości początkowej hamowania, danej prędkości obrotowej silnika i przełożenia w układzie napędowym.

W celu sprawdzenia wpływu momentu hamującego silnika na dokładność działania monitora diagnostycznego, wyznaczany jest on na podstawie równania ruchu pojazdu (13) i koła (15) w procesie hamowania wyłącznie silnikiem:

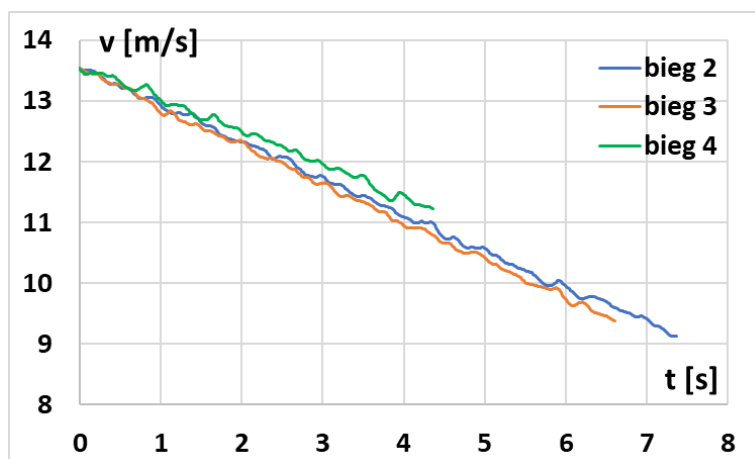
$$m \cdot a_{sil} = \frac{2 \cdot M_{h_{sil}} \cdot i}{r_D} - \frac{2 \cdot (M_{bp} + M_{bt})}{r_D} + F_{powietrza} \quad (59)$$

gdzie:

-  $M_{h_{sil}}$  - moment hamowania silnika spalinowego, który po uwzględnieniu przełożenia w układzie napędowym  $i$  oddziałuje na pojedyncze koło napędowe badanego pojazdu,

- $M_{b_p}$  - moment bezwładności koła przedniego badanego pojazdu,
- $M_{h_t}$  - moment bezwładności koła tylnego badanego pojazdu,
- $a_{sil}$  - opóźnienie samochodu podczas procesu hamowania silnikiem.

Wykonano procesy kilkusekundowego hamowania silnikiem pojazdu badawczego, przy różnych przełożeniach w układzie napędowym. Na rys. 24 przedstawiono fragmenty tych procesów, związane ze zwalnianiem pojazdu z tej samej prędkości początkowej. Prędkości te stanowią uśrednione wyniki jej pomiaru poprzez średnią krocząca z 5 próbek danych. Wybór różnych przełożeń skrzyni biegów skutkuje relatywnie niewielkimi różnicami przebiegu prędkości samochodu, jednakże dla biegu 4 stwierdzono najmniej intensywne zwalnianie pojazdu. Próby hamowania silnikiem dla biegu 2, 3 i 4 powtórzono trzykrotnie.



Rys. 24. Przebiegi czasowe prędkości samochodu w procesie hamowania silnikiem dla 3 biegów

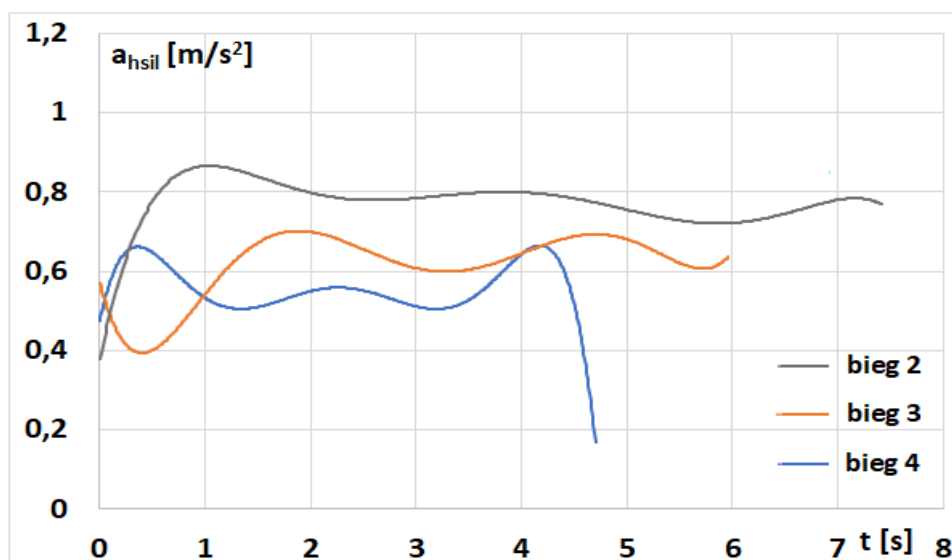
W tab. 4 dla każdej z prób ujęto średnie opóźnienie pojazdu badawczego oraz średnie wartości iloczynu  $2 \cdot M_{h_{sil}} \cdot i$  - wartości momentu hamującego silnika oddziałującego na koła napędowe pojazdu badawczego. Wartość ta była wyznaczana na podstawie równania ruchu samochodu w procesie hamowania silnikiem. Średnie wartości tych wielkości wyznaczone były dla zakresu danych w każdej próbie hamowania, dla których prędkości początkowe hamowania silnikiem były zbliżone (ich różnice nie przekraczały 1 m/s).

Tab. 4. Średnie opóźnienie pojazdu oraz średnia  $2 \cdot M_{h_{sil}} \cdot i$  w procesach hamowania silnikiem

Bieg 2			
	Próba 1	Próba 2	Próba 3
opóźnienie [ $m/s^2$ ]	0,60	0,78	0,64
$2 \cdot M_{h_{sil}} \cdot i$ [Nm]	223	295	241
Bieg 3			
	Próba 1	Próba 2	Próba 3
opóźnienie [ $m/s^2$ ]	0,52	0,43	0,64
$2 \cdot M_{h_{sil}} \cdot i$ [Nm]	197	165	241
Bieg 4			
	Próba 1	Próba 2	Próba 3
opóźnienie [ $m/s^2$ ]	0,36	0,37	0,38
$2 \cdot M_{h_{sil}} \cdot i$ [Nm]	134	143	143

Charakter danych przedstawionych w powyższej tabeli, jest prawidłowy z punktu widzenia fizyki ruchu hamowanego samochodu. W przypadku hamowania silnikiem z wykorzystaniem biegu 4 średnie wartości opóźnienia pojazdu są najmniejsze i wykazują najmniejsze różnice w poszczególnych, trzech próbach (Tab. 4). Wartości średnie opóźnienia oraz  $2 \cdot M_{h_{sil}} \cdot i$  osiągnęte dla biegu 2 i 3 wykazują większe różnice w porównaniu do hamowania silnikiem z wykorzystaniem biegu 4, co wynika ze zwiększonej gwałtowności hamowania silnikiem z wykorzystaniem niższych biegów (większych przełożeń w układzie napędowym). W 3 próbie hamowania silnikiem średnie wartości opóźnienia oraz  $2 \cdot M_{h_{sil}} \cdot i$  są takie same dla hamowania na 2 i 3 biegu, co świadczy o nieustalonym charakterze tego procesu.

Oprócz analizy wartości średnich momentów hamujących silnika oraz średnich wartości odpowiadających im opóźnień, dokonano analizy zmienności procesu hamowania silnikiem. Na powyższym rys. 25 przedstawiono przebiegi opóźnienia hamowania silnikiem samochodu badawczego w funkcji czasu trwania tego procesu. Przedstawione na rys. 25 dane pochodzą z wybranych prób hamowania ze zbioru danych, dla których średnie wartości opóźnienia i momentu ujęto w tab. 4. Wybrano próby hamowania najbardziej różniące się od siebie - w przypadku biegu 4 była to próba 1, dla biegu 3- próba 1, z kolei w przypadku biegu 2 wybrano próbę 2.



Rys. 25. Wartości opóźnienia hamowania silnikiem w funkcji czasu przy określonych przełożeniach w układzie napędowym

Przedstawione na rys. 25 przebiegi uwidaczniają, że aby nastąpiła zauważalna różnica w wartościach opóźnienia hamowania silnikiem na różnych przełożeniach układu napędowego przy tej samej prędkości początkowej, musi mieć miejsce okres czasu na ustalenie się procesu hamowania silnikiem.

Różnica między wartościami opóźnień na różnych przełożeniach skrzyni biegów była obserwowalna po czasie około 1 sekundy. Czas ten wydaje się zbyt krótkim z punktu widzenia bieżącego szacowania momentu hamującego silnika dla danego procesu hamowania, wykorzystywanego do diagnostyki hamulców.

Aby uniknąć omawianych trudności, rzeczywiste rozwiązanie monitora diagnostycznego układu hamulcowego powinno wykorzystywać wartości momentu hamującego dla danej prędkości obrotowej silnika spalinowego, zapisane w jego sterowniku. W wersji uproszczonej w programie diagnostycznym mogą być zapisane średnie wartości opóźnienia hamowania silnikiem na poszczególnych biegach. W programie diagnostycznym należy uwzględnić opcję hamowania z włączonym sprzęgłem, a więc sytuację gdy silnik nie oddziałuje na opóźnienie pojazdu.

- **Bieżąca masa pojazdu**

Bieżąca masa pojazdu jest istotnym parametrem z punktu widzenia diagnostyki układu hamulcowego. Rozwój układów mechatronicznych, stosowanych w pojazdach samochodowych, pozwala na wykorzystanie występujących w tych układach czujników do szacowania tego parametru. Bieżąca masa pojazdu może być szacowana na podstawie sygnałów czujników rejestrujących ugięcie zawieszenia kół pojazdu, stosowanych w układach sterowania systemów oświetleniowych [19]. Ponadto możliwe jest określanie bieżącej masy pojazdu na podstawie sygnałów czujników ciśnienia

powietrza, występujących w układach pneumatycznego zawieszenia kół pojazdu [19]. Inną metodą, określaną jako metoda dynamiczna [19], jest porównanie opóźnienia osiąganego w procesie hamowania silnikiem pojazdu o bieżącej masie, z opóźnieniem osiąganym w procesie hamowania silnikiem, dla znanej masy pojazdu, np. dla dopuszczalnej masy całkowitej. Wówczas bieżąca masa  $m$  hamowanego pojazdu obliczana jest zgodnie z poniższym wzorem:

$$m = m_{dmc} \cdot \frac{a_{h_{sil,dmc}}}{a_{h_{sil}}} \quad (60)$$

gdzie:

$m_{dmc}$ - dopuszczalna masa całkowita hamowanego pojazdu,

$a_{h_{sil,dmc}}$ - opóźnienie hamowania silnikiem pojazdu o masie równej dopuszczalnej masie całkowitej.

Pominięto wpływ różnicy opóźnienia  $a_{h_{sil,dmc}}$  i  $a_{h_{sil}}$  na momenty bezwładności kół pojazdu.

- **Wyznaczenie sił reakcji  $Z_k$**

Zastosowanie monitora diagnostycznego hamulców poszczególnych kół pojazdu wymaga wyznaczenia sił reakcji normalnych  $Z_k$ , działających na styku hamowanych kół z nawierzchnią jezdni. W tym celu wykorzystany został warunek równowagi momentów sił działających w hamowanym pojeździe względem jego osi. Wartości sił reakcji normalnych, działających na styku koła przedniego i tylnego (odpowiednio  $Z_p$  i  $Z_t$ ) wynoszą:

$$Z_p = 0,5 \cdot G - Z_t \quad (61)$$

$$Z_t = \frac{0,5 \cdot G \cdot a - 0,5 \cdot m \cdot a_h \cdot h}{l} \quad (62)$$

gdzie:

$G$ - ciężar pojazdu,

$h$ - wysokość środka masy pojazdu,

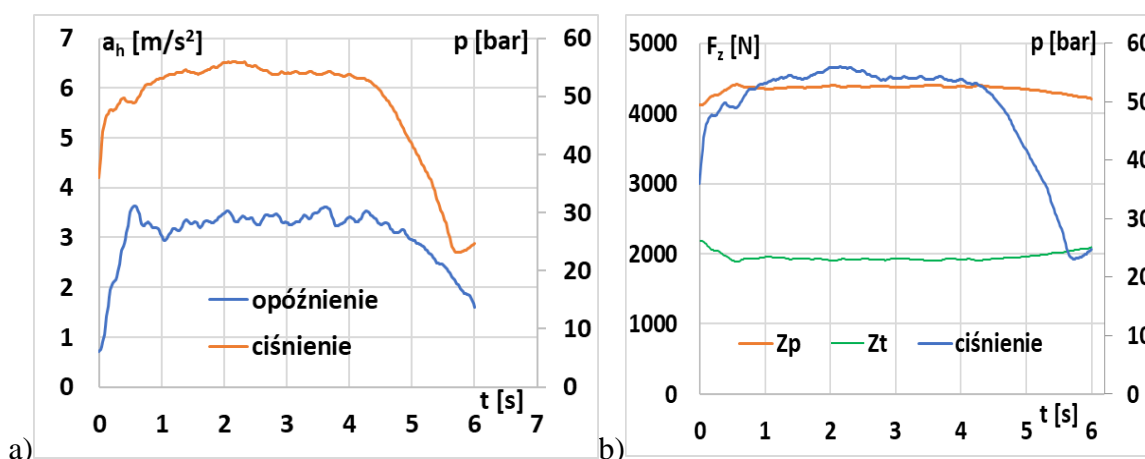
$a$ - odległość środka masy pojazdu od osi przedniej,

$a_h$ - opóźnienie hamowania pojazdu.

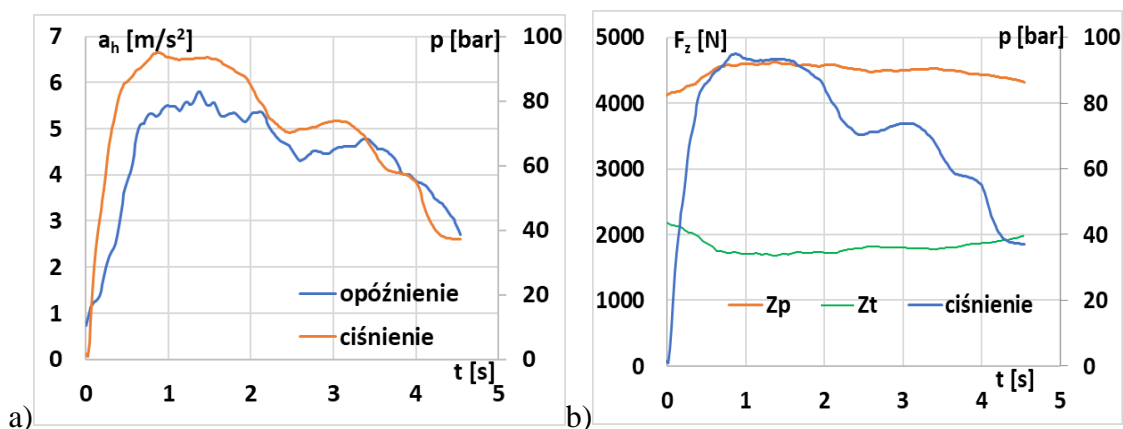
Obciążenie samochodu, zmieniające się w warunkach eksploatacji, powoduje przesunięcie położenia środka jego masy, a więc zmianę wymiarów  $a$  oraz  $h$ . W celu zwiększania dokładności wyznaczania sił nacisku kół na jezdnię podczas procesu hamowania samochodu, konieczne byłoby ich wyznaczanie dla każdego sposobu obciążenia pojazdu. Problem ten może zostać rozwiązany

poprzez wykorzystanie sygnałów czujników obciążenia osi pojazdu, stosowanych przykładowo w układzie sterowania systemem oświetlenia pojazdu. W przypadku braku stosowania omawianych czujników, możliwe jest wprowadzenie pola tolerancji wyników diagnostyki układu hamulcowego z uwagi na zmienność położenia środka masy, wynikająca ze zmiany obciążenia pojazdu.

W przypadku procesu hamowania z ustalonymi wartościami ciśnienia hamowania na poziomie około 55 bar i ustalonym opóźnieniem hamowania około  $3,5 \text{ m/s}^2$  (rys.26 a), mamy do czynienia z mniejszą zmiennością nacisków kół na jezdnię w porównaniu do bardziej dynamicznego procesu hamowania o większej intensywności (rys.27 a i b).



Rys. 26. Proces hamowania z umiarkowaną dynamiką, prędkość początkowa 80 km/h, brak dodatkowego obciążenia pojazdu, a) przebieg opóźnienia hamowania wraz z ciśnieniem w układzie hamulcowym, b) wyznaczone w procesie hamowania wartości sił nacisku koła przedniego oraz tylnego na nawierzchnię



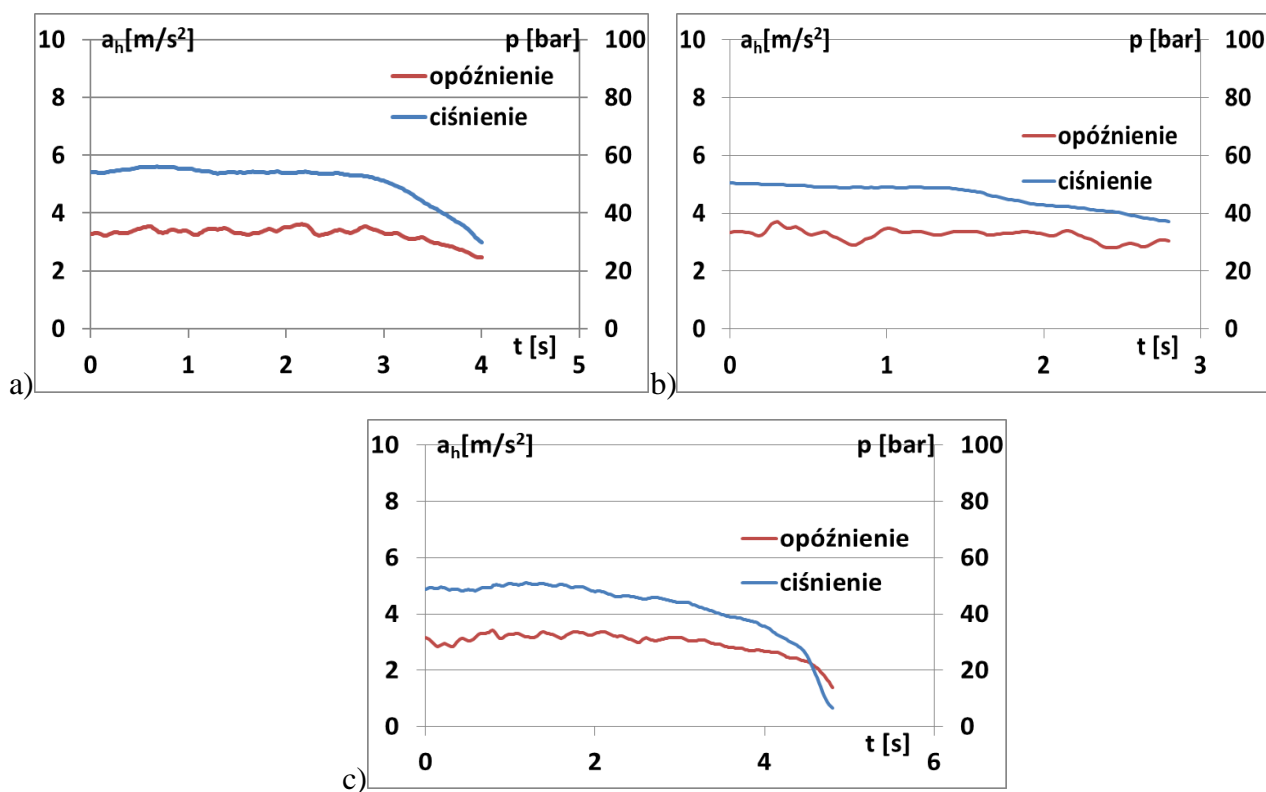
Rys. 27. Proces hamowania dynamicznego, prędkość początkowa 80 km/h, brak dodatkowego obciążenia pojazdu, a) przebieg opóźnienia hamowania wraz z ciśnieniem w układzie hamulcowym, b) wyznaczone w procesie hamowania wartości sił nacisku koła przedniego oraz tylnego na nawierzchnię



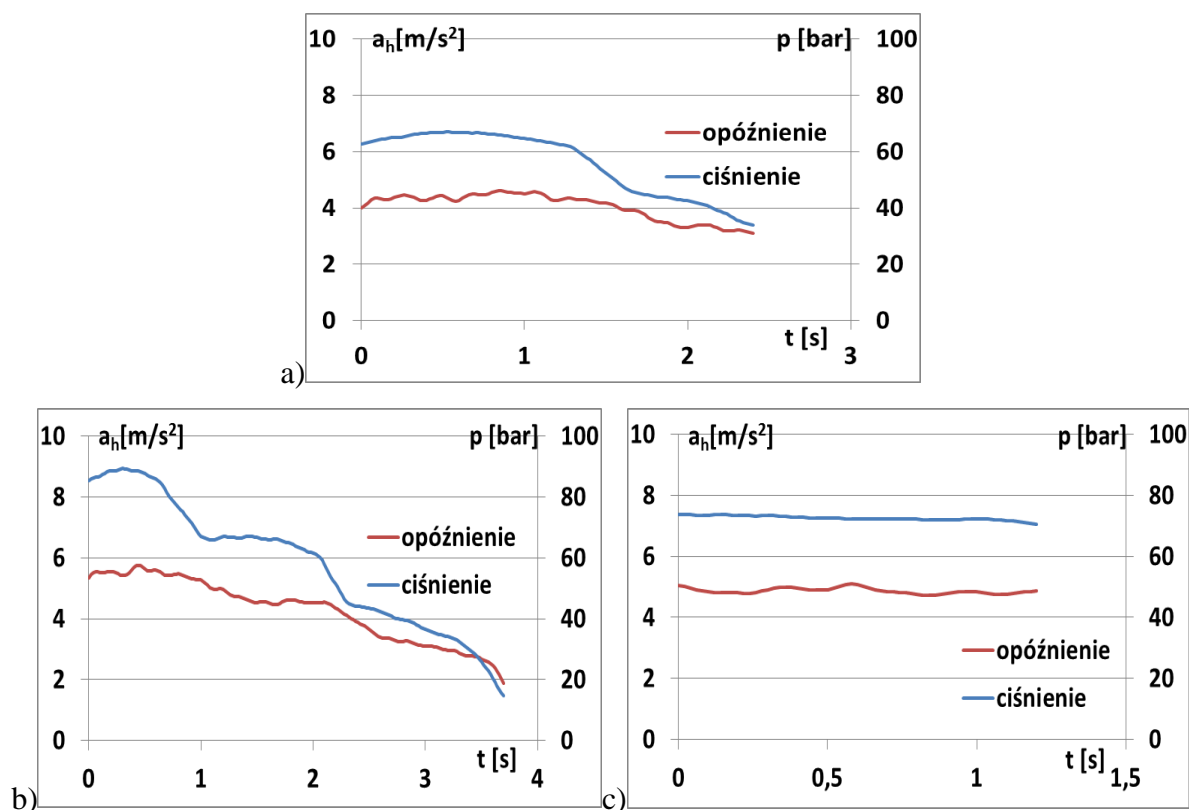
### 7.3. Badania monitora diagnostycznego całości układu hamulcowego

- Analiza powtarzalności działania monitora

Na rys. 28 oraz 29 przedstawiono przebiegi czasowe opóźnienia hamowania wraz z odpowiadającym ciśnieniem w układzie hamulcowym, na podstawie których obliczono wartości parametru diagnostycznego  $\Sigma k$ . Przebiegi te uzyskano starając się odtworzyć trzykrotnie każdy z procesów hamowania o takich samych warunkach (odpowiednio rys. 28 oraz 29). Brak automatyzacji wymuszenia hamowania samochodu badawczego spowodował zmienność procesów hamowania zbliżoną do warunków występujących w normalnej eksploatacji pojazdu (na przykład powtarzane łagodne procesy hamowania z prędkości 50 km/h do zatrzymania w warunkach miejskich). Pozwalało to na dokonanie analizy powtarzalności działania monitora diagnostycznego w warunkach normalnej eksploatacji pojazdu.



Rys. 28. Przebiegi czasowe opóźnienia samochodu i ciśnienia hamowania z prędkości 80 km/h, przy ciśnieniu w ogumieniu 2,0 bar, pojeździe bez dodatkowego obciążenia i o umiarkowanych opóźnieniach; a), b), c)- trzy powtórzenia hamowania



Rys. 29. Przebiegi czasowe opóźnienia samochodu i ciśnienia hamowania z prędkości 80 km/h, przy ciśnieniu w ogumieniu 1,5 bar, pojeździe bez dodatkowego obciążenia i o zwiększonych względem rys. 29 opóźnieniach; a), b), c) - trzy powtórzenia pomiarów

Niepewność działania monitora diagnostycznego została określana na podstawie błędu względnego ( $\delta$ ) wartości średniej parametru diagnostycznego względem wartości oczekiwanej, danego wzorem:

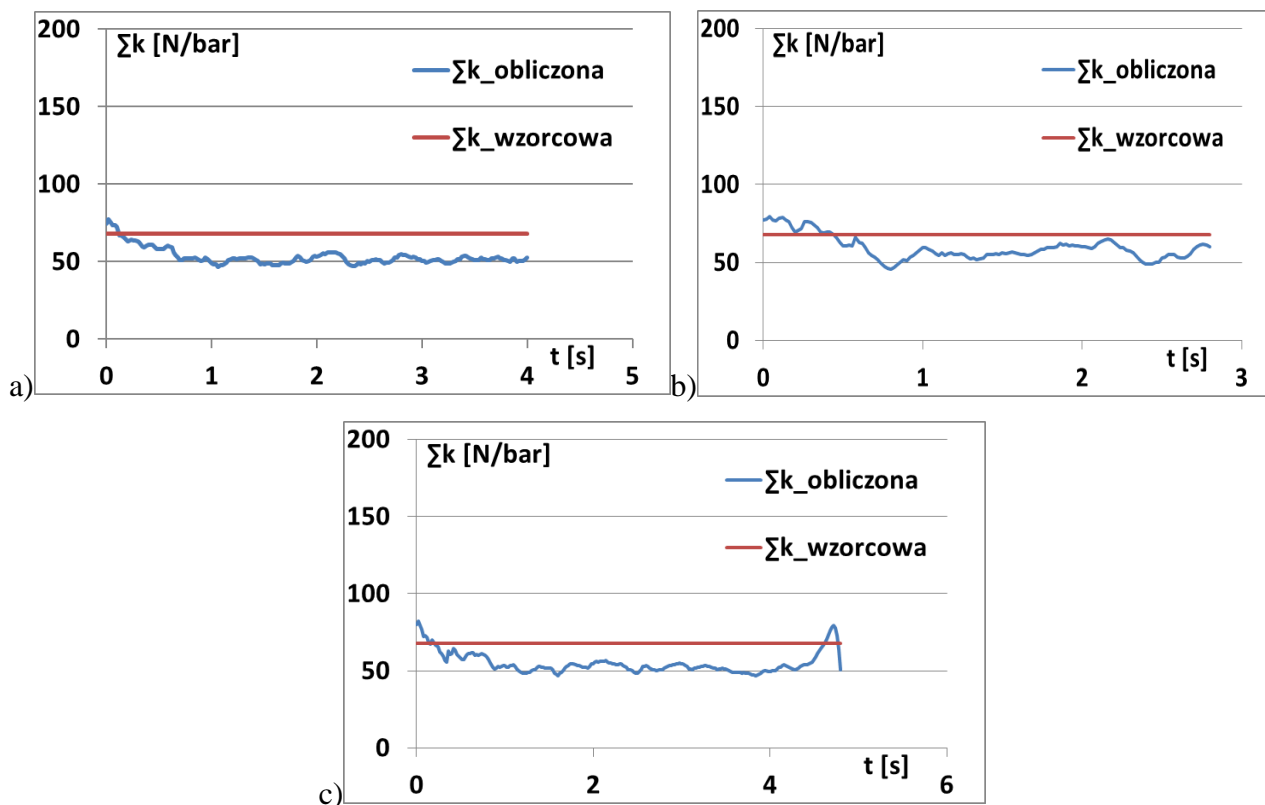
$$\delta = \left| \frac{k_o - k_{\bar{s}r}}{k_o} \right| \cdot 100\% \quad (63)$$

gdzie:

$k_o$ - oczekiwana wartość parametru diagnostycznego,

$k_{\bar{s}r}$ - średnia wartość parametru diagnostycznego, uzyskana jako wynik działania monitora diagnostycznego.

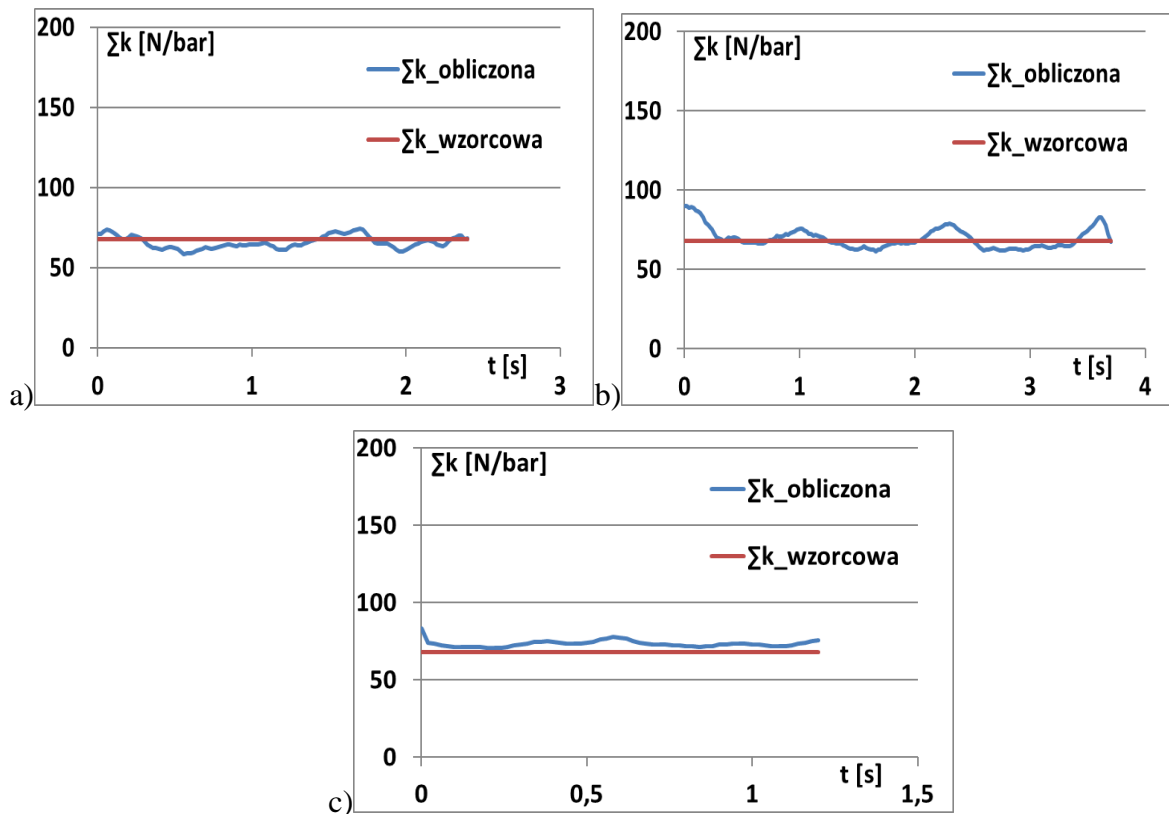
W przeprowadzonej w rozdziale 7.3 analizie wartościami oczekiwanymi dla wyznaczenia błędu  $\delta$  były wzorcowe wartości  $\sum k$  oraz  $k$  dla poszczególnych kół, wyznaczone z wykorzystaniem stanowiska rolkowego. Natomiast podczas analizy efektywności zastosowania sieci neuronowej opartej o model nieliniowej autoregresji, jako wartości oczekiwane przyjmowano, oprócz wartości wzorcowych, także parametry diagnostyczne hamulców uzyskane bez zastosowania sieci neuronowej (zgodnie z opisem w rozdziale 8.2). Na rys. 30 oraz rys. 31 przedstawiono wyniki obliczeń parametru  $\sum k$  dla analizowanych procesów hamowania.



Rys. 30. Wyniki działania monitora diagnostycznego całości układu hamulcowego - hamowanie z prędkości 80 km/h, przy ciśnieniu w ogumieniu 2,0 bar, pojeździe bez dodatkowego obciążenia i umiarkowanych opóźnieniach hamowania, dla trzech hamowań przedstawionych na rys 28

Badane hamulce znajdowały się w stanie sprawności technicznej. W przypadkach przedstawionych na rys. 30 przebiegów błąd względny wyznaczenia parametru  $\Sigma k$  przekraczał wartość 10 %, przyjętą za wymaganą. Wynosił on odpowiednio 22, 12 i 19 % dla przebiegów 30 a), b i c).

Dla przedstawionych na rys.31 przebiegów średnie wartości błędu względnego wyznaczenia  $\Sigma k$  wynoszą odpowiednio 8%, 2,5 % oraz 3 %. Są one zatem w każdym z przedstawionych przypadków mniejsze niż 10 %. Porównanie hamowań z rys. 28 i 29 wykazuje, że lepszą dokładność monitora uzyskuje się dla większych opóźnień hamowania.



Rys. 31. Wyniki działania monitora diagnostycznego całości układu hamulcowego - hamowanie z prędkości 80 km/h, przy ciśnieniu w ogumieniu 1,5 bar, pojeździe bez dodatkowego obciążenia i o zwiększonych względem rys 29 opóźnieniach hamowania, dla trzech hamowań przedstawionych na rys. 29

W tabeli 5 przedstawiono dane statystyczne, związane z analizowanymi procesami hamowania. Kolumny tabeli, opisane jako hamowanie umiarkowane 1, 2 i 3 dotyczą przebiegów hamowania przedstawionych na rys. odpowiednio 28 a), b) i c). Natomiast kolumny oznaczone jako hamowanie dynamiczne 1, 2 i 3 związane są z przebiegami hamowania przedstawionymi na rys. odpowiednio 29 a), b) i c).

Tab.5. Średnie arytmetyczne, odchylenia standardowe oraz błąd względny parametru  $\Sigma k$

	hamowanie umiarkowane 1	hamowanie umiarkowane 2	hamowanie umiarkowane 3	hamowanie dynamiczne 1	hamowanie dynamiczne 2	hamowanie dynamiczne 3
Średnia arytmetyczna [N/bar]	52,94	59,33	54,93	65,74	69,5	73,38
Odchylenie standardowe [N/bar]	5,97	7,82	6,94	3,96	6,5	2,12
Błąd względny $\Sigma k$ [%]	22	12	19	3	3	8

Na podstawie danych zawartych w tab.5 można stwierdzić, że w przypadku hamowań dynamicznych o zwiększonych wartościach opóźnień- (ok. 5 - 6 m/s<sup>2</sup>) występuje zmniejszenie różnicy średniej wartości  $\Sigma k$  względem wartości wzorcowej (67,8 N/m) w porównaniu do hamowań umiarkowanie dynamicznych (z wartościami opóźnień około 2 - 4 m/s<sup>2</sup>). Wartości błędu względnego średniej wartości  $\Sigma k$  dla hamowań umiarkowanie dynamicznych są mniejsze niż w dla przypadków hamowań o zwiększonych wartościach opóźnienia. Dla 2 z 3 powtórzeń hamowania umiarkowanie dynamicznego błąd względny średniej wartości  $\Sigma k$  wynosi 3 %. Z kolei dla 2 z 3 procesów hamowania dynamicznego jego wartość uzyskano na poziomie około 20 %. W przypadku hamowań z umiarkowanymi opóźnieniami, wartości odchyłeń standardowych w 2 z 3 powtórzeniach procesu hamowania osiągają większe wartości niż wartości odchyłeń standardowych dla hamowań dynamicznych.

- **Wpływ pochylenia jezdni**

Przeprowadzono analizę błędu wyznaczenia wartości parametru  $\Sigma k$ , wynikającego z nieuwzględnienia w obliczeniach występującego w rzeczywistości pochylenia jezdni. Siła oporów wzniesienia wynosiła :

$$F_w = \pm G \cdot \sin(\alpha) \quad (64)$$

gdzie:

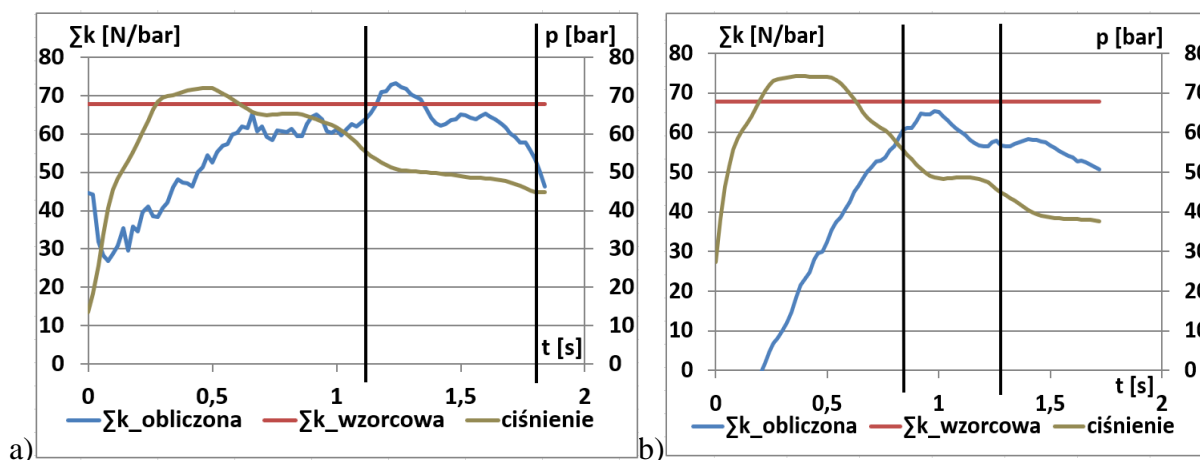
$F_w$ - siła oddziaływania wzniesienia,

$G$ - ciężar pojazdu,

$\alpha$ - kąt nachylenia jezdni.

Na rys. 32 a) i b) przedstawiono wyniki obliczeń parametru  $\Sigma k$ , odpowiednio na jezdni pochyłej (ze wzniosem 8%) oraz płaskiej. W analizowanym, dynamicznym przebiegu hamowania monitor diagnostyczny układu hamulcowego cechował się małą dokładnością działania. Jednakże pomimo niedokładności działania monitora diagnostycznego, widoczne jest zwiększenie wartości  $\Sigma k$  podczas hamowania na jezdni ze wzniosem. Wyznaczono średnie wartości parametru  $\Sigma k$  w zakresach hamowania przedstawionych na rys 32 a) i b), w których wartości ciśnienia hamowania dla obu procesów były zbliżone. Zakresy te, zaznaczone na powyższych wykresach pionowymi liniami, zawierały taką samą liczbę elementów. W przypadku wzniesienia jezdni średnia wartość  $\Sigma k$  wynosiła 64,44 N/bar. Z kolei dla hamowania na jezdni płaskiej uzyskano średnią  $\Sigma k$  o wartości 60,14 N/bar. Różnica względna średnich wartości  $\Sigma k$  między hamowaniem na jezdni płaskiej i pochyłej wynosi 7,2 %, przy wzniosie jezdni na poziomie 8 %. Fakt ten wskazuje na wystarczającą czułość monitora

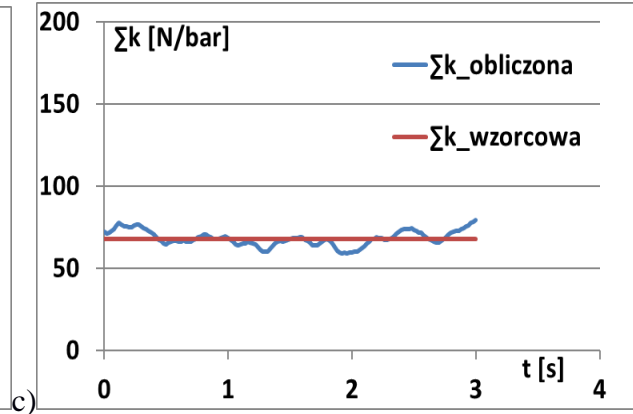
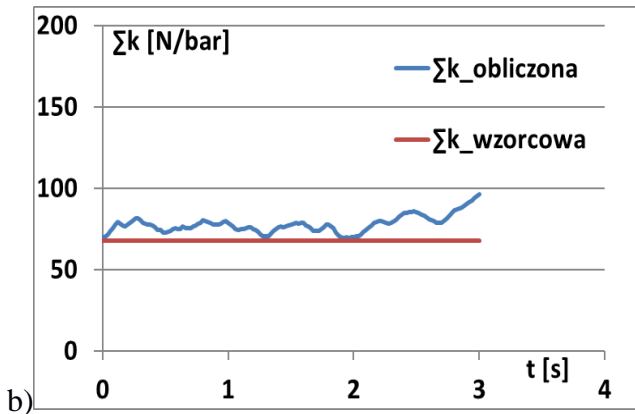
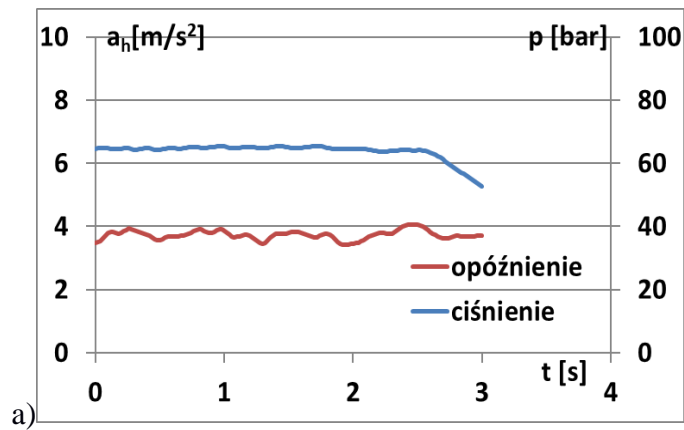
diagnostycznego na zmianę tego parametru. Z przeprowadzonej analizy wynika, że z uwagi na wymaganą dokładność działania monitora diagnostycznego, pochylenie jezdni jest wielkością niepomijalną.



Rys. 32. Przebiegi czasowe parametru  $\Sigma k$  oraz jego wartość wzorcowa dla dwóch przebiegów hamowania: a) prędkość początkowa 30 km/h, duża dynamika hamowania, pojazd bez dodatkowego obciążenia, jezdnia o wzniosie 8%, b) prędkość początkowa 30 km/h, duża dynamika hamowania, jezdnia bez pochylenia, pojazd bez dodatkowego obciążenia

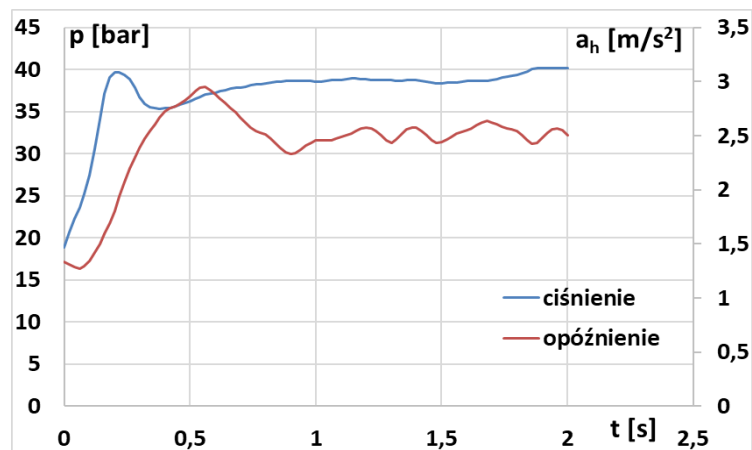
- **Wpływ momentu hamującego silnika**

Przebiegi hamowania, na podstawie których dokonano analizy wpływu momentu hamującego silnika spalinowego na wartość parametru  $\Sigma k$  wybrano tak aby był to proces o minimalnej zmienności opóźnienia hamowania, które ponadto osiąga wartości znacząco większe niż opóźnienie hamowania silnikiem. Średni błąd względny parametru  $\Sigma k$  w stosunku do jego wartości wzorcowej (dany wzorem (63)) wynosi 0,5% w przypadku obliczeń tego parametru uwzględniających hamowanie silnika spalinowego (rys. 33 c). Tak niewielka jego wartość wynika z uśrednienia obszarów zaniżeń i zawyżeń  $\Sigma k$  względem wartości wzorcowej, występujących dla różnorodnych przedziałów czasowych procesu hamowania. Gdy moment hamujący silnika spalinowego nie był uwzględniany, wówczas średnia wartość błędu wyznaczenia wartości  $\Sigma k$  względem wzorca (dla hamulców w stanie sprawności technicznej) wynosiła 15 % (rys. 33 b).



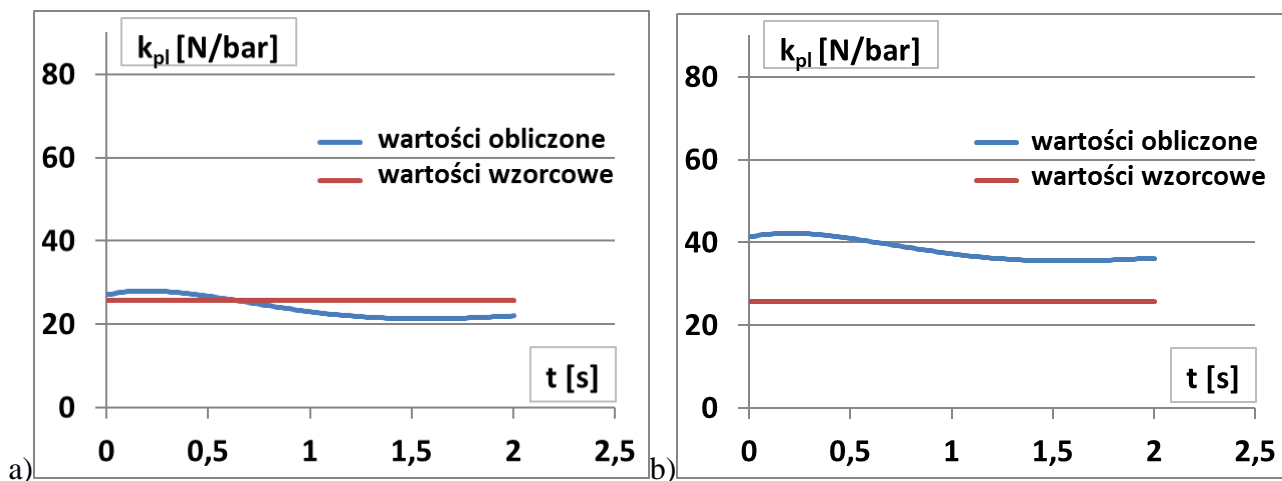
Rys. 33: Przebieg łagodnego hamowania z prędkości początkowej 80 km/h, z ciśnieniem w ogumieniu 1,5 bar, dodatkowe obciążenie pojazdu badawczego 300 kg: a) przebiegi czasowe opóźnienia hamowania i ciśnienia, b) przebieg obliczonych wartości parametru diagnostycznego  $\Sigma k$  wraz z wartością wzorcową bez uwzględnienia momentu hamującego silnika, c) przebieg obliczonych wartości parametru diagnostycznego  $\Sigma k$  wraz z wartością wzorcową i z uwzględnieniem momentu hamującego silnika

W celu analizy wpływu momentu hamującego silnika na wartości parametrów diagnostycznych hamulców pojedynczych kół wybrano proces hamowania pojazdu badawczego o średnim opóźnieniu hamowania wynoszącym  $2,42 \text{ m/s}^2$ . Składa się on z 0,5 sekundowej chwili narostu opóźnienia i ciśnienia oraz 1,5 sekundowego okresu ustalenia tych wielkości (rys. 34).



Rys. 34: Przebieg czasowy opóźnienia i ciśnienia hamowania w procesie hamowania do analizy momentu hamującego silnika, prędkość początkowa 50 km/h masa samochodu z kierowcą bez dodatkowego obciążenia, ciśnienie pompowania kół wynoszące 2,0 bar

Przykładowe wyniki obliczeń parametru  $k_{pl}$  (dla koła tylnego lewego) przedstawiono na rys. 35. Przeprowadzona analiza potwierdza, że wpływ momentu hamującego silnika spalinowego na wartość parametru diagnostycznego hamulców jest większy w przypadku wyznaczania parametru diagnostycznego hamulca koła napędowego w porównaniu do obliczania parametru diagnostycznego układu hamulcowego jako całości. Jest to spowodowane faktem, że na wartość parametru  $\sum k$  wpływają również koła nienapędzane, na które nie oddziałuje moment hamujący silnika pojazdu.



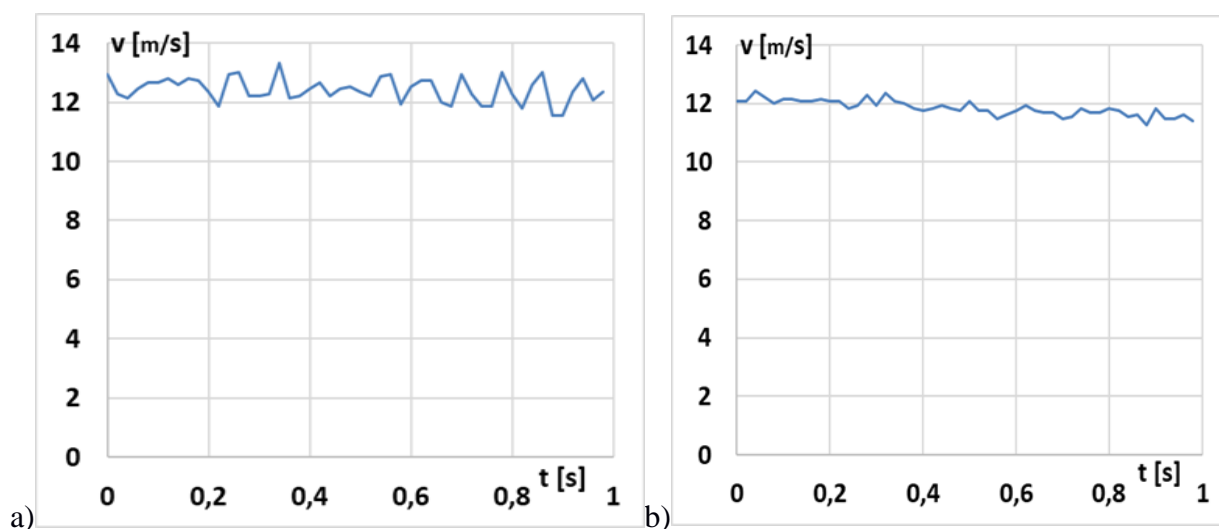
Rys. 35. Analiza uwzględnienia momentu hamującego silnika w monitorze diagnostycznym - prędkość początkowa 50 km/h masa samochodu z kierowcą bez dodatkowego obciążenia,: a) uwzględnienie hamowania silnikiem, b) brak uwzględnienia hamowania silnikiem

Zakresy różnic wartości parametrów diagnostycznych hamulców przy uwzględnianiu i nieuwzględnianiu momentu hamującego silnika powodują, że jest on wielkością niepomijalną w monitorze diagnostycznym układu hamulcowego gdy ma on zapewnić średni błąd wyznaczania parametrów diagnostycznych względem wartości wzorcowych na poziomie pozwalającym na efektywną diagnostykę (10%).

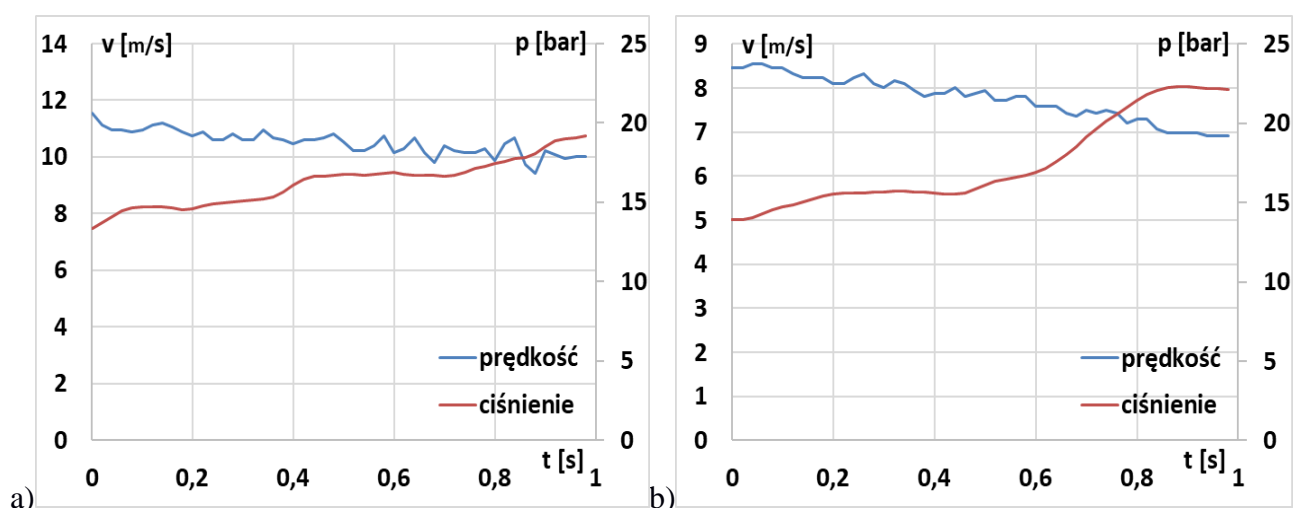


- **Wpływ nierówności jezdni**

Kolejnym, analizowanym czynnikiem są nierówności nawierzchni drogowej. Hamowanie na nawierzchni nierównej cechowały pewne oscylacje prędkości kół zarówno podczas procesu hamowania silnikiem (rys. 37 a) jak i podczas hamowania z działającym układem hamulcowym (rys. 38 b). Zwiększone oscylacje przebiegów prędkości kół, występujące podczas hamowania na jezdni nierównej stanowią zakłócenie dla działania monitora diagnostycznego. Mają charakter losowy, możliwy do ograniczenia poprzez algorytmy filtracyjne.



Rys. 36 Przebiegi czasowe prędkości koła przy hamowaniu silnikiem: a) jezdnia nierówna, b) jezdnia gładka

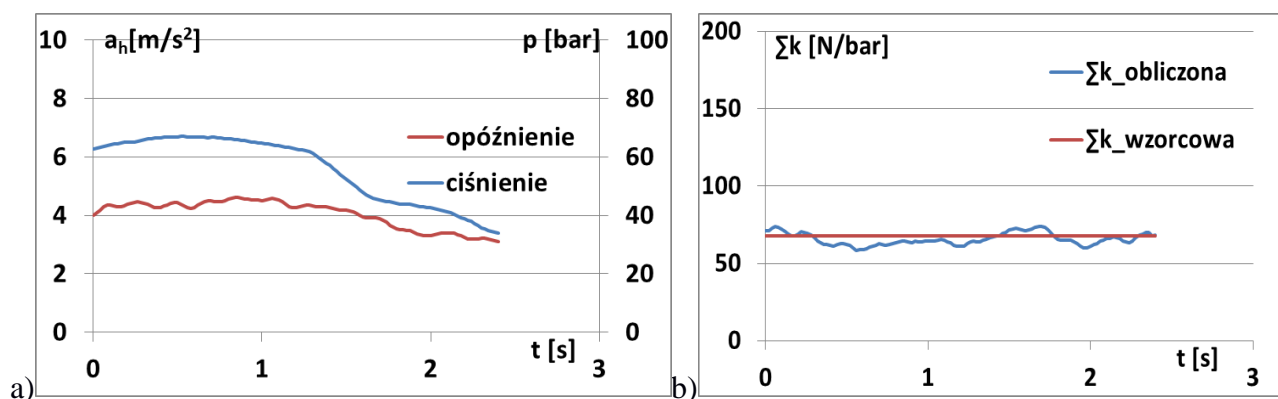


Rys. 37 Przebiegi czasowe prędkości koła oraz ciśnienia w układzie hamulcowym podczas łagodnego procesu hamowania: a) jezdnia nierówna, b) jezdnia gładka

- **Wpływ prędkości początkowej i intensywności hamowania, ciśnienia w ogumieniu oraz masy pojazdu**

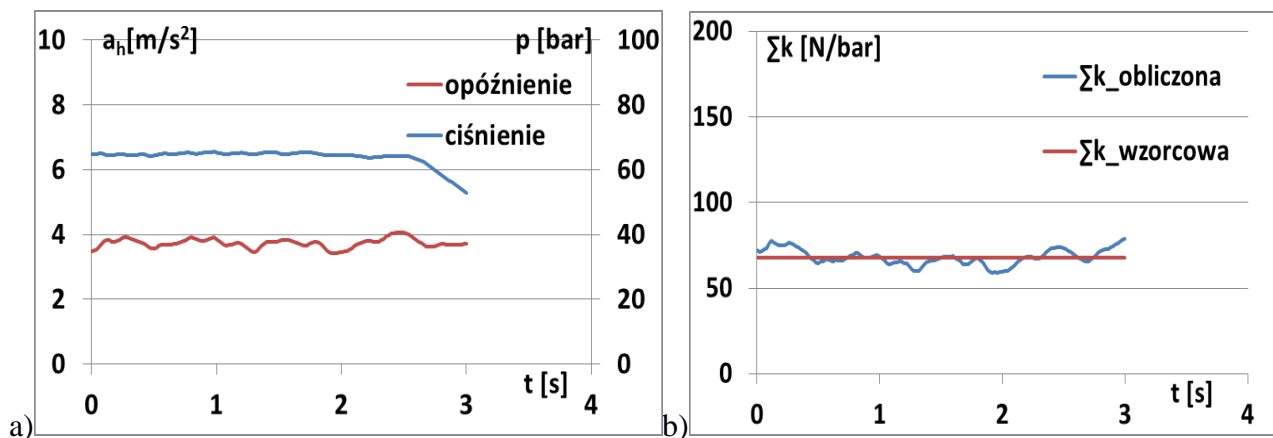
Analiza wpływu warunków hamowania na działanie monitora diagnostycznego układu hamulcowego obejmowała jego realizację dla różnorodnych przebiegów hamowania, różniących się prędkością początkową, obciążeniem pojazdu badawczego oraz dynamiką zmiany ciśnienia płynu hamulcowego w czasie. Zmiany tych czynników odzwierciedlają zmienne warunki eksploatacji pojazdu. Przeprowadzone badania umożliwiły ocenę błędu wyznaczania wartości parametru  $\Sigma k$  względem wartości wzorcowej jak również rozrzutu wyników pomiarów (niepewności).

Przedstawiony na rys. 38 proces hamowania samochodu bez dodatkowego obciążenia cechuje łagodna zmiana opóźnienia hamowania oraz wymuszenia - ciśnienia w układzie hamulcowym. Warunki te skutkują niewielkim rozrzutem uzyskiwanych wartości parametru diagnostycznego  $\Sigma k$  i wartością względnego błędu wyznaczenia tego parametru (wzór 63) na poziomie 3%.



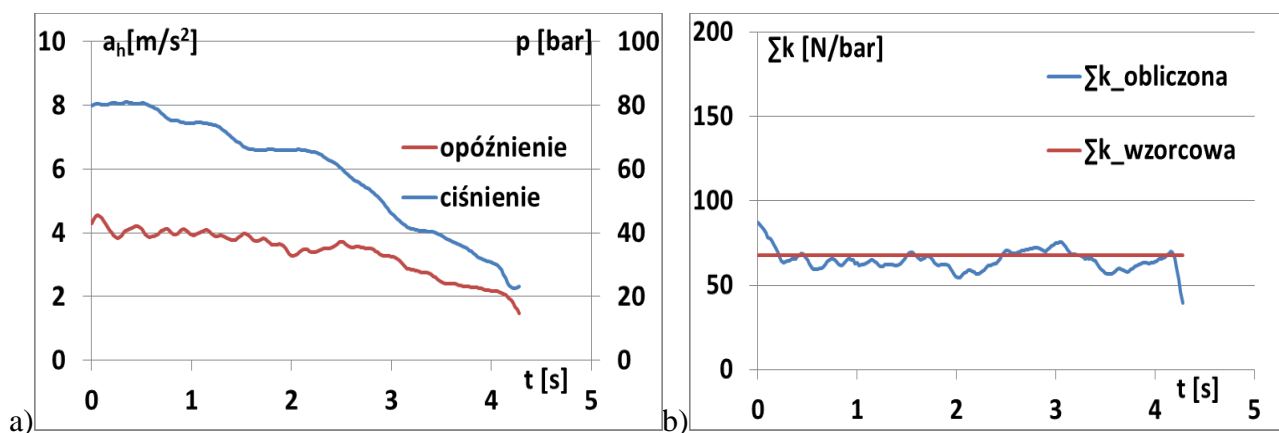
Rys. 38. Przebieg łagodnego hamowania z prędkości początkowej 80 km/h, z ciśnieniem w ogumieniu 1,5 bar, pojazd bez dodatkowego obciążenia: a) przebiegi czasowe ciśnienia hamowania i opóźnienia samochodu, b) uzyskane wartości parametru  $\Sigma k$  wraz z wartością wzorcową

W przedstawionym na rysunku 39 przypadku hamowania pojazdu obciążonego, pomimo ustalonego charakteru przebiegu czasowego ciśnienia hamowania, mają miejsce pewne oscylacje opóźnienia hamowania samochodu. Jednakże zakres omawianych oscylacji jest niewielki. Błąd względny  $\Sigma k$  w analizowanym przypadku wynosi około 0,5 %.



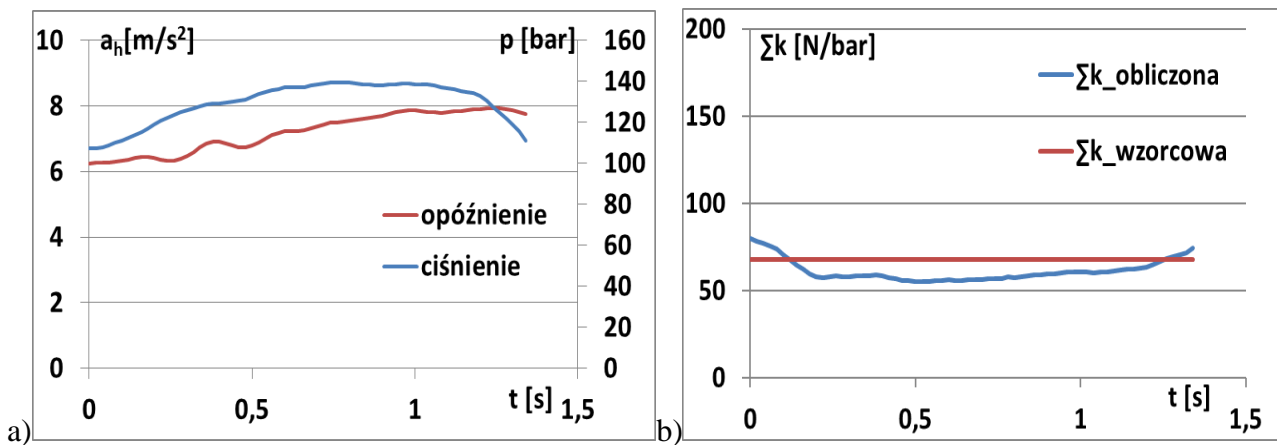
Rys. 39. Przebieg łagodnego hamowania z prędkości początkowej 80 km/h, z ciśnieniem w ogumieniu kół 1,5 bar, dodatkowe obciążenie pojazdu 300kg: a) przebiegi czasowe ciśnienia hamowania i opóźnienia samochodu, b) uzyskane wartości parametru  $\Sigma k$  wraz z wartością wzorcową

Przedstawiony na rysunku 40 przypadek cechuje zmienność wartości ciśnienia hamowania samochodu, co rzutuje na rozrzut uzyskanych wartości parametru  $\Sigma k$ . Po czasie około 2 sekundy następuje bardziej intensywne zmniejszenie ciśnienia hamowania oraz opóźnienia samochodu (rys. 40a). W obszarze tym dokładność działania monitora diagnostycznego jest pogorszona (rys. 40 b). Błąd względny  $\Sigma k$  w przedstawionym przypadku wynosi 4,3 %.



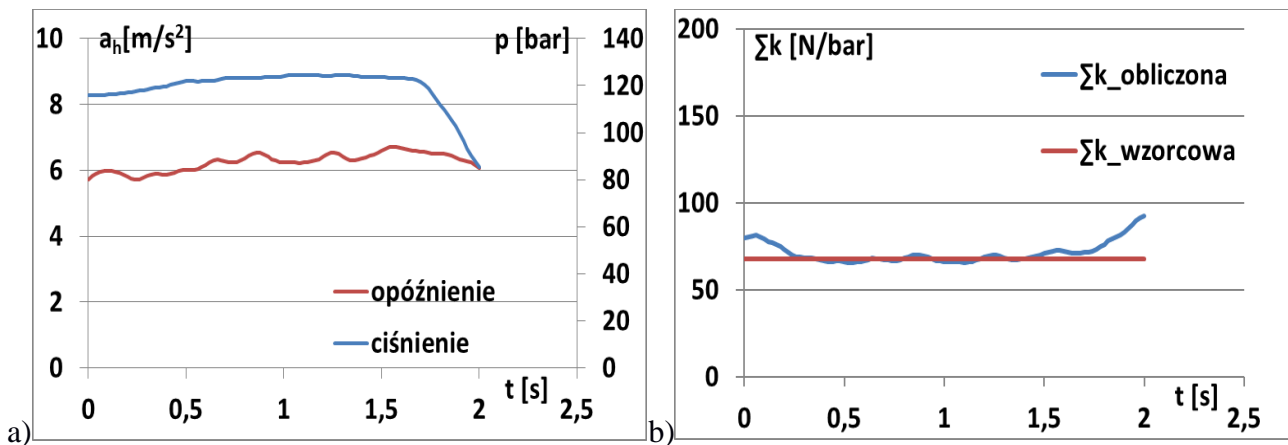
Rys. 40. Przebieg łagodnego hamowania z prędkości początkowej 80 km/h, z ciśnieniem w ogumieniu 2,0 bar, dodatkowe obciążenie pojazdu 300 kg: a) przebiegi czasowe ciśnienia hamowania i opóźnienia samochodu, b) uzyskane wartości parametru  $\Sigma k$  wraz z wartością wzorcowymi

W przedstawionym na rysunku 41 przypadku hamowania intensywnego, uzyskano średnią wartość błędu względnego wyznaczania  $\Sigma k$  na poziomie 10 %.



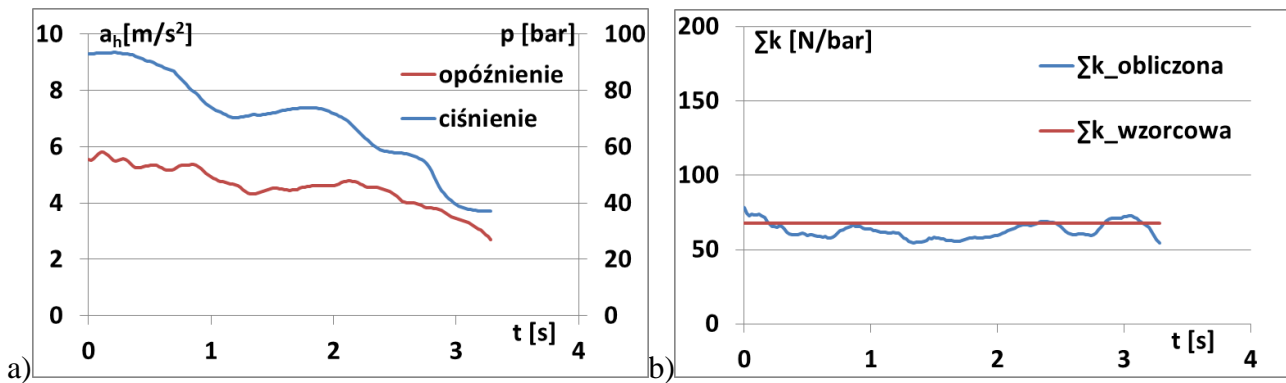
Rys. 41. Przebieg gwałtownego hamowania z prędkości początkowej 80 km/h, z ciśnieniem w ogumieniu 1,5 bar, brak dodatkowego obciążenia pojazdu: a) przebiegi czasowe ciśnienia hamowania i opóźnienia samochodu, b) uzyskane wartości parametru  $\Sigma k$  wraz z wartościami wzorcowymi

Przedstawiony na rys. 42 przebieg hamowania cechuje się dużą intensywnością. Hamowanie samochodu jest dodatkowo zwiększane poprzez opory toczenia kół, będące rezultatem zmniejszonego do 1,5 bar ciśnienia. Błąd względny  $\Sigma k$  w analizowanym przypadku wynosi około 5 %. Na jego wartość rzutuje w istotnym stopniu zakres, w którym następowało zmniejszanie ciśnienia hamowania - czas od około 1,75 sekundy. Wówczas obserwujemy gwałtowne zwiększenie różnicy między uzyskanymi, a wzorcowymi wartościami parametru diagnostycznego  $\Sigma k$ .



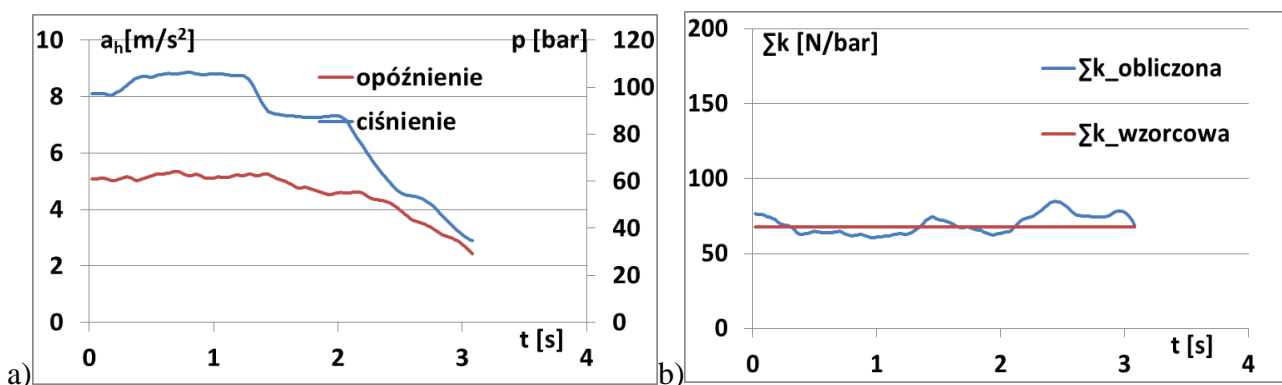
Rys. 42. Przebieg gwałtownego hamowania z prędkości początkowej 80 km/h, z ciśnieniem w ogumieniu 1,5 bar, dodatkowe obciążenie pojazdu 300 kg: a) przebiegi czasowe ciśnienia hamowania i opóźnienia samochodu, b) uzyskane wartości parametru  $\Sigma k$  wraz z wartościami wzorcowymi

Przedstawiony na rys. 43 przebieg hamowania cechuje się błędem względnym  $\Sigma k$  na poziomie 7 %. Jest to przebieg hamowania, cechujący się malejącym przebiegiem ciśnienia hamowania o 40 bar w czasie około 3 sekund. Przy początkowym ciśnieniu 60 bar taka zmienność ciśnienia pozwoliła na działanie monitora diagnostycznego w stopniu pozwalającym na uznanie analizowanego procesu hamowania jako zdatnego do oceny stanu technicznego układu hamulcowego.



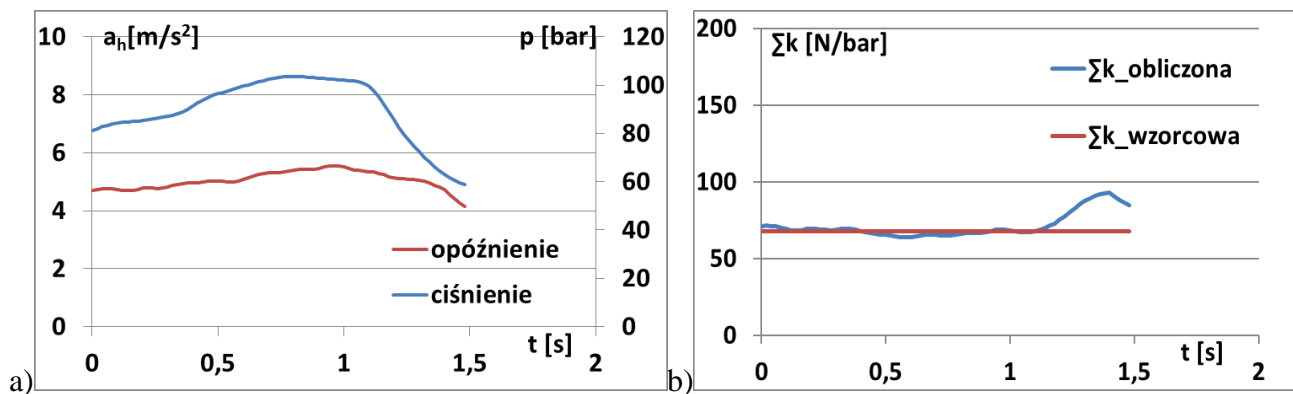
Rys. 43. Przebieg gwałtownego hamowania z prędkości początkowej 80 km/h, z ciśnieniem w ogumieniu 2,0 bar, brak dodatkowego obciążenia pojazdu: a) przebiegi czasowe ciśnienia hamowania i opóźnienia samochodu, b) uzyskane wartości parametru  $\Sigma k$  wraz z wartością wzorcową

Podobnie jak uprzednio omawiany przypadek, również proces hamowania przedstawiony na rys. 44 charakteryzuje się występującym zmniejszaniem ciśnienia hamowania. Występuje ono po czasie 1,5 sekundy i powoduje zwiększenie różnic otrzymywanych wartości parametru  $\Sigma k$  względem wartości wzorcowej w porównaniu do fragmentu procesu hamowania, który występuje przed nim. Błąd względny działania monitora diagnostycznego dla całości przedstawionego na rys. 44 trzy sekundowego procesu wynosi 3 %.



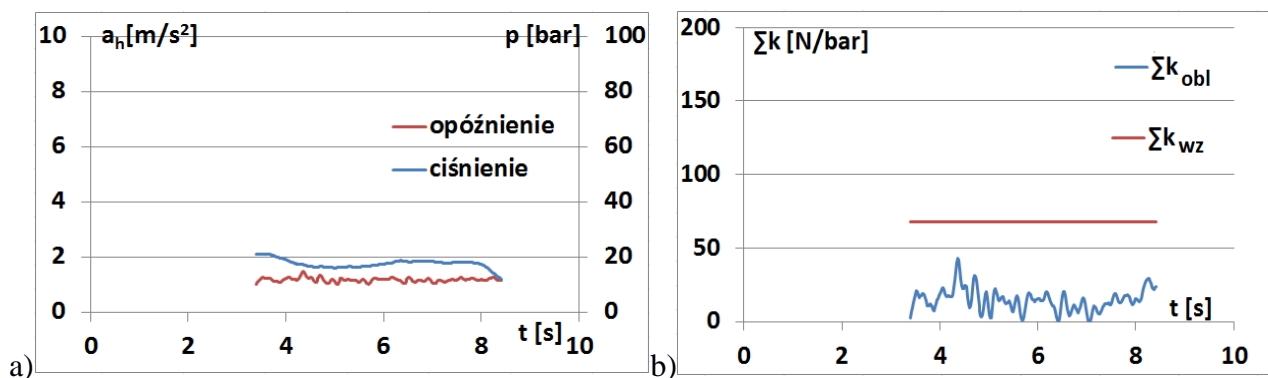
Rys. 44. Przebieg gwałtownego hamowania z prędkości początkowej 80 km/h, ciśnienie w ogumieniu 2,0 bar, dodatkowe obciążenie pojazdu 300 kg: a) przebiegi czasowe ciśnienia hamowania i opóźnienia samochodu, b) uzyskane wartości parametru  $\Sigma k$  wraz z wartością wzorcową

Przedstawiony na rys. 45 przykład jest fragmentem procesu hamowania ze zwiększeniem ciśnienia występującym w początkowej jego części. W odróżnieniu od uprzednio opisywanego procesu hamowania, zwiększenie to występuje, gdy opóźnienie hamowania zostało już rozwinięte. Warunki te nie powodują pogorszenia dokładności działania monitora diagnostycznego, który w zakresie czasowym do 1 sekundy pozwala na uzyskanie wartości parametru  $\Sigma k$  o niewielkich różnicach względem wartości wzorcowej. Gwałtowne zmniejszenie ciśnienia hamowania, występujące w końcowej fazie przedstawionego procesu, skutkuje zwiększeniem błędu względnego  $\Sigma k$ . Dla całości przedstawionego na rys. 45 hamowania jego wartość wynosi około 5%.



Rys. 45. Przebieg gwałtownego hamowania z prędkości początkowej ok. 40 km/h, z ciśnieniem w ogumieniu 1,5 bar, dodatkowe obciążenie pojazdu 300 kg: a) przebiegi czasowe ciśnienia hamowania i opóźnienia samochodu, b) uzyskane wartości parametru  $\Sigma k$  wraz z wartością wzorcową

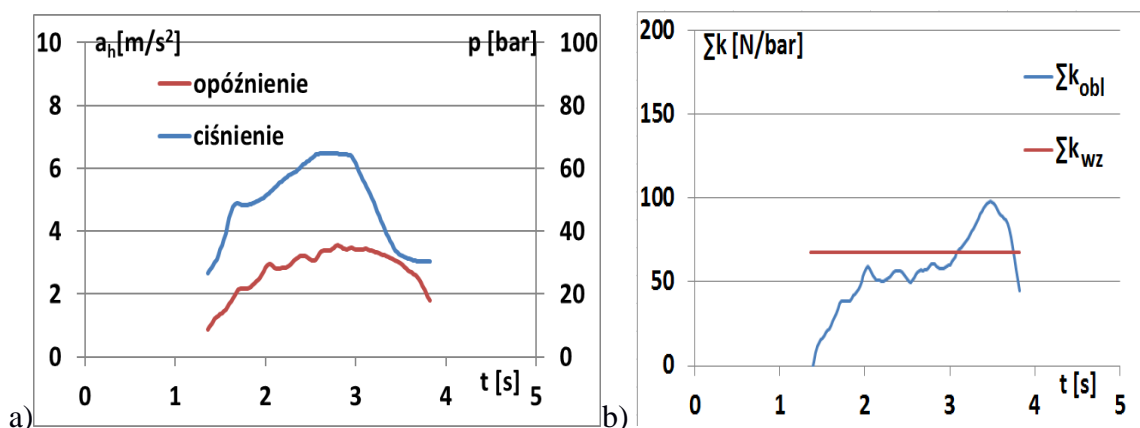
Kolejny przebieg procesu hamowania to przebieg hamowania o ustalonym przebiegu ciśnienia, lecz o niewielkich jego wartościach (rys.46 a). Wartości te powodują, że osiągnięte opóźnienie hamowania wynosi około 1,5 m/s<sup>2</sup>. Warunki analizowanego przebiegu hamowania nie pozwalają na efektywne obliczenia parametru diagnostycznego  $\Sigma k$ . Obliczane wartości  $\Sigma k$  są znacznie mniejsze niż wartość wzorcowa (rys.46 b). Przyczyną zaniżenia uzyskiwanych wartości  $\Sigma k$  jest niewielka różnica opóźnień hamowania względem opóźnień hamowania silnikiem i wpływ niepewności wyznaczenia składowych zależności, na podstawie której wyznaczano parametr  $\Sigma k$ . W przypadku analizy omawianego przebiegu hamowania znajduje potwierdzenie uprzednio sformułowany warunek realizacji monitora dla opóźnień większych niż przeciętne opóźnienie hamowania silnikiem, czyli ponad 2 m/s<sup>2</sup>.



Rys. 46. Przebieg hamowania z prędkości początkowej 30 km/h, masa samochodu z kierowcą + obciążenie 300 kg, ciśnienie w ogumieniu 1.5 bar, hamowanie mało intensywne: a) zależności czasowe opóźnienia samochodu oraz ciśnienia hamowania, b) przebieg czasowy obliczonego parametru  $\Sigma k$  wraz z wartością wzorcową

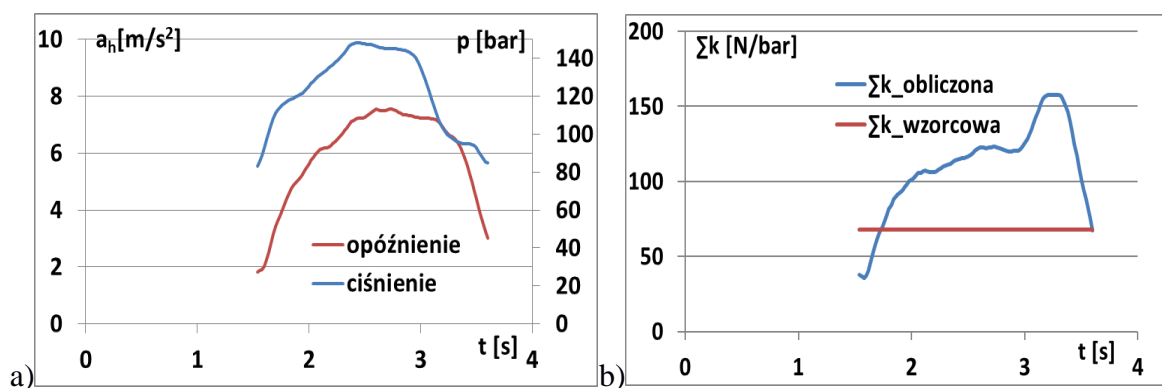
Przedstawiony na rys. 47 proces hamowania zakwalifikowano do grupy hamowań średnio intensywnych, krótkotrwałych, o dużej zmienności opóźnienia. W pierwszej jego chwili miał miejsce bardziej gwałtowny narost ciśnienia, następnie od około 1,7 sekundy procesu ciśnienie w układzie hamulcowym narastało mniej gwałtownie, do wartości około 70 barów. W części procesu hamowania

od około 2 do 3 sekundy przebieg parametru  $\Sigma k$  osiąga wartości zbliżone do wartości wzorcowej (rys 47 b). Ciśnienie hamowania wynosi wówczas około 70 bar i powoduje opóźnienie hamowania na poziomie  $3,5 \text{ m/s}^2$  (rys 47 a). Jest to najbardziej ustalony fragment analizowanego procesu hamowania, o opóźnieniu znacząco przekraczającym opóźnienie hamowania silnikiem, co rzutuje na dobrą dokładność działania monitora diagnostycznego. Ponadto małe ciśnienie w ogumieniu kół oraz znaczne obciążenie pojazdu powodują zmniejszenie gwałtowności zmian prędkości kół i samochodu, dodatkowo zwiększające dokładność obliczania parametru  $\Sigma k$ . Niemniej przebieg parametru  $\Sigma k$  jest bardzo nierównomierny, a błąd względny w analizowanym przypadku wynosi około 16 %.



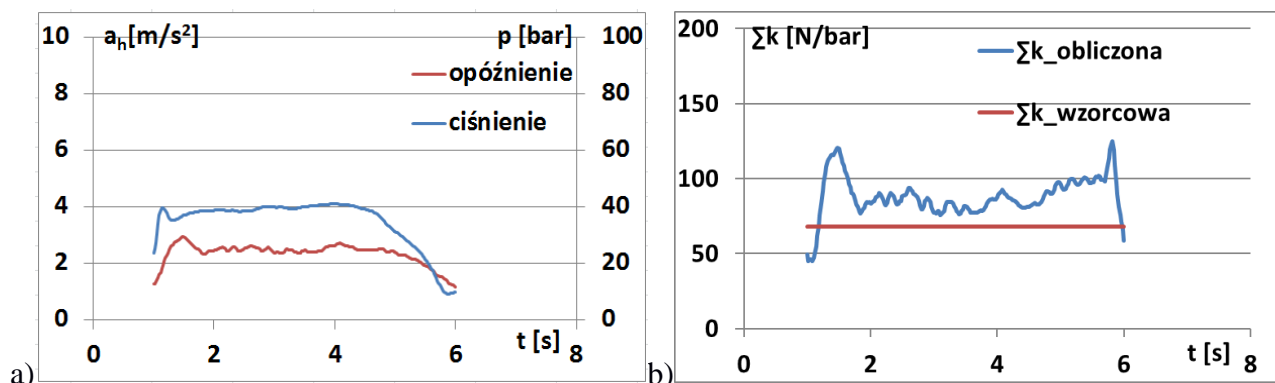
Rys. 47: Przebieg hamowania od prędkości początkowej 30 km/h, masa samochodu z kierowcą + obciążenie 300 kg,  $p = 1.5 \text{ bar}$  w każdym kole, hamowanie średnio intensywne: a) zależności czasowe opóźnienia samochodu oraz ciśnienia hamowania, b) przebieg czasowy obliczonego parametru  $\Sigma k$  wraz z wartością wzorcową

Przedstawione na rys 47 i 48 przebiegi hamowania to procesy o gwałtownych zmianach ciśnienia w układzie hamulcowym. Ich wpływ na gwałtowne zmiany prędkości kół i samochodu był dodatkowo potęgowany względem przebiegów o podobnym charakterze, przedstawionych na rys. 45 i 46, przez niewielką prędkość początkową hamowania. Warunki zmiennego w czasie ciśnienia hamowania oraz dużego zakresu jego zmienności, spowodowały uzyskanie wartości  $\Sigma k$  na poziomie świadczącym o niezdatności omawianych przebiegów hamowania do realizacji monitora diagnostycznego hamulców w omawianej formie. Wyniki te potwierdzają, że hamowania krótkotrwałe, o dużej dynamice są trudne do bieżącego diagnozowania.



Rys. 48: Przebieg hamowania z prędkości początkowej 30 km/h, masa samochodu z kierowcą + obciążenie 300 kg,  $p = 2.0$  bar w każdym kole, hamowanie bardzo intensywne: a) zależności czasowe opóźnienia samochodu oraz ciśnienia hamowania, b) przebieg czasowy obliczonego parametru  $\Sigma k$  wraz z wartością wzorcową

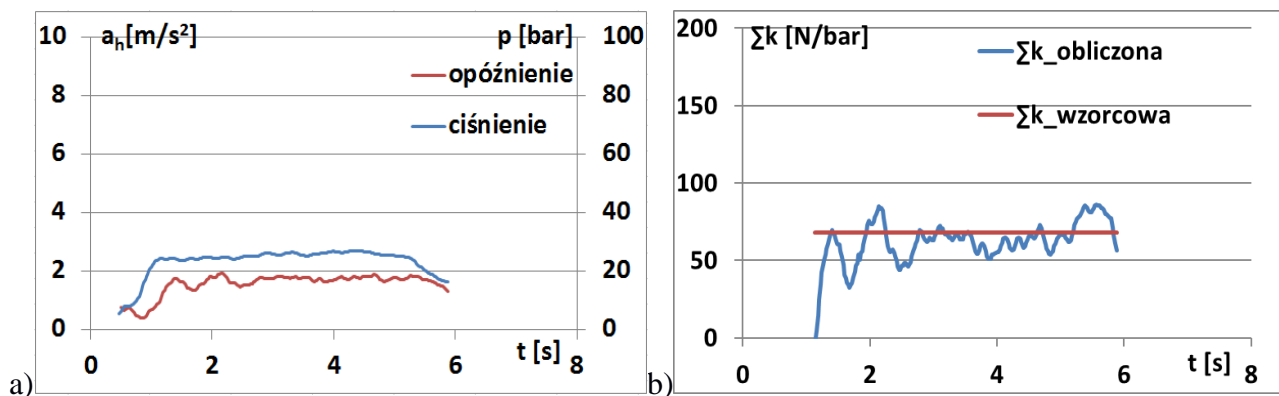
W przypadku przedstawionym na rys. 49 mamy do czynienia z ustaloną wartością ciśnienia przez czas około 3 sekund w procesie hamowania. Warunki te, pomimo niewielkiej intensywności hamowania, zapewniły niewielkie różnice między wzorcową a uzyskanymi wartościami  $\Sigma k$  w części procesu hamowania, która charakteryzowała się najbardziej ustalonym przebiegiem ciśnienia i opóźnienia hamowania.



Rys. 49: Przebieg hamowania z prędkości początkowej 50 km/h, masa samochodu z kierowcą, bez dodatkowego obciążenia,  $p = 2.0$  bar w każdym kole, hamowanie mało intensywne: a) zależności czasowe opóźnienia samochodu oraz ciśnienia hamowania, b) przebieg czasowy obliczonego parametru  $\Sigma k$  wraz z wartością wzorcową

Przedstawiony na rys. 50 przypadek hamowania mało intensywnego, z prędkości 30 km/h zapewnia dobrą dokładność działania monitora diagnostycznego. W omawianym procesie hamowania występuje niewielka zmienność opóźnienia pojazdu. Jego wartości, mimo że relatywnie niewielkie, jednak wyraźnie przekraczają wartości opóźnienia hamowania silnikiem. Warunki te są wystarczającymi dla uzyskania efektywności działania monitora diagnostycznego na wystarczającym diagnostycznie poziomie. Średni błąd względny odwzorowania wzorcowej wartości  $\Sigma k$  wynosi około 8 %.



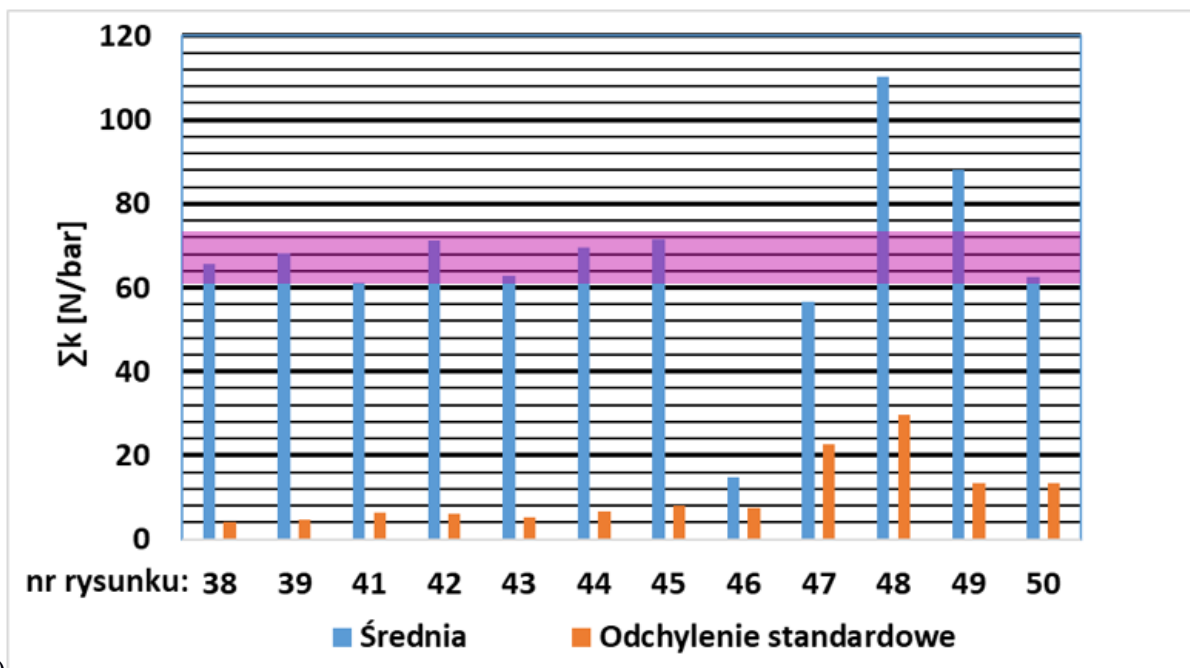


Rys. 50: Przebieg hamowania z prędkości początkowej 30 km/h, masa samochodu z kierowcą, bez dodatkowego obciążenia,  $p = 2,0$  bar w każdym kole, hamowanie mało intensywne: a) zależności czasowe opóźnienia samochodu oraz ciśnienia hamowania, b) przebieg czasowy obliczonego parametru  $\Sigma k$  wraz z wartością wzorcową

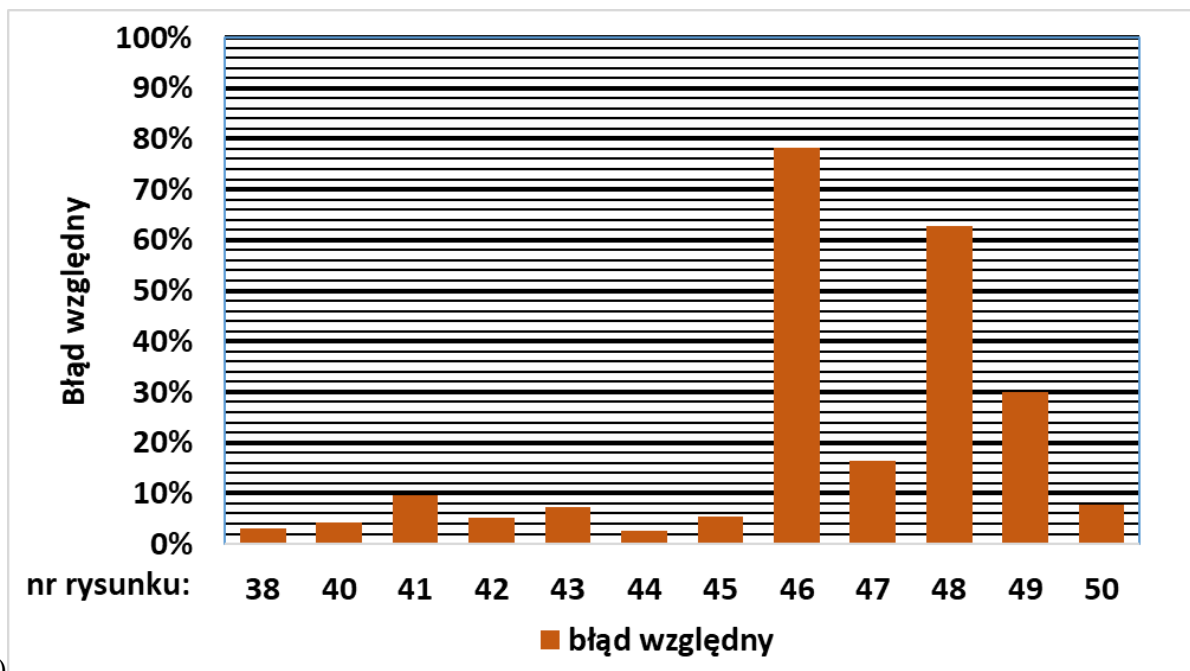
#### 7.4. Wnioski z badań monitora diagnostycznego całości układu hamulcowego

Przedstawione w poprzednim punkcie wyniki badań dotyczą hamulców w stanie sprawności. Wobec tego faktu parametr  $\Sigma k$  obliczony na podstawie wyników badań powinien być zgodny z wartością wzorcową. W badaniach drogowych występują liczne zakłócenia, które tą zgodność naruszają.

Na rys. 51 a) dokonano zestawienia średnich wartości parametru  $\Sigma k$  oraz jego odchyłeń standardowych w procesach hamowania, wykorzystanych do analizy działania monitora diagnostycznego całości układu hamulcowego. Na rys. 52 b) przedstawiono średnie wartości błędu wyznaczenia parametru  $\Sigma k$  w stosunku do wartości wzorcowej, wyznaczonej z wykorzystaniem stanowiska rolkowego. Pole na rys. 51, oznaczone kolorem różowym, odzwierciedla tolerancję  $\pm 10\%$  dla średnich  $\Sigma k$  względem wzorcowej wartości tego parametru. Jest to zakres tolerancji odpowiadający dopuszczalnej różnicy współczynnika tarcia fabrycznie nowych okładzin ciernych [44]. Zestawienie średnich wartości opóźnienia hamowania, ich odchyłeń standardowych w poszczególnych procesach hamowania (rys. 52) pozwala na analizę zależności między intensywnością hamowania, a niepewnością działania monitora diagnostycznego.

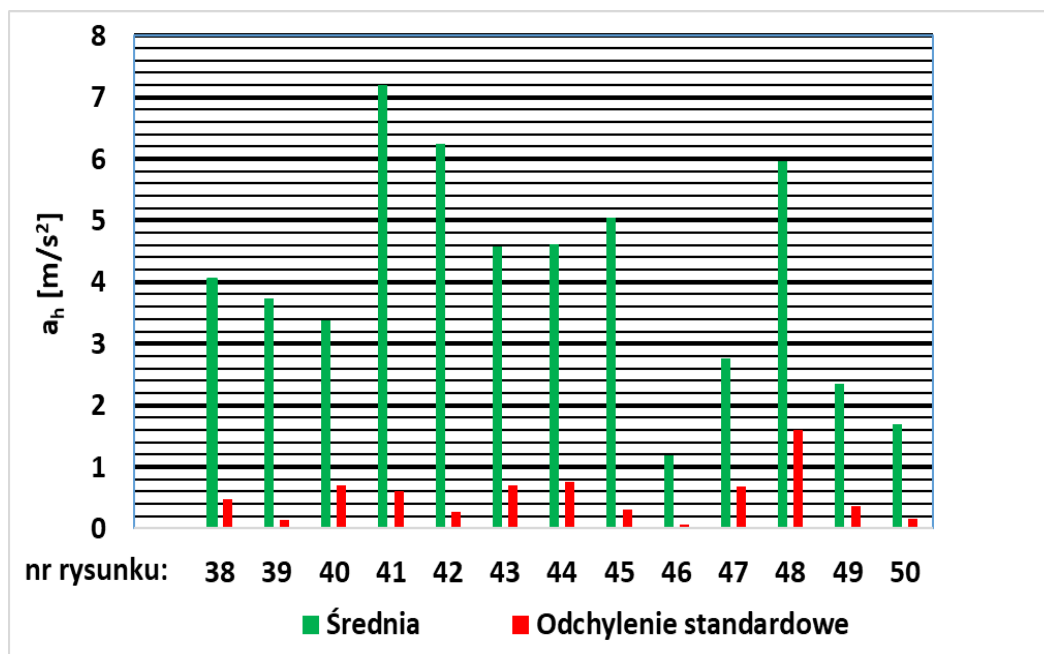


a)



b)

Rys. 51: Średnie wartości  $\Sigma k$  oraz odchylenia standardowe  $\Sigma k$  dla wyników działania monitora diagnostycznego, przedstawionych na odpowiednich rysunkach w pracy: a) średnie wartości  $\Sigma k$  oraz odchylenia standardowe  $\Sigma k$ , b) średnie wartości błędu względnego  $\Sigma k$



Rys. 52: Średnie wartości opóźnienia samochodu  $a_h$  oraz jego odchylenia standardowego dla procesów hamowania, przedstawionych na odpowiednich rysunkach w pracy

Większość z przeanalizowanych przebiegów hamowania, przeprowadzanych w różnorodnych warunkach, cechuje średnia wartość błędu względnego parametru  $\sum k$  na poziomie nie przekraczającym 10%. Najmniejszą średnią wartością opóźnienia hamowania spośród hamowań, dla których uzyskano średnią wartość  $\sum k$  różniącą się o mniej niż 10% względem wartości wzorcowej, uzyskano dla procesu z rysunku 50. Wynosi ona około  $1,7 \text{ m/s}^2$ . Ten proces hamowania cechował się ponadto jedną z najmniejszych średnich wartości odchylenia standardowego opóźnienia hamowania (rys. 52). Było to hamowanie bez zakłóceń pochodzących od silnika spalinowego (przy włączonym sprzęgle).

Z kolei średnia wartość opóźnienia hamowania dla procesu na rys. 46, wynosząca około  $1,2 \text{ m/s}^2$ , nie pozwoliła na zapewnienie akceptowalnej dokładności działania monitora diagnostycznego, mimo niewielkiej, w tym przypadku, wartości odchylenia standardowego opóźnienia. Jest to spowodowane zbyt małymi różnicami uzyskiwanych w omawianym procesie hamowania opóźnień od wartości opóźnienia hamowania wyłącznie momentem hamującym silnika pojazdu badawczego. Wobec tych faktów należy stwierdzić, że średnie opóźnienie ustalonego procesu hamowania, dla którego możliwa jest diagnostyka hamulców powinno wynosić nie mniej niż  $2 \text{ m/s}^2$ . Zastosowanie kryterium średniego opóźnienia hamowania do rozpoznawania procesów hamowania, dla których możliwe jest efektywne zastosowanie monitora diagnostycznego układu hamulcowego, wymaga określonej liczby danych pomiarowych (czasu hamowania) w celu miarodajnego obliczania średnich opóźnień. Powoduje to ryzyko, że część krótkotrwałych procesów hamowania, występujących w warunkach eksploatacji samochodu, będzie procesami niezdatnymi dla oceny stanu hamulców.

Przebiegi hamowania, dla których błąd względny wyznaczenia  $\sum k$  nie przekracza 10 % to przebiegi o różnorodnych wartościach średniego opóźnienia hamowania (od ok 2 m/s<sup>2</sup> do ok 7 m/s<sup>2</sup>). Ponadto, są to procesy przeprowadzane w różnych warunkach, związanych z obciążeniem pojazdu oraz ciśnieniem pompowania kół. Fakty te świadczą pozytywnie o możliwości wykorzystania monitora diagnostycznego w różnych warunkach procesu hamowania.

Wśród przeanalizowanych procesów hamowania występują przypadki, gdy średnie opóźnienie samochodu przekracza 2 m/s<sup>2</sup>, lecz średnia wartość  $\sum k$  różni się względem wartości wzorcowej w stopniu większym niż 10%. W różnych przypadkach jest to spowodowane odmiennymi czynnikami. Procesy hamowania na rys. 46 oraz 47 to procesy krótkotrwałe, o znacznej zmienności opóźnienia hamowania. Świadczą o tym relatywnie duże wartości odchylenia standardowego opóźnienia hamowania w tych przypadkach.

Przebiegi hamowania, dla których średni błąd względny wyznaczenia  $\sum k$  nie przekracza 10 % to przebiegi o różnorodnych wartościach średniego opóźnienia hamowania (od 1,7 m/s<sup>2</sup> do ok 7 m/s<sup>2</sup>). Ponadto, są to procesy przeprowadzane w różnych warunkach, związanych z obciążeniem pojazdu oraz ciśnieniem pompowania kół. Fakty te świadczą pozytywnie o możliwości wykorzystania monitora diagnostycznego w różnych warunkach procesu hamowania.

Wśród przeanalizowanych procesów hamowania występują przypadki, gdy średnie opóźnienie samochodu przekracza 2 m/s<sup>2</sup>, lecz średnia wartość  $\sum k$  różni się względem wartości wzorcowej w stopniu większym niż 10%. W różnych przypadkach jest to spowodowane odmiennymi czynnikami. Procesy hamowania na rys. 46 oraz 47 to procesy krótkotrwałe, o znacznej zmienności opóźnienia hamowania. Świadczą o tym relatywnie duże wartości odchylenia standardowego opóźnienia hamowania w tych przypadkach.

Oprócz kryterium średniej wartości opóźnienia, kolejnym kryterium w celu stwierdzenia zdatości danego procesu hamowania do diagnostyki hamulców jest rozrzut opóźnienia. Liczbowe sformułowanie tego kryterium (na przykład jako maksymalnej, dopuszczalnej wartości odchylenia standardowego) jest zagadnieniem trudnym ze względu na zmienność procesów hamowania. Ten problem podjęto poprzez wybór punktów danych z procesu hamowania, które charakteryzują się jak najmniejszymi różnicami ciśnienia hamowania i podział ich na klasy. Jest to możliwe do zrealizowania poprzez sieć neuronową uczoną w procesie uczenia nienadzorowanego (bez nauczyciela). Zaletą jej zastosowania jest brak konieczności sztywnego zdefiniowania przedziałów wartości ciśnienia w poszczególnych klasach. Przedziały te są dostosowywane do zmienności ciśnienia w bieżącym procesie hamowania. Fakt ten ma szczególne znaczenie ponieważ eksploatacyjne procesy hamowania samochodu charakteryzują się różnorodnymi przebiegami ciśnienia w układzie hamulcowym.

Wobec znacznego rozrzutu wartości parametru  $\sum k$  przeprowadzono analizę poziomu istotności wyznaczenia tego parametru za pomocą testu t-Studenta [45].

$$t = \frac{\overline{\sum k} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (64b)$$

gdzie:

$t$ - wynik testu t-Studenta,

$\overline{\sum k}$ - średnia  $\sum k$  dla  $p$  wyników badań,

$\mu$ - wartość oczekiwana (wzorcową wartość  $\sum k$ )

$s$ - odchylenie standardowe  $\sum k$  dla  $p$  wyników badań,

$n$ - liczba stopni swobody;  $n = 1 - p$ .

Powyższy wzór został wykorzystany aby sprawdzić, czy różnice parametru  $\overline{\sum k}$  względem wartości wzorcowej są istotnymi statystycznie dla poziomu istotności  $\alpha = 0,05$ . Przyjęto wartości średnie parametru  $\sum k$  dla 13-tu procesów hamowania, które przedstawiono na rys. 51 a). Stąd ilość stopni swobody wynosiła  $13-1=12$ . Dla tej ilości stopni swobody oraz dla  $\alpha = 0,05$  wartość  $t$  odczytana z tabeli rozkładu  $t$  Studenta, wynosi 2,1788 [45]. Natomiast obliczony z zastosowaniem wzoru 64 b) wynik testu  $t$  Studenta wynosi mniej niż 1. Zatem różnica wartości średniej  $\sum k$  z 13-tu pomiarów względem wzorcowej nie jest istotna statystycznie dla  $\alpha = 0,05$ .

W kolejnym kroku analizy statystycznej wykonano test  $t$  Studenta dla 9 procesów hamowania, dla których wartości  $\sum k$  różniły się względem wzorca o nie więcej niż 10 %. Wówczas uzyskano wartość  $t$  wynoszącą 0,95. Oznacza ona, że dla poziomu istotności  $\alpha = 0,05$  różnice wartości średniej  $\sum k$  dla 9-ciu pomiarów względem wartości wzorcowej są statystycznie nieistotne. Test  $t$ -studenta może być pomocny do wyznaczenia ilości powtórzeń procesu hamowania do obliczenia średniej kroczącej.

Rozwiązanie monitora diagnostycznego układu hamulcowego powinno dokonywać oceny stanu hamulców na podstawie kilku kolejnych pomiarów. Ich wyniki mogą być wówczas analizowane na przykład z wykorzystaniem metody średniej kroczącej. Działanie to jest konieczne ponieważ istnieje szereg czynników (stan nawierzchni drogowej, stan cieplny hamulców, chwilowa zmiana współczynnika tarcia okładzin ciernych przykładowo na skutek kontaktu z wodą), które mogą spowodować chwilowe uzyskiwanie zbyt małych wartości parametru  $\sum k$ . Z tych powodów pojedynczy pomiar może być obciążony dużą niepewnością.

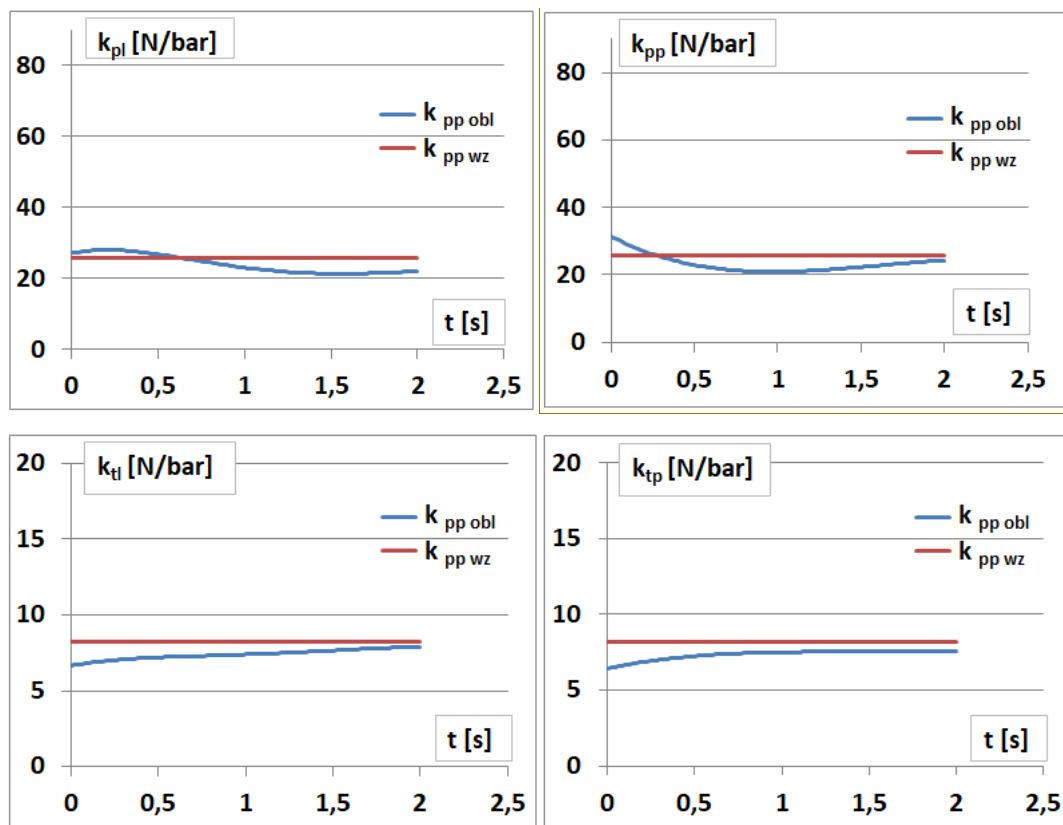
## 7.5. Monitor diagnostyczny hamulców poszczególnych kół

Kolejny etap analizy działania monitora diagnostycznego stanowi weryfikacja metodyki diagnozowania hamulców poszczególnych kół pojazdu, przedstawionej w rozdziale 5.2. W przypadku analizy działania monitora diagnostycznego dla hamulców poszczególnych kół, wybrano zakresy czasowe przebiegów hamowania, w których ciśnienie i opóźnienie hamowania zmieniają się mało dynamicznie. Dokonano analizy 6 procesów hamowania. Warunki ich realizacji przedstawiono poniżej:

- hamowanie 1: prędkość początkowa 50 km/h, masa samochodu z kierowcą bez dodatkowego obciążenia, ciśnienie pompowania kół równe 2,0 bar, hamowanie mało intensywne;
- hamowanie 2: prędkość początkowa 30 km/h, masa samochodu z kierowcą bez dodatkowego obciążenia ciśnienie pompowania kół równe 2,0 bar, hamowanie mało intensywne;
- hamowanie 3: prędkość początkowa 80 km/h, masa samochodu z kierowcą bez dodatkowego obciążenia, ciśnienie pompowania kół równe 2,0 bar, hamowanie mało intensywne;
- hamowanie 4: prędkość początkowa 80 km/h, dodatkowe obciążenie samochodu 300 kg, ciśnienie pompowania kół równe 2,0 bar, hamowanie mało intensywne;
- hamowanie 5: prędkość początkowa 80 km/h, brak dodatkowego obciążenia pojazdu ciśnienie pompowania kół równe 2,0 bar, hamowanie intensywne;
- hamowanie 6: prędkości początkowej 80 km/h, dodatkowe obciążenie pojazdu 300 kg, ciśnienie pompowania kół równe 2,0 bar, hamowanie intensywne.

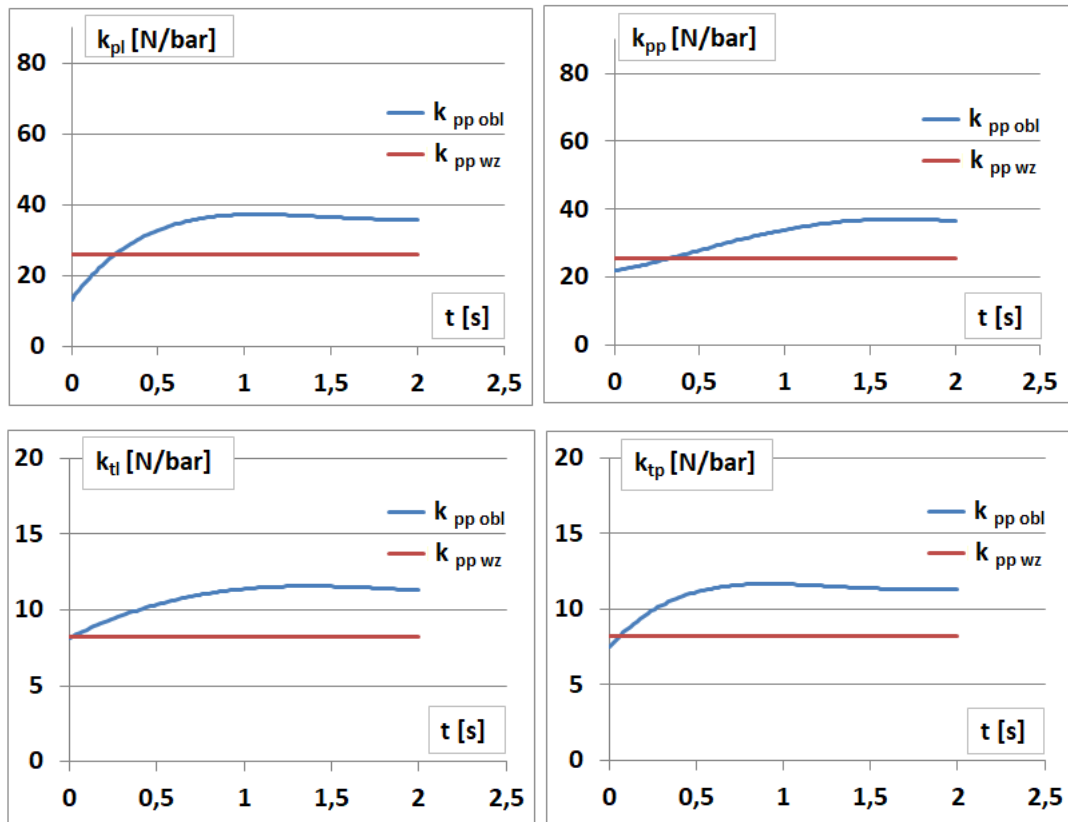
Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń parametrów diagnostycznych hamulców poszczególnych kół pojazdu dla wybranych procesów hamowania (rys. 53- 57).

W przypadku realizacji monitora diagnostycznego hamulców poszczególnych kół dla łagodnego hamowania, nieobciążonego dodatkową masą pojazdu, z prędkości 50 km/h (rys. 53) dokładność działania monitora diagnostycznego hamulców poszczególnych kół jest wystarczająca diagnostycznie. Średnie wartości parametrów diagnostycznych kół pojazdu wynoszą dla koła lewego tylnego, lewego przedniego, prawego tylnego oraz prawego przedniego odpowiednio 7,39, 23,98, 7,34 oraz 23,27 N/bar co stanowi różnice względem wartości wzorcowych (wyznaczonych w rozdziale 6.2) tych parametrów na poziomie kilku procent.



Rys. 53. Wartości parametru diagnostycznego poszczególnych kół dla procesu hamowania nr 1

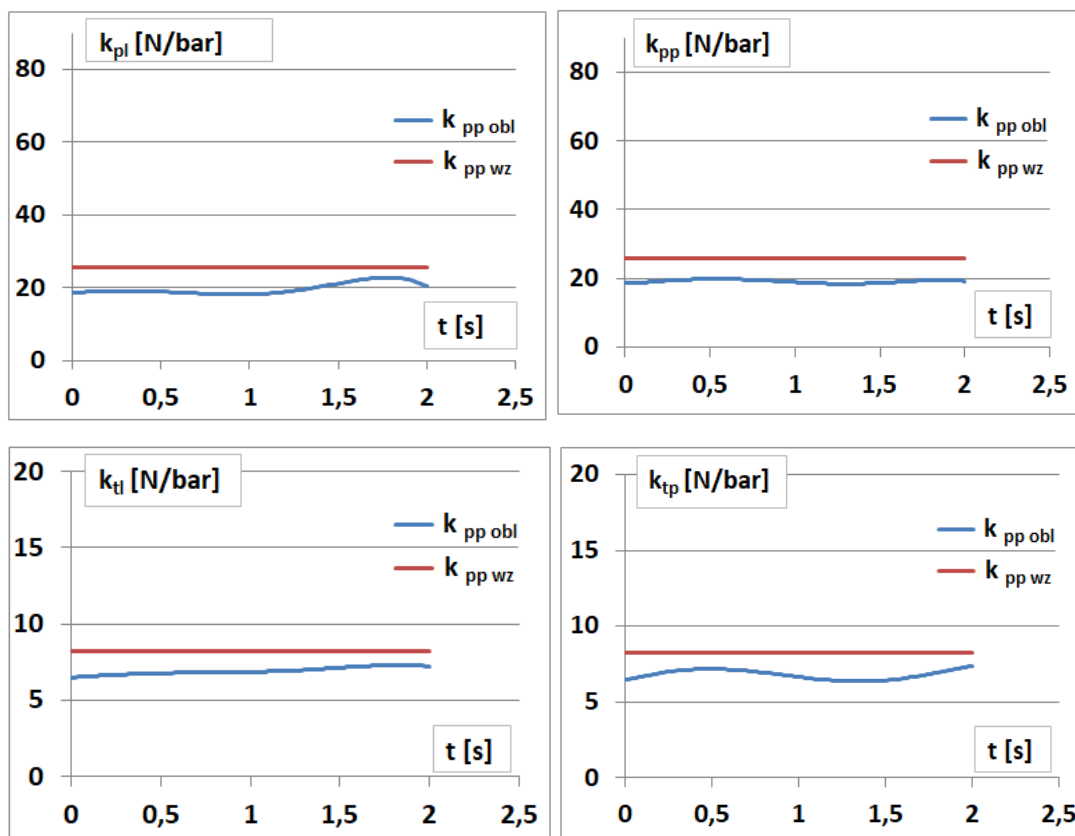
W warunkach hamowania z małą prędkością początkową wyniki obliczeń parametrów diagnostycznych hamulców poszczególnych kół różnią się znacznie od wzorcowych wartości tych parametrów. Różnice uzyskanych wartości parametrów diagnostycznych hamulców kół względem wartości wzorcowych są w analizowanym procesie hamowania większe niż w przypadku hamowania odbywającego się od większej prędkości początkowej (przedstawionego na rys.53). Ich względna różnica w stosunku do wartości wzorcowych (zdefiniowana wzorem 65) wynosi około 30 %. Ponadto przedstawione na rys. 54 przebiegi parametrów cechują się znacznym zawyżeniem względem wzorców.



Rys. 54. Wartości parametru diagnostycznego poszczególnych kół dla procesu hamowania nr 2

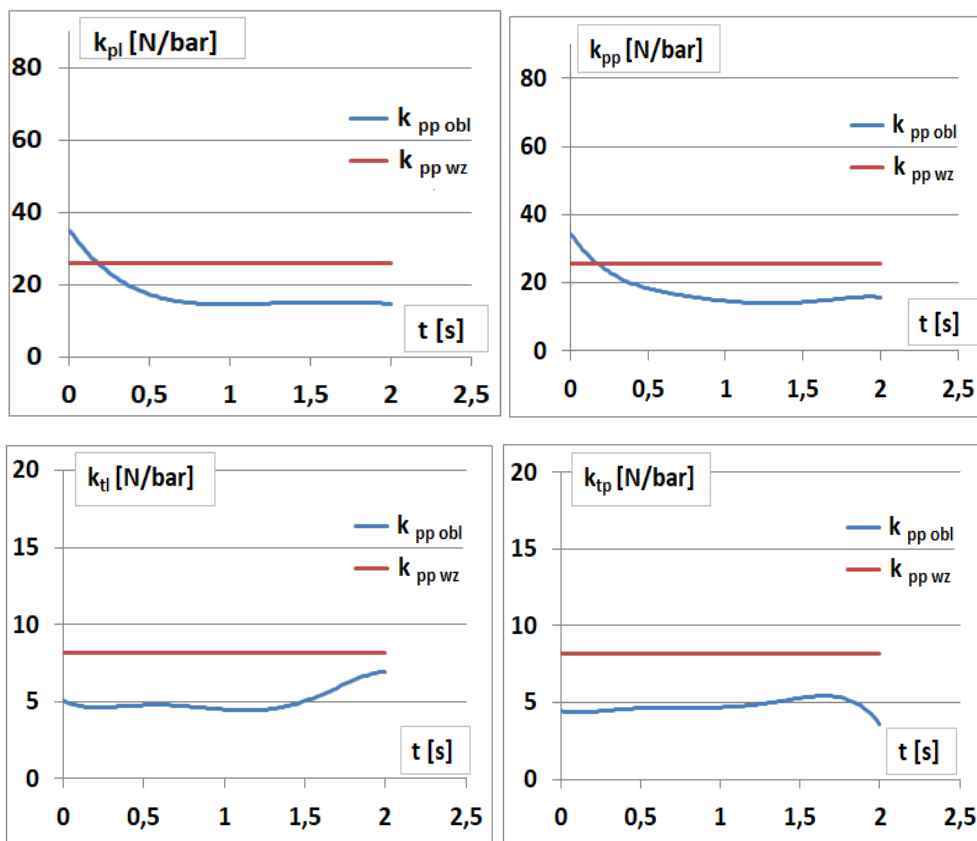
Przedstawione na powyższym rys. 55 wyniki działania monitora diagnostycznego hamulców poszczególnych kół wskazują na średnie różnice uzyskiwanych parametrów diagnostycznych względem wartości wzorcowych na poziomie 20 %. Jest to wartość zbliżona do tej różnicy dla monitora diagnostycznego całości układu hamulcowego, realizowanego dla tego samego procesu hamowania.



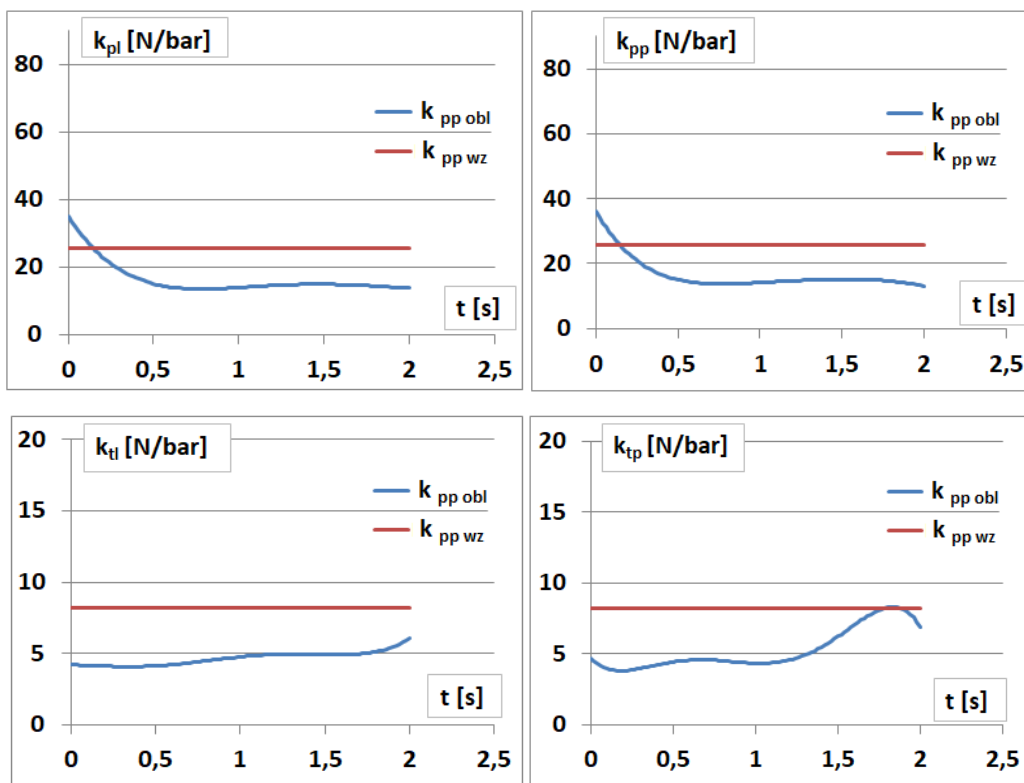


Rys. 55. Wartości parametru diagnostycznego poszczególnych kół dla procesu hamowania nr 3

Wyniki działania monitora diagnostycznego, przedstawione na rys 56 oraz 57 cechują się znacznym podobieństwem, świadczącym o niewielkim zróżnicowaniu obu przedstawionych procesów. Względne różnice między średnimi wartościami uzyskanych parametrów diagnostycznych a ich wartościami wzorcowymi wynoszą około 35 % i są znacznie większe niż w przypadku monitora diagnostycznego całości układu hamulcowego, realizowanego dla tych samych procesów hamowania. Monitor układu hamulcowego jako całości osiąga dla omawianych procesów hamowania średnie wartości błędu względnego wyznaczania wartości  $\sum k$  na poziomie nieprzekraczającym 7 %.



Rys. 56. Wartości parametru diagnostycznego poszczególnych kół dla procesu hamowania nr 4



Rys. 57. Wartości parametru diagnostycznego poszczególnych kół dla procesu hamowania nr 5

## 7.6. Wnioski z badań monitora diagnostycznego hamulców poszczególnych kół

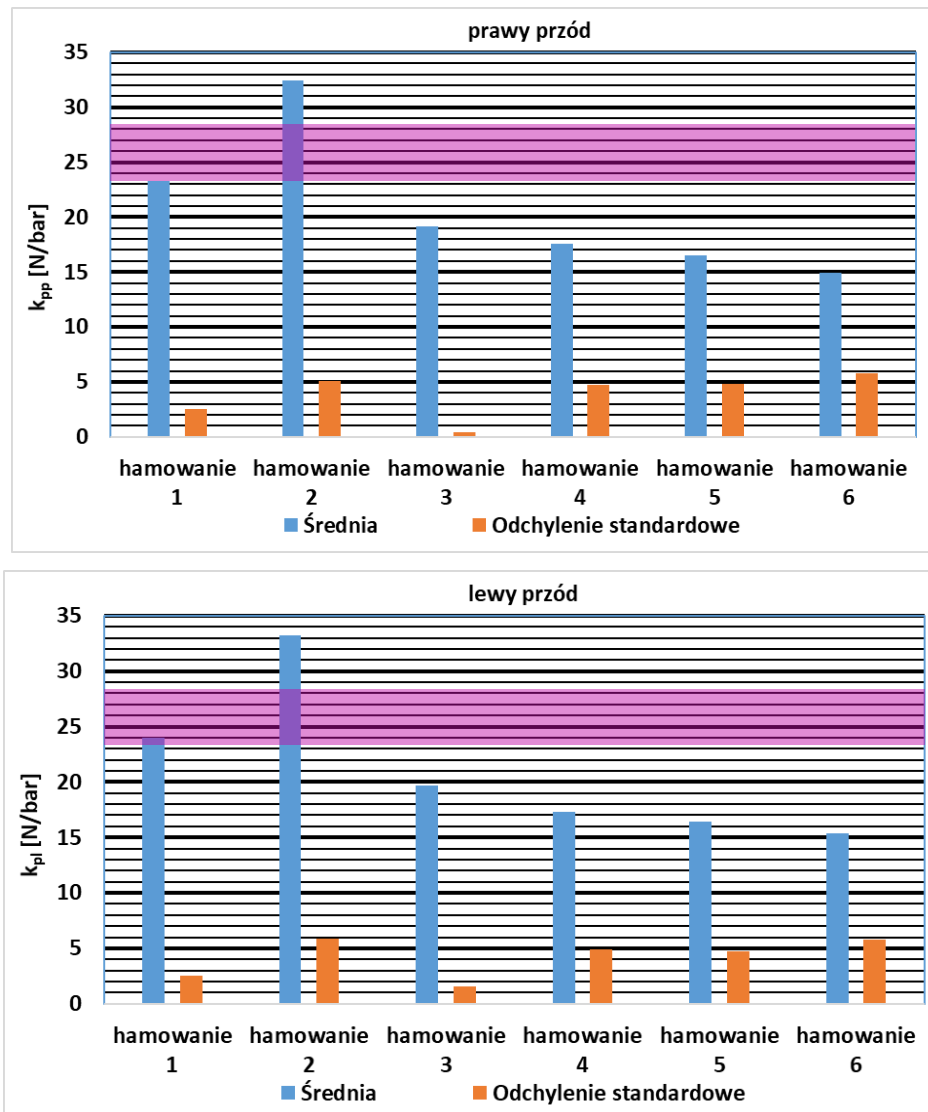
Podobnie jak w przypadku monitora diagnostycznego całości układu hamulcowego, również w przypadku monitora diagnostycznego hamulców poszczególnych kół dokonano zestawienia średnich wartości parametru  $\sum k$  oraz wartości jego odchyień standardowych w wykorzystanych w analizie procesach hamowania. Również analogicznie wobec monitora całości układu hamulcowego przedstawiono średnie wartości opóźnienia hamowania pojazdu oraz wartości odchylenia standardowego tej wielkości w każdym z procesów hamowania.

Wśród wyników badań, znajdują się takie, które odbiegają od wartości wzorcowych parametrów  $k_i$  w stopniu znacznie większym niż dopuszczalny. Prawdopodobną przyczyną tego faktu są zakłócenia zastosowanej metody wyznaczania poślizgu kół oraz występujące podczas procesu hamowania zmiany przyczepności nawierzchni.

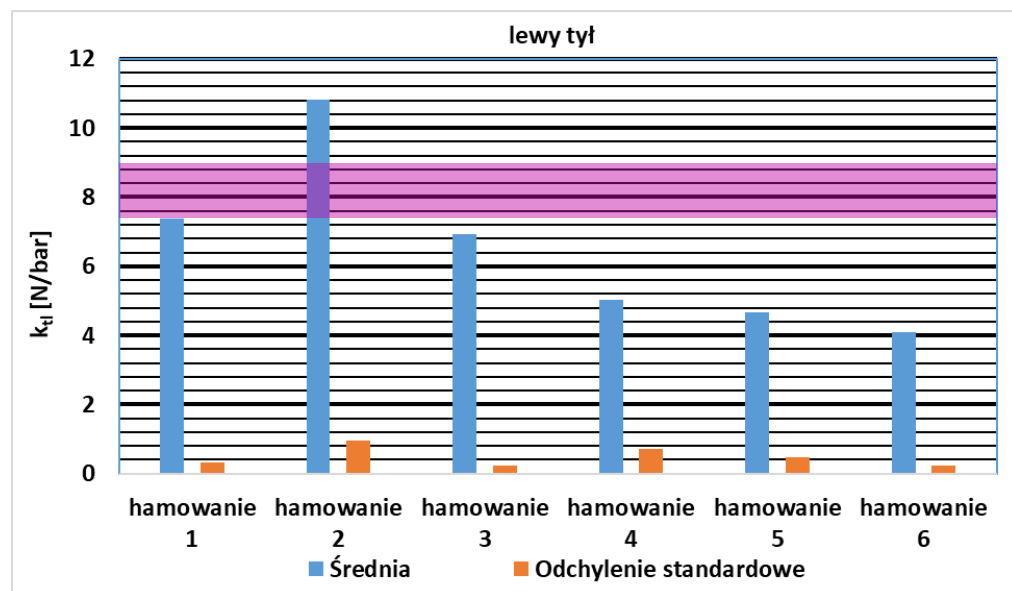
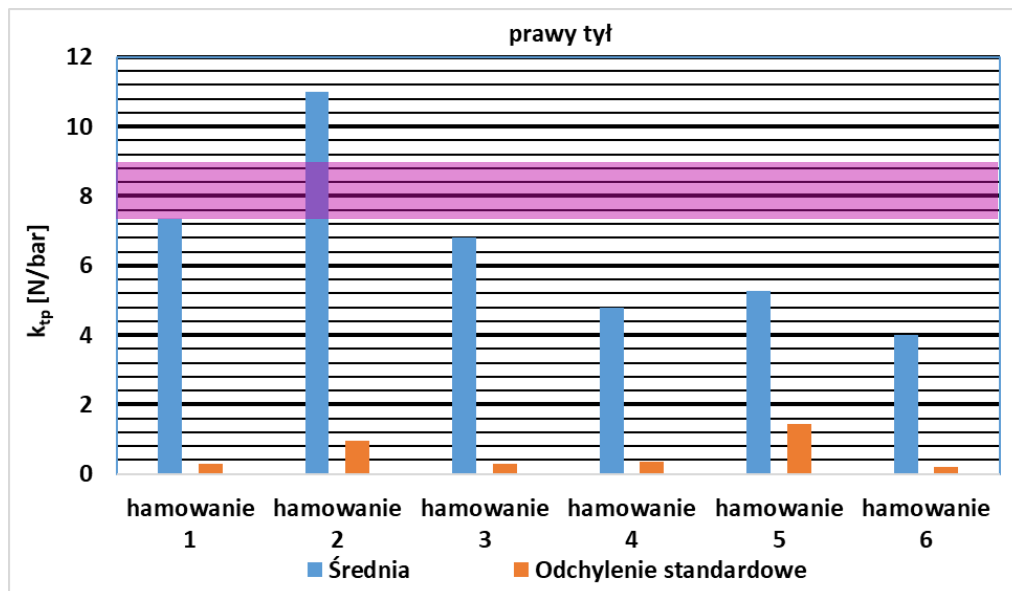
Analogicznie jak w przypadku monitora diagnostycznego całości układu hamulcowego, różowymi polami na rys.58 i 59 oznaczono obszar wartości parametru  $k_i$  w zakresie  $\pm 10\%$  względem jego wartości wzorcowej. Jedynie w przypadku przebiegu hamowania nr 1 uzyskano błąd średniej wartości  $k_i$  względem wartości wzorcowej na poziomie mniejszym niż  $10\%$ . Jest to proces hamowania z wartością średniego opóźnienia na poziomie ok  $2,4 \text{ m/s}^2$ . Zatem o wartości relatywnie niewielkiej ale zauważalnie większej niż średnie opóźnienia uzyskiwane w procesach hamowania wyłącznie poprzez moment hamujący silnika spalinowego pojazdu badawczego. Ponadto proces ten ma charakter ustalony, o czym świadczy niewielka wartość odchylenia standardowego opóźnienia hamowania w porównaniu z innymi, przeanalizowanymi procesami hamowania (rys. 61). W przypadku procesów hamowania o większych wartościach średnich opóźnienia hamowania oraz jego odchyień standardowych niż w przypadku procesu hamowania nr 1 obserwujemy pogorszenie efektywności działania monitora hamulców poszczególnych kół. Procesy te (hamowania nr 3, 4, 5 i 6) charakteryzują się znacznymi, w odniesieniu do całości procesów hamowania, wartościami średniego opóźnienia hamowania oraz jego odchylenia standardowego. W przypadku tych procesów hamowania błąd względny  $k_i$  przekracza  $20\%$  (rys. 60).

Pierwszą z możliwości zwiększenia dokładności działania monitora diagnostycznego poszczególnych kół jest dopracowanie metodyki wyznaczania parametrów pojazdu oraz warunków procesu hamowania. Monitor diagnostyczny hamulców poszczególnych kół pojazdu wymaga większej liczby parametrów w porównaniu do monitora całości układu hamulcowego. Przykładem jest konieczność obliczania poślizgu obwodowego kół i przyjęcia zależności siły wzdłużnej, działającej na styku koła z jezdnią od jego poślizgu obwodowego, rzutującej w istotny sposób na dokładność działania monitora. Znaczne zawyżenie wartości parametrów diagnostycznych hamulców poszczególnych kół w przypadku procesu hamowania nr 3 może wynikać z niedokładności

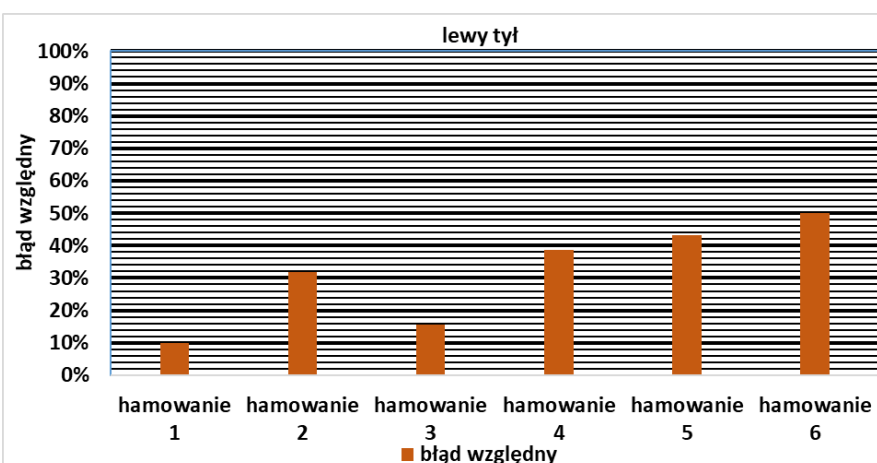
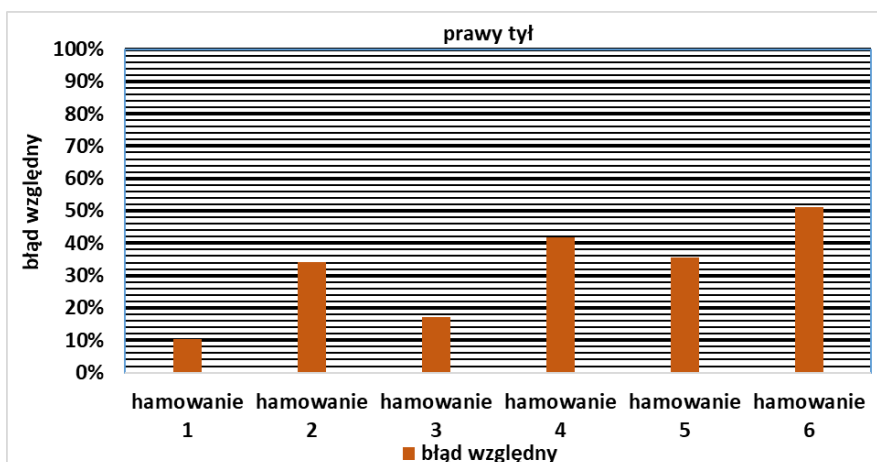
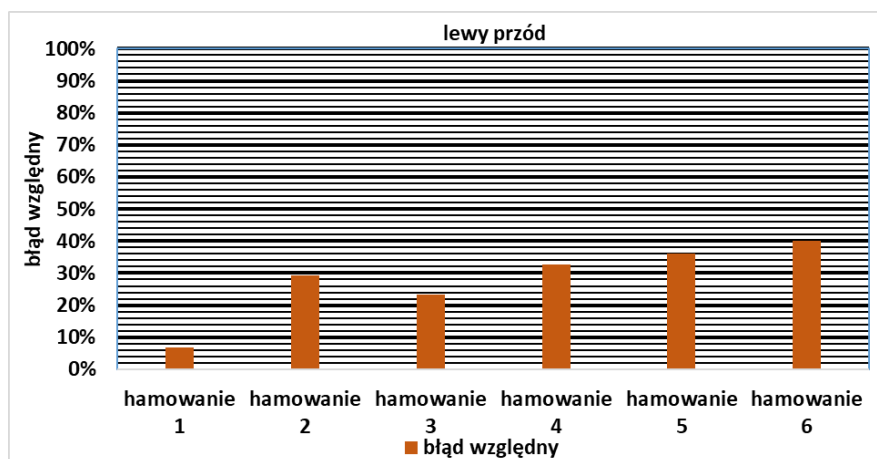
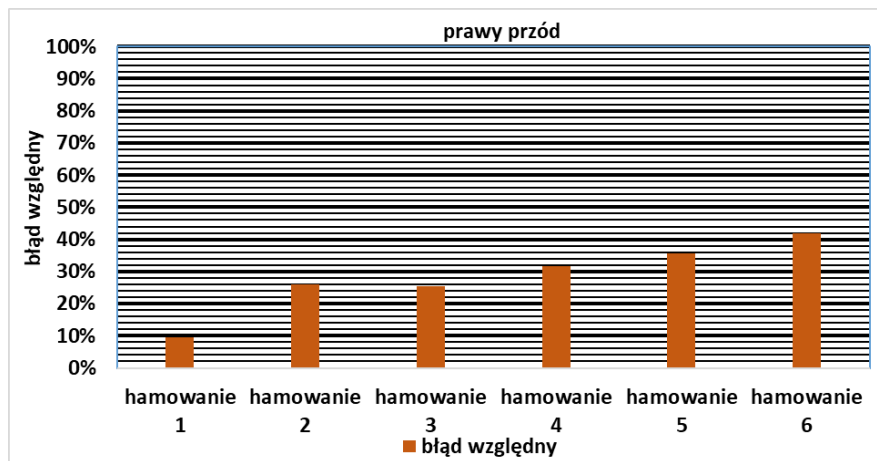
wyznaczenia ich poślizgu w warunkach, w których ma on niewielkie wartości. Warunkami tymi są, występujące w omawianym procesie hamowania, niewielkie opóźnienia (średnio około  $1,6 \text{ m/s}^2$ ) oraz niewielka prędkość początkowa (30 km/h).



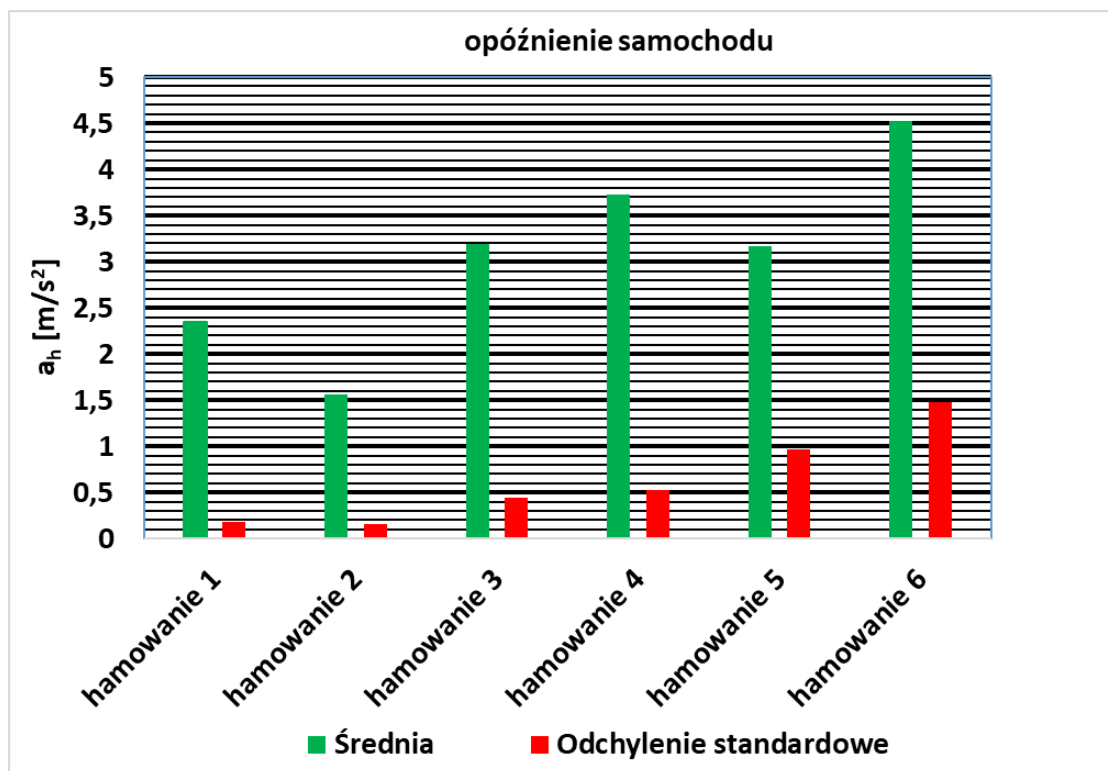
Rys. 58: Średnie wartości  $k_i$  oraz odchylenia standardowe  $k_i$  dla wyników działania monitora diagnostycznego hamulców kół przednich



Rys. 59: Średnie wartości  $k_i$  oraz odchylenia standardowe  $k_i$  dla wyników działania monitora diagnostycznego hamulców kół tylnych



Rys. 60. Zestawienie błędów wyznaczenia parametru  $k_i$  w analizowanych procesach hamowania



Rys. 61: Średnie wartości opóźnienia hamowania samochodu oraz jego odchylenia standardowego dla procesów hamowania, wykorzystanych do obliczania parametru  $k_i$

W większości analiz występuje niższa wartość parametru  $k_i$  obliczonego na podstawie wyników badań drogowych w stosunku do wzorca. Może to wskazywać, że wzorec ustalony w warunkach badań stanowiskowych ma za dużą wartość. Taki wniosek wynika faktu, że przy bardzo małych prędkościach hamowania na stanowisku rolkowym współczynnik tarcia okładzin hamulcowych jest większy niż przy dużych prędkościach względnych [44]. Kolejną przyczyną niepewności obliczenia parametru  $k_i$  w badaniach drogowych jest duża czułość tego parametru na przyjętą charakterystykę ogumienia  $\mu(s)$ . Ten problem w praktycznym zastosowaniu diagnostyki można rozwiązać dostrajając charakterystykę  $\mu(s)$  do opon stosowanych w danym modelu pojazdu. Należy jednak pamiętać, że charakterystyka opony może się zmieniać w okresie eksploatacji co ma duży wpływ na obliczenia siły wzdłużnej, działającej na styku koła z jezdnią ( $F_x$ ) oraz parametru  $k_i$ .

## 8. Monitor układu hamulcowego, wykorzystujący sztuczne sieci neuronowe

### 8.1. Wprowadzenie- podstawy tworzenia sieci neuronowych

Ponieważ w eksploatacji samochodu występuje wiele krótkotrwałych procesów hamowania, dla których ocena stanu hamulców przez monitor diagnostyczny jest niepewna, podjęto próbę zastosowania metod sztucznej sieci neuronowej do rozszerzenia informacji diagnostycznej z takich przebiegów hamowania. W tym celu zastosowano sieć neuronową opartą na modelu nieliniowej autoregresji.

Oprócz krótkotrwałości, eksploatacyjne procesy hamowania cechują się często dużą dynamiką, która również jest okolicznością utrudniającą efektywne diagnozowanie hamulców z zastosowaniem monitora diagnostycznego w formie analitycznej. Dlatego zastosowano metodykę wyboru danych o podobnych do siebie wartościach ciśnienia w układzie hamulcowym wraz z odpowiadającymi wartościami opóźnienia kół i samochodu. Następnie, wybrane, możliwie najbardziej podobne do siebie wartości ciśnienia hamowania wraz z wartościami opóźnienia kół i samochodu wykorzystano do obliczeń parametrów diagnostycznych układu hamulcowego. Omawianą metodykę wyboru podobnych do siebie danych oparto na sieci neuronowej, uczonej w sposób nienadzorowany - samoorganizującym się odwzorowaniu (SOM). Uczenie tego rodzaju sieci neuronowej nie wymaga wprowadzania zbioru uczącego. Sieć ta dokonuje podziału zbioru danych wejściowych na klasy, grupujące podobne do siebie elementy. Liczba klas jest definiowana na etapie tworzenia modelu sieci neuronowej. W zastosowaniu do podziału danych pochodzących z procesów hamowania została ona ustalona na 4. Korzyść, wynikająca z zastosowania sieci neuronowej SOM, to brak konieczności liczbowego ustalenia granic poszczególnych klas. Granice te są dobierane przez algorytm SOM dla bieżącego procesu hamowania na podstawie danych, związanych z tym procesem. Zasadniczym problemem, związanym z omawianą formą zastosowania sieci neuronowej jest wybór tej klasy, dla której wyznaczone wartości parametrów diagnostycznych układu hamulcowego będą porównywane z ich wartościami wzorcowymi. Próba rozwiązania tego problemu została podjęta w analizie przeprowadzonej w rozdziale 8.2.

Sztuczna sieć neuronowa, jako struktura obliczeniowa, opiera się w swojej budowie na elementach zwanych neuronami, analogicznie jak w przypadku neuronowej sieci biologicznej [1]. Z punktu widzenia działania sztucznej sieci neuronowej, pojedynczy neuron jest swoistym przetwornikiem sygnałów wejściowych na wyjściowy. Może on posiadać wiele wejść lecz zawsze jedno wyjście [2]. Sygnałami wejściowymi w przypadku monitora diagnostycznego układu hamulcowego są wielkości fizyczne związane z procesem hamowania samochodu, wyposażonego w hydrauliczny układ hamulcowy (opóźnienie działające na samochód i jego poszczególne koła oraz ciśnienie w układzie hamulcowym). Sztuczne neurony przemnażają wartości sygnałów



wejściowych przez współczynniki wag. Wagi neuronów to parametry opisujące ich właściwości, a co za tym idzie działanie podczas rozwiązywania zadania, stawianego sieci neuronowej [3]. Przykładowo, diagnoza stanu technicznego danego obiektu na podstawie wartości sygnałów wejściowych może być różna, gdy do diagnostyki wykorzystamy sieci neuronowe z neuronami o różnych wagach. Wagi dla wszystkich neuronów, wchodzących w skład sieci wyznaczone są w procesie uczenia. Dobór wag ma na celu dopasowanie charakteru działania sieci neuronowej do specyfiki problemu, który stawiany jest sieci neuronowej. Odnosząc się do zagadnienia diagnostyki stanu technicznego obiektu, uczenie sieci neuronowej zapewnia jednoznaczność diagnozy.

Po przemnożeniu przez odpowiednie współczynniki wagowe, sygnały wejściowe w neuronie są sumowane w celu wyznaczenia potencjału membranowego neuronu, opisanego wzorem [1]:

$$\phi = \sum_{i=1}^m w_i u_i = w^T u \quad (65)$$

gdzie:

$w$ - wektor współczynników wagowych,

$u$ - wektor sygnałów wejściowych,

$(*)^T$ - operator transpozycji,

$m$ - liczba wejść danego neuronu.

Potencjał neuronu  $\Phi$  zostaje przetwarzany za pomocą bloku aktywacji  $F$ , którego działanie definiuje funkcja aktywacji [1]. Funkcja aktywacji opisuje sposób wyznaczania wartości sygnału wyjściowego poszczególnych neuronów [3]. Istnieje wiele rodzajów możliwych do zastosowania funkcji aktywacji [1,3].

Możliwe jest zastosowanie liniowej funkcji aktywacji. Wówczas wyjście z danego neuronu jest równe potencjałowi  $\Phi$  przemnożonemu przez zdefiniowany, stały współczynnik. Istnieje również funkcja zdefiniowana jako skok jednostkowy. Ustala ona wartość „1” na wyjściu neuronu, jeżeli potencjał  $\Phi$  przekroczy ustaloną wartość graniczną. Gdy warunek ten nie jest spełniony, wyjście neuronu przyjmuje wartość „0”. Istnieją również sigmoidalne oraz tangensoidalne funkcje aktywacji, opisane odpowiednio równaniami:

$$y = \frac{1}{1 + \exp(-\beta\phi)} \quad (66)$$

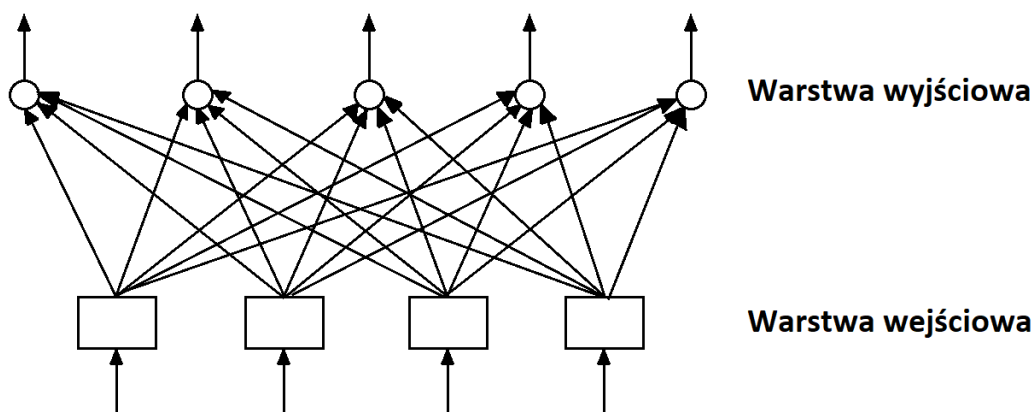
$$y = \operatorname{tgh}\left(\frac{\alpha\phi}{2}\right) = \frac{1 - \exp(-\alpha\phi)}{1 + \exp(-\alpha\phi)} \quad (67)$$

gdzie  $\alpha$  i  $\beta$  są znanymi, zadanymi parametrami [1].

Omawiane funkcje aktywacji stanowią uproszczone modele działania neuronu [1]. Nie uwzględniają one opóźnień w przepływie danych, spowodowanych dynamiką działania systemu. Również efekty synchronizacji oraz modulacji częstotliwości neuronu nie są uwzględniane [1]. Pomimo omówionych uproszczeń, opisywane funkcje aktywacji neuronów są powszechnie stosowane w zadaniach związanych z klasyfikacją obiektów.

Wyróżniane są dwa typy architektury sieci neuronowych: jednokierunkowe oraz rekurencyjne. Sieć jednokierunkowa nie umożliwia powrotu sygnału, który został przekazany z danego neuronu do kolejnego. Nie występują sprzężenia zwrotne między neuronami. Przykładami sieci jednokierunkowej są perceptron prosty oraz perceptron wielowarstwowy (rys. 62 oraz rys. 62).

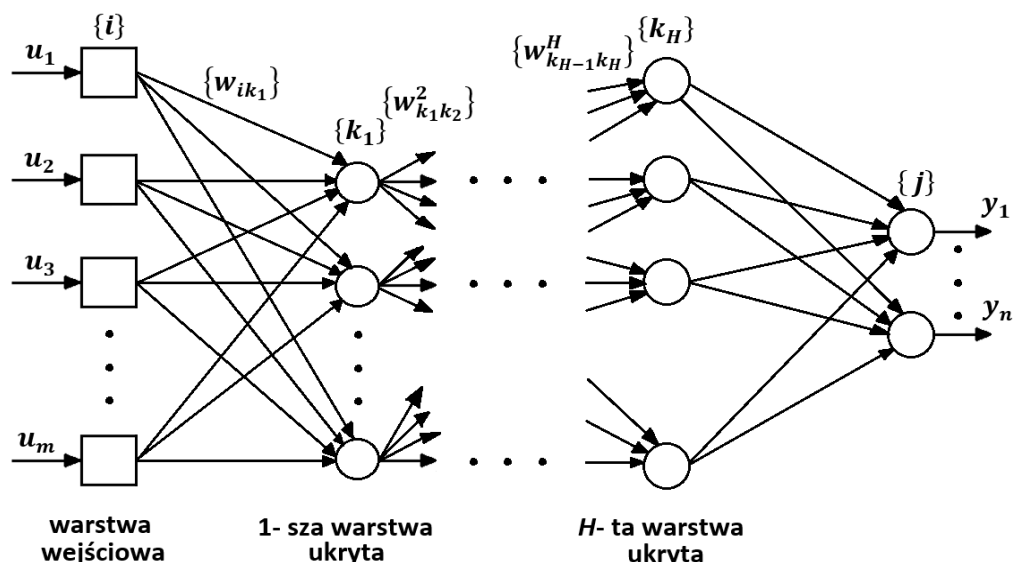
Perceptron prosty składa się z neuronów zawartych w warstwie wejściowej oraz wyjściowej. Sygnały od neuronów w warstwie wejściowej przekazywane są do neuronów w warstwie wyjściowej (rys. 62). Odwrotny przepływ sygnałów nie jest możliwy, ponadto sygnały nie mogą być przekazywane pomiędzy neuronami znajdującymi się w tej samej warstwie. Tego typu sieć została zbudowana jako układ łączący elementy elektromechaniczne oraz elektryczne w 1958 roku [1]. Układ ten stosowano do rozpoznawania liter oraz liczb.



Rys. 62 Schemat perceptronu prostego [1]

Perceptron wielowarstwowy, zbudowany jest według podobnych założeń jak w przypadku perceptronu prostego, jednakże pomiędzy warstwą wejściową a warstwą wyjściową znajdują się dodatkowe warstwy neuronów, zwane warstwami ukrytymi [1]. Schemat perceptronu wielowarstwowego przedstawiono na rys. 63, gdzie występują następujące oznaczenia :

- $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $m$  – ilość neuronów w warstwie wejściowej,
- $j = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$  – ilość neuronów w warstwie wyjściowej,
- $h = 1, 2, \dots, H$ ;  $H$  – ilość warstw ukrytych,
- $k_h = 1, 2, \dots, K_h$ ;  $K_h$  – ilość neuronów  $h$ - tej warstwy ukrytej.



Rys. 63 Schemat perceptronu wielowarstwowego [1]

Przetwarzanie sygnału w każdej warstwie perceptronu odbywa się za pomocą funkcji aktywacji  $F$  według poniższej zasady:

$$N_h\{u_h\} = F\{W^h u_h\}, h = 1, 2, 3, \quad (68)$$

gdzie:

- $u_h$  – wektor wejściowych sygnałów do neuronów  $h$ -tej warstwy,
- $N_h$  – operator przetwarzania sygnału przez neurony  $h$ -tej warstwy,
- $W^h$  – macierz współczynników wagowych połączeń między warstwami ( $h-1$ ) oraz  $h$ .

Sieć perceptronowa jest zbudowana w taki sposób, że każdy element z poprzedniej warstwy łączy się z każdym elementem następnej warstwy. Każde połączenie charakteryzuje się określonym współczynnikiem wagowym, wyznaczanym w procesie uczenia sieci.

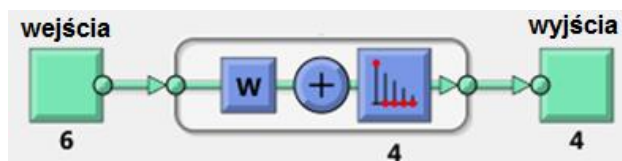
W dalszej części pracy przeanalizowano możliwości poprawy działania monitora diagnostycznego układu hamulcowego, rozumianej jako minimalizacja błędu wyznaczenia parametrów diagnostycznych hamulców w stosunku do ich wartości wzorcowych oraz zapewnienie możliwości diagnostyki hamulców na podstawie krótkotrwałych procesów hamowania.

Ocena przydatności nieliniowej autoregresji oraz samoorganizującego się odwzorowania do zastosowania w monitorze diagnostycznym układu hamulcowego została przeprowadzona z wykorzystaniem pakietu Neural Network Toolbox oprogramowania Matlab. Z programu Matlab pochodzą również schematy poszczególnych wariantów sztucznych sieci neuronowych. Parametry i struktura zastosowanych sieci neuronowych oraz algorytmy ich uczenia zostały dobrane zgodnie z ogólnymi wytycznymi ich doboru dla rozwiązywania zadań podobnych względem podejmowanych w pracy.

Do sieci neuronowej zadawano takie same dane, które wcześniej wykorzystano do realizacji monitora diagnostycznego metodą analityczną. Działanie to pozwoliło na jednoznaczną ocenę wpływu wykorzystania sieci na obliczone wartości parametrów diagnostycznych hamulców.

## 8.2. Zastosowanie samoorganizującego się odwzorowania (SOM)

W celu podziału uzyskiwanych na podstawie badań zależności opóźnienia samochodu oraz jego kół od ciśnienia hamowania na klasy, wykorzystano sieć neuronową wykorzystującą proces uczenia nienadzorowanego (bez nauczyciela) - samoorganizujące się odwzorowanie (rys. 64).



Rys. 64. Schematyczne przedstawienie stosowanego algorytmu sieci neuronowej bez nauczyciela [46]

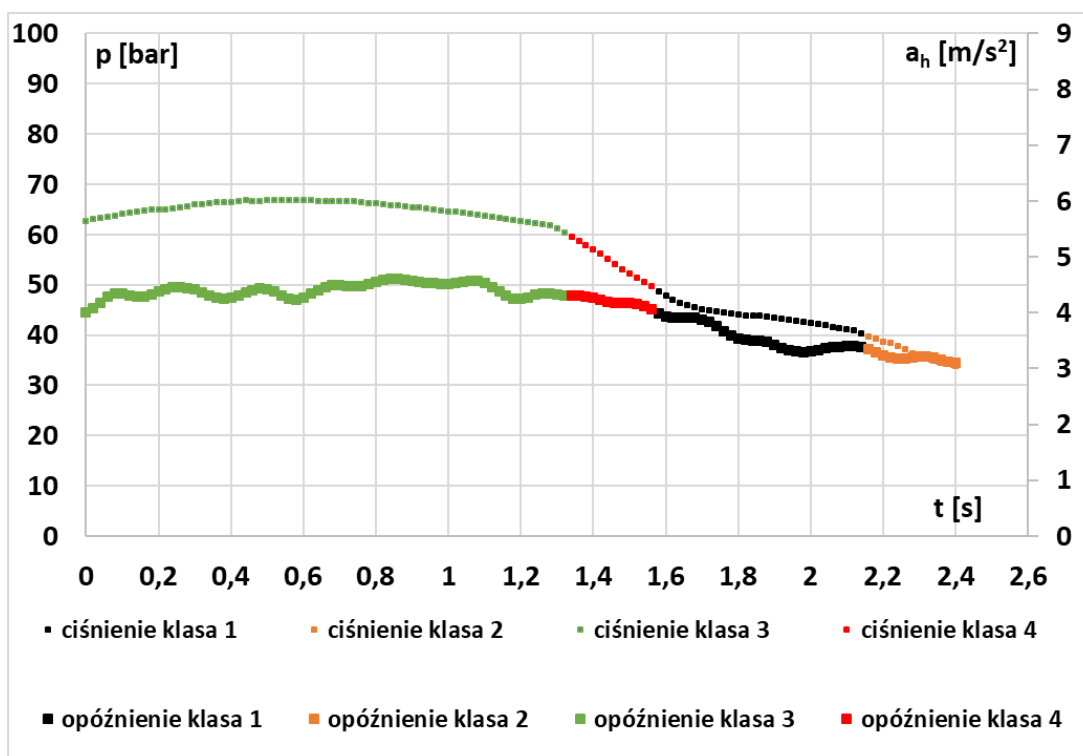
Jest to sieć jednokierunkowa [39]. Tego rodzaju sieć neuronowa jest powszechnie wykorzystywana w eksploatacji i zarządzaniu danymi [32]. Jej zaletę stanowi brak konieczności zdefiniowania kryteriów podziału danych wejściowych. Zaleta ta ma zasadnicze znaczenie w przypadku podziału danych, opisujących eksploatacyjne procesy hamowania pojazdu, które są procesami o różnym czasie trwania i zmienności czasowej ciśnienia w układzie hamulcowym oraz opóźnienia kół i samochodu. Na rys. 64 zostało określone 6 wartości wejściowych (opóźnienie kół pojazdu, opóźnienie samochodu oraz ciśnienie w układzie hamulcowym). Liczba klas została ustalona na 4. Zatem sieć neuronowa posiada 4 wartości wyjściowe. Można je przestawić w formie macierzy o wymiarach  $4 \times 1$ . Gdy w wierszu macierzy, odpowiadającemu danej klasie występuje wartość 1, wówczas jest to informacja, że dany element zbioru wejściowego został zakwalifikowany do tej klasy. Wartości w pozostałych wierszach wynoszą 0 [46]. Należy przypuszczać, że wśród klas, na które zostaną podzielone wartości ciśnienia hamowania i opóźnień kół samochodu znajdzie się klasa, która zawiera wartości charakteryzujące się najmniejszą zmiennością. Realizacja monitora diagnostycznego dla danych z tej klasy powinna charakteryzować się największą dokładnością procesu diagnostyki. Na etapie tworzenia sieci neuronowej narzucana jest liczba zbiorów (klas), na które mają być podzielone dane wejściowe. Litera *w* na rys. 64 symbolizuje wagi neuronów. W sieci neuronowej, działającej na zasadzie samoorganizującego się odwzorowania (SOM), do modyfikacji wag neuronów wykorzystywany jest zbiór uczący, w którym znajdują się dane, które mają zostać podzielone na klasy [3]. Algorytm sieci neuronowej określa wzajemne podobieństwo tych danych, przyporządkowując je do określonych klas.

Sieć neuronowa SOM to sieć dwuwarstwowa składająca się z warstwy wejściowej i wyjściowej [39, 40]. Sieć ta nie posiada warstwy ukrytej [39]. Poszczególne neurony warstwy wyjściowej łączy się z każdym z neuronów warstwy wejściowej. Neurony zawarte w pierwszej warstwie rozsyłają wszystkie wartości wejściowe na wejścia do drugiej z warstw, zwanej warstwą konkurencyjną [39]. Nazwa ta odnosi się do konkurowania neuronów między sobą, a proces uczenia sieci SOM jest procesem uczenia konkurencyjnego.

Wartości wejściowe dla sieci neuronowej SOM stanowią punkty zależności opóźnienia samochodu oraz jego kół od ciśnienia hamowania. Sieć przyporządkowuje każdy z punktów tej zależności do 4 żądanych klas.

Poniżej przedstawiono przykłady działania sieci SOM (podziału danych na klasy) dla kilku przebiegów hamowania pojazdu. Program podzielił wartości ciśnienia na 4 klasy i przyporządkował im odpowiednie wartości opóźnień.

Przedstawiony na rys. 65 proces hamowania to przebieg charakteryzujący się umiarkowaną zmiennością ciśnienia i opóźnienia. Elementy, należące do poszczególnych klas znajdujące się w sąsiednich chwilach czasowych, nie są przedzielone elementami z innych klas. Widocznym jest, że do jednej z klas - klasy 3 zakwalifikowano najbardziej równomierny fragment analizowanego procesu hamowania. Jednocześnie jest to fragment hamowania z największymi wartościami ciśnienia oraz opóźnienia. Zatem należy się spodziewać, że dla danych z tej klasy monitor diagnostyczny będzie działał najdokładniej.



Rys. 65. Wyniki podziału danych na cztery klasy- przebieg łagodnego hamowania z prędkości początkowej 80 km/h, pojazd bez dodatkowego obciążenia

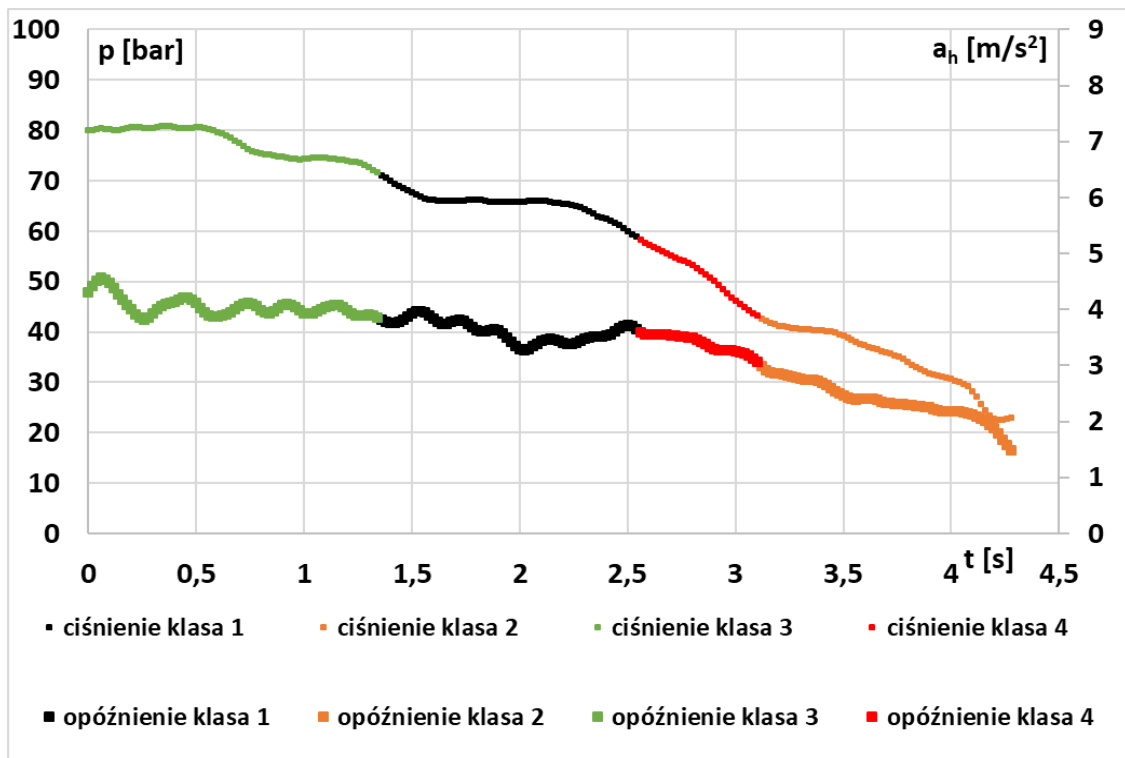
Tabela 6 przedstawia wartości średnie parametru diagnostycznego  $\sum k$ , odchylenia standardowe  $\sum k$  oraz wartości błędu względnego  $\sum k$ , uzyskane dla danych podzielonych na poszczególne klasy. Ponadto, w celach porównawczych, przedstawiono omawiane parametry statystyczne dla realizacji monitora diagnostycznego całości układu hamulcowego dla danych przed podziałem na klasy (kolumna „bez sieci neur.”).

Z analizy na rys. 65 wynika, że klasą danych, zapewniającą najlepszą dokładność działania monitora jest klasa 3 - w jej przypadku wartość błędu względnego  $\sum k$  jest najmniejsza. W przypadku analizowanego procesu hamowania, zastosowanie samoorganizującego się odwzorowania nieco pogorszyło dokładność działania monitora układu hamulcowego w stosunku do obliczeń bez zastosowania SOM, ale jest to różnica niewielka (o 1%). Natomiast wartość odchylenia standardowego  $\sum k$  jest znacznie mniejsza niż w przypadku zastosowania monitora diagnostycznego dla danych bez podziału na klasy. Fakt ten stanowi o możliwości zastosowania tej metody do minimalizacji odchylenia standardowych  $\sum k$  w celu zwiększania jednoznaczności diagnostyki układu hamulcowego.

Tab. 6. Analiza statystyczna działania monitora diagnostycznego dla podziału danych na klasy na rys. 65

	klasa 1	klasa 2	klasa 3	klasa 4	bez sieci neur.
średnia $\sum k$ [N/bar]	71,73	73,26	65,01	72,56	65,74
odchylenie st. $\sum k$ [N/bar]	4,10	2,51	2,65	2,47	3,97
błąd wzgl. $\sum k$ [%]	6	8	4	7	3

Charakter przebiegów czasowych opóźnienia i ciśnienia hamowania w przedstawionym na rysunku 66 procesie hamowania jest malejący z regularnością, której poziom zapewnił jednoznaczność klasyfikacji danych do poszczególnych klas. Dane zawarte w klasach są danymi z sąsiednich chwil czasowych analizowanego procesu hamowania.



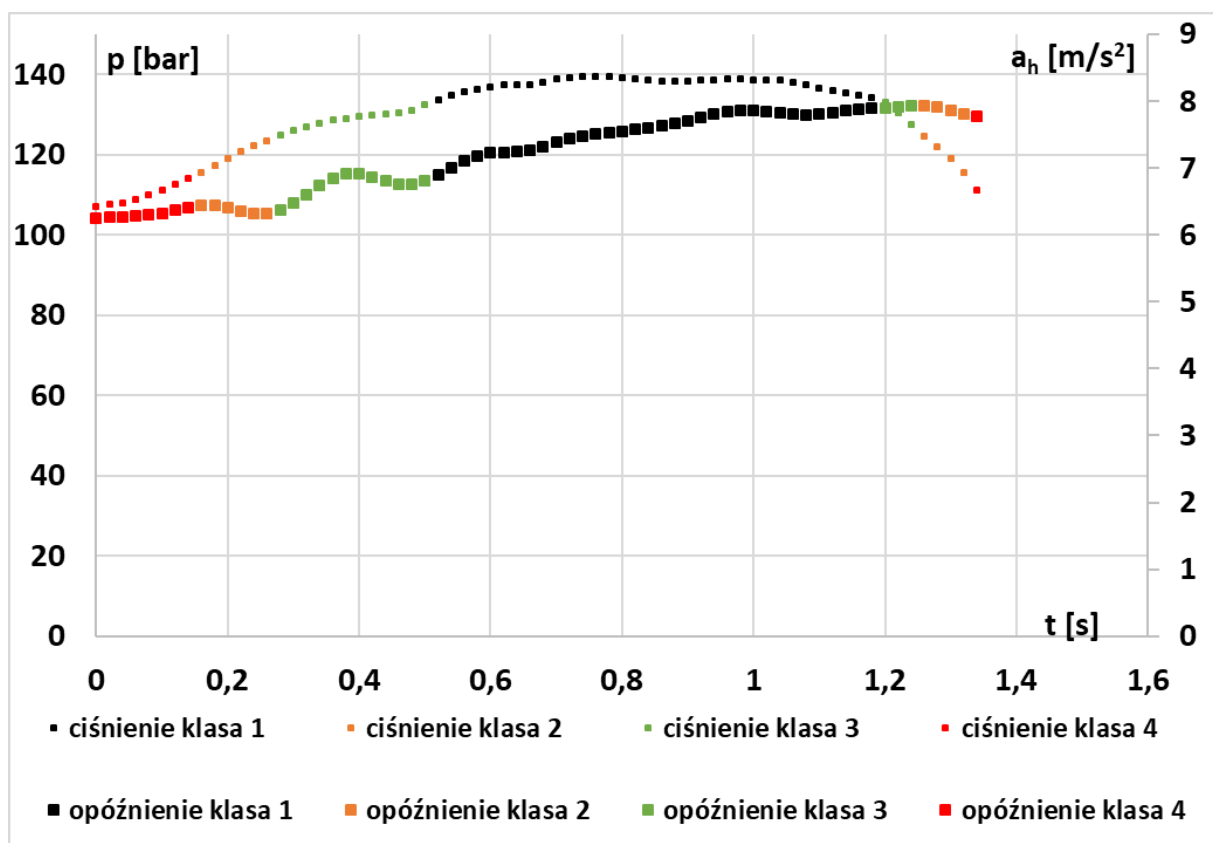
Rys. 66. Wyniki podziału danych na cztery klasy - przebieg łagodnego hamowania z prędkości początkowej 80 km/h, dodatkowe obciążenie pojazdu 300 kg

Zastosowanie samoorganizującego odwzorowania neuronowego dla hamowania przedstawionego na rys. 66 nie zapewniło poprawy dokładności działania monitora diagnostycznego układu hamulcowego (tab. 7). Jednakże wartości odchylenia standardowego  $\sum k$  są mniejsze w porównaniu do sytuacji braku stosowania sieci SOM (z wyjątkiem klasy 2), co sprzyja jednoznaczności diagnostyki.

Tab. 7. Analiza statystyczna działania monitora diagnostycznego dla podziału danych na klasy na rys. 66

	klasa 1	klasa 2	klasa 3	klasa 4	bez sieci neur.
średnia $\sum k$ [N/bar]	63,93	58,57	60,17	71,27	64,87
odchylenie st. $\sum k$ [N/bar]	2,48	7,05	4,29	2,10	6,11
błąd wzgl. $\sum k$ [%]	6	14	11	5	4

Proces hamowania, przedstawiony na rysunku 67, charakteryzuje się znacznymi wartościami opóźnienia samochodu oraz ciśnienia hamowania. Jediną klasą danych, której elementy pochodzą wyłącznie z następujących po sobie chwil czasowych, jest klasa 1. Jest to klasa danych najbardziej liczna, z najmniej zmiennymi wartościami ciśnienia spośród wszystkich klas danych.



Rys. 67. Wyniki podziału danych na cztery klasy - przebieg gwałtownego hamowania z prędkości początkowej 80 km/h, brak dodatkowego obciążenia pojazdu

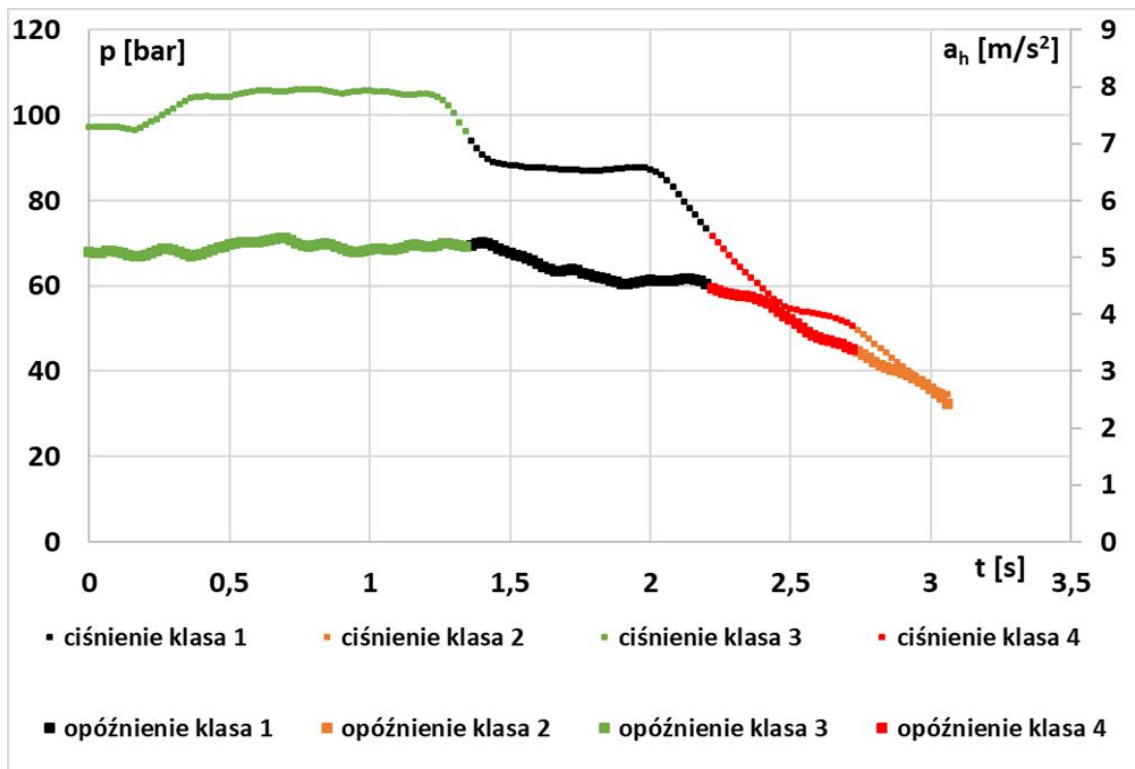
Obliczanie parametru  $\sum k$  dla danych zawartych w 2 lub 4 klasie ich podziału zapewnia zmniejszenie różnicy średnich wartości  $\sum k$  względem wartości wzorcowej (67,8 N/bar) w porównaniu do realizacji monitora diagnostycznego dla danych nie podzielonych na klasy (Tab. 8). Uzyskanie najmniejszych wartości błędu względnego  $\sum k$  w danej klasie danych nie wiąże się z uzyskaniem dla tej klasy najmniejszej wartości odchylenia standardowego  $\sum k$ . Klasa 1, najbardziej liczna, charakteryzuje się najmniejszą wartością odchylenia standardowego  $\sum k$ .

Tab. 8. Analiza statystyczna działania monitora diagnostycznego dla podziału danych na klasy na rys. 67

	klasa 1	klasa 2	klasa 3	klasa 4	bez sieci neur.
średnia $\sum k$ [N/bar]	59,95	62,44	57,89	62,04	60,41
odchylenie st. $\sum k$ [N/bar]	2,56	7,92	4,44	5,22	4,86
błąd wzgl. $\sum k$ [%]	12	8	15	8	11



Proces hamowania, przedstawiony na rys. 68 charakteryzuje się zmiennością ciśnienia w czasie. Jest on procesem zbliżonym do przedstawionego na rys. 66. Wyniki podziału danych z omawianego procesu hamowania świadczą pozytywnie o powtarzalności działania sieci SOM ponieważ są one zbliżone do wyników podziału na klasy danych, pochodzących z przebiegu na rys. 66. Punkty należące do poszczególnych klas danych występują w następujących po sobie chwilach czasowych.



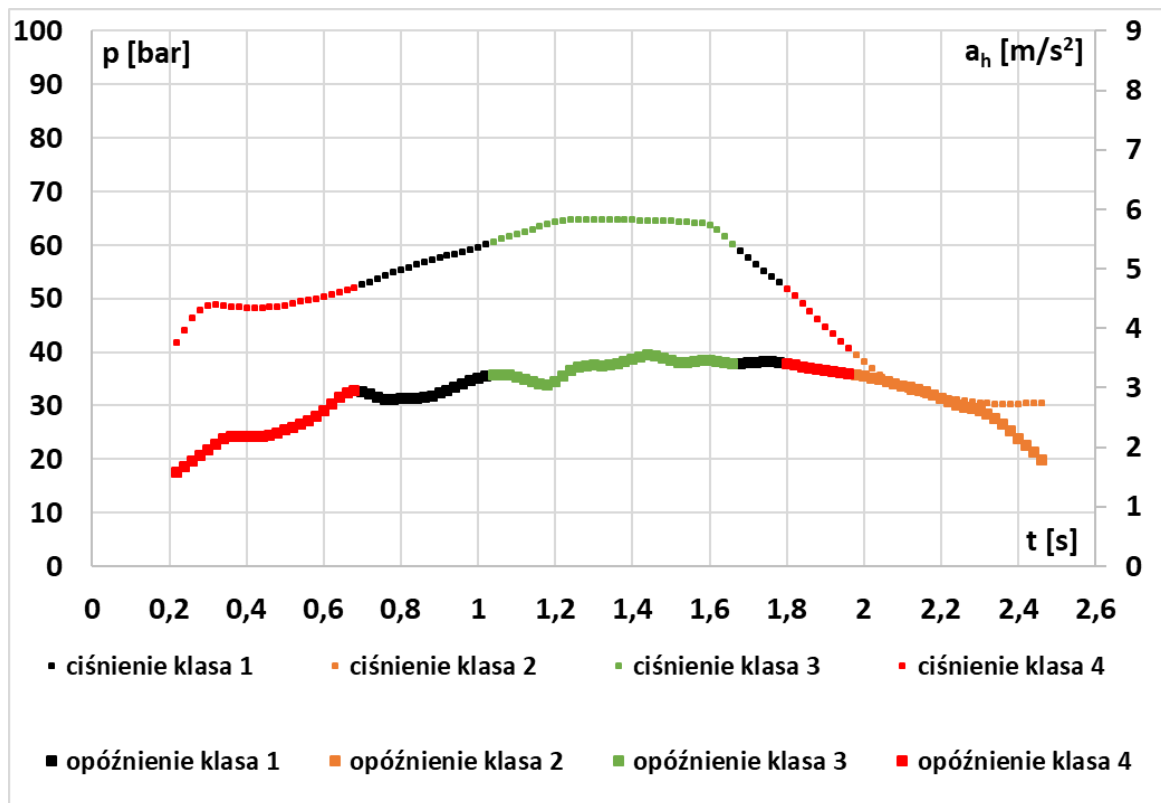
Rys. 68. Wyniki podziału danych na cztery klasy - przebieg gwałtownego hamowania z prędkości początkowej 80 km/h, dodatkowe obciążenie pojazdu 300 kg

W analizowanym procesie hamowania, klasa danych 3 o minimalnej wartości odchylenia standardowego  $\sum k$  jest klasą najbardziej liczną. Klasa 1 charakteryzuje się najmniejszym błędem względnym (tab. 9).

Tab. 9. Analiza statystyczna działania monitora diagnostycznego dla podziału danych na klasy na rys. 68

	klasa 1	klasa 2	klasa 3	klasa 4	bez sieci neur.
średnia $\sum k$ [N/bar]	67,77	70,33	62,79	77,91	69,6
odchylenie st. $\sum k$ [N/bar]	3,61	3,08	1,67	4,20	6,49
błąd wzgl. $\sum k$ [%]	0,05	3,7	7	15	3

Zmienność ciśnienia hamowania przedstawionego na rys. 69, w występujących bezpośrednio po sobie punktach danych zapewniła przeciętną, w porównaniu do uprzednio analizowanych przebiegów, jednoznaczność przyporządkowania danych do poszczególnych klas. Tylko w przypadku dwóch klas ich elementy pochodzą wyłącznie z następujących po sobie chwil czasowych. Natomiast dane zawarte w dwóch pozostałych klasach pochodzą z różnych części procesu hamowania.



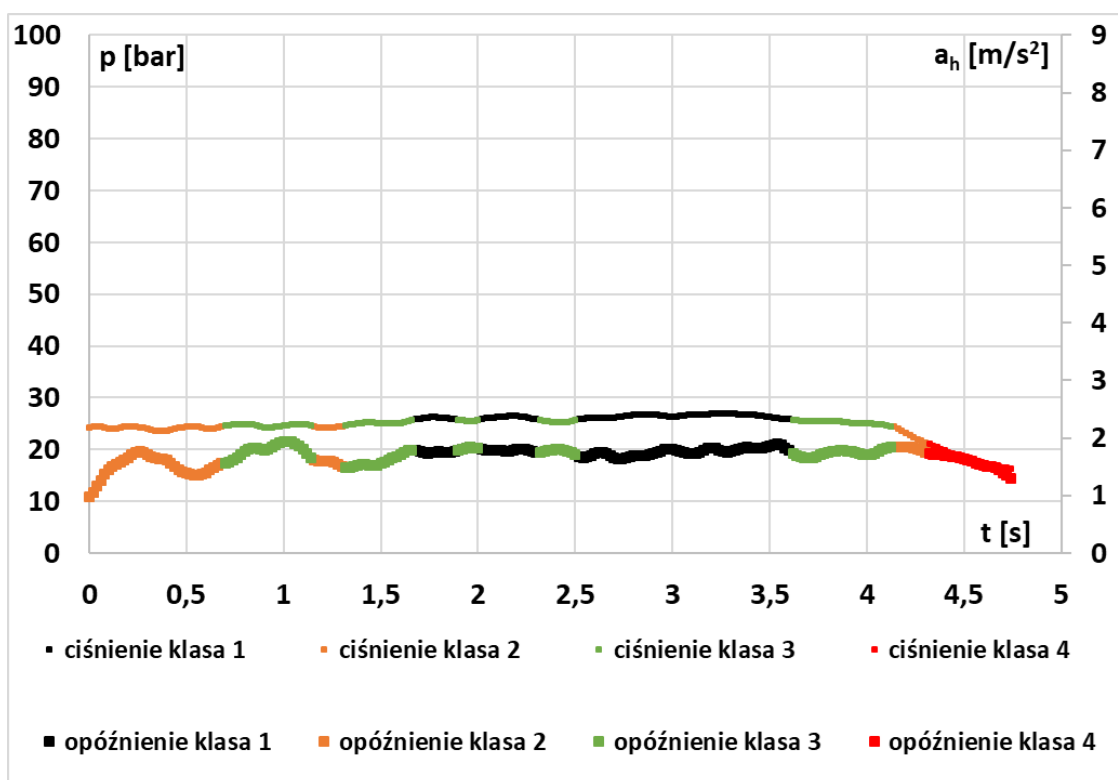
Rys. 69. Wyniki podziału danych na cztery klasy - przebieg hamowania od prędkości początkowej 30 km/h, masa samochodu z kierowcą + obciążenie 300 kg, hamowanie średnio intensywne

Wyniki obliczeń parametru diagnostycznego  $\sum k$  dla tego hamowania charakteryzują się dużym błędem względnym. Dane dla klasy 3, najbardziej licznej, dały błąd względny parametru  $\sum k$  mniejszy niż błąd dla obliczeń bez podziału na klasy oraz znacznie mniejsze odchylenie standardowe (tab. 10).

Tab. 10. Analiza statystyczna działania monitora diagnostycznego dla podziału danych na klasy na rys. 69

	klasa 1	klasa 2	klasa 3	klasa 4	bez sieci neur.
średnia $\sum k$ [N/bar]	53,76	36,03	58,02	51,15	56,63
odchylenie st. $\sum k$ [N/bar]	2,59	39,45	3,40	19,36	22,66
błąd wzgl. $\sum k$ [%]	21	47	14	25	16

Przedstawiony na rys. 70 przebieg charakteryzuje się małym opóźnieniem hamowania i niewielkim zróżnicowaniem opóźnienia i ciśnienia hamowania w czasie. Występuje trudność w jednoznacznym przyporządkowywaniu danych do poszczególnych klas. Dane zawarte w trzech klasach pochodzą z różnych fragmentów procesu hamowania.



Rys. 70. Wyniki podziału danych na cztery klasy - przebieg hamowania z prędkości początkowej 30 km/h, masa samochodu z kierowcą bez dodatkowego obciążenia, hamowanie mało intensywne

W analizowanym przypadku, przy zastosowaniu danych z 1, 2 i 4 klasy do obliczeń parametru  $\sum k$  występuje poprawa dokładności działania monitora diagnostycznego względem wykorzystania danych niepodzielonych na klasy (tab. 11). Klasą zapewniającą najmniejsze wartości błędu względnego  $\sum k$  jest klasa najliczniejsza. Oprócz zbliżenia średnich wartości parametru

$\sum k$  do wartości wzorcowej, w przypadku 1, 2 i 4 klasy danych wartości odchylenia standardowego  $\sum k$  są mniejsze w porównaniu do przypadku zastosowania danych bez ich podziału na klasy.

Tab. 11. Analiza statystyczna działania monitora diagnostycznego dla przebiegu hamowania z rys 70

	klasa 1	klasa 2	klasa 3	klasa 4	bez sieci neur.
średnia $\sum k$ [N/bar]	67,48	65,25	52,18	69,86	62,48
odchylenie st. $\sum k$ [N/bar]	5,40	10,21	19,00	11,11	13,33
błąd wzgl. $\sum k$ [%]	0,5	3,8	23	3	8

- **Analiza wyników**

Przedstawione powyżej wyniki wskazują, że podział danych na klasy spowodował zmniejszenie odchylenia standardowego parametru  $\sum k$  w porównaniu do obliczeń bez podziału na klasy, czyli zwiększenie wiarygodności wyznaczania tego parametru. Im mniejsza wartość odchylenia standardowego wartości  $\sum k$  dla danej klasy, tym mniej przypadkowa jest wartość średnia  $\sum k$  związana z tą klasą.

Dla części procesów hamowania nastąpiło niewielkie zwiększenie błędu względnego  $\sum k$  po zastosowaniu algorytmu SOM. Jednakże zakres tego zwiększenia nie powodował przekroczenia wartości błędu 10 %. Natomiast wystąpiło znaczące zmniejszenie odchylenia standardowego  $\sum k$ .

Analizy wyników działania sieci SOM wskazują, że wybór klasy danych do wyznaczenia parametru  $\sum k$  powinien uwzględniać licznosc klasy i minimalną wartość odchylenia standardowego.

Analizy obliczeniowe wykazały, że zastosowanie sieci SOM do wyznaczenia parametrów diagnostycznych  $k_i$  dla poszczególnych kół jest nieefektywne. Podział danych na klasy prowadził do zawyżenia błędu względnego  $k_i$ .

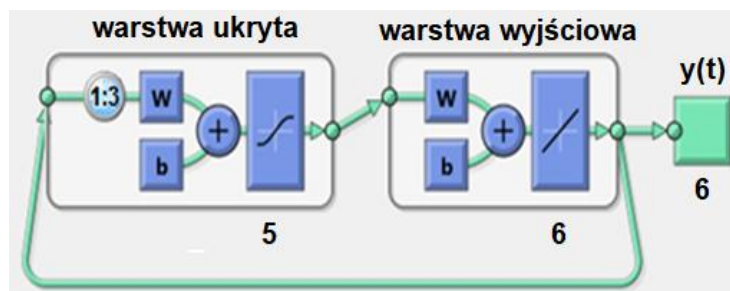
Opisana forma zastosowania sieci neuronowej SOM w monitorze diagnostycznym układu hamulcowego może stanowić uzupełnienie obliczeń analitycznych, co zwiększa wiarygodność oceny stanu hamulców dla hamowań dynamicznych, o dużej zmienności opóźnienia.

Algorytm sygnalizacji stanu niesprawności nie powinien bazować na pojedynczym procesie hamowania lecz poddawać analizie pewną liczbę tych procesów. W tym celu możliwe jest

wyznaczanie średniej arytmetycznej parametru  $\sum k$  z liczby  $n$  procesów hamowania. Problem ten przedstawiono w punkcie 9 pracy.

### 8.3. Zastosowanie nieliniowej autoregresji

Kolejnym zadaniem, do którego zastosowano sztuczną sieć neuronową, była analiza możliwości jej wykorzystania do rozpoznawania zależności opóźnienia kół oraz samochodu od ciśnienia w układzie hamulcowym. Dalsza analiza polegała na weryfikacji czy wartości parametrów diagnostycznych układu hamulcowego, wyznaczone na podstawie wyników działania sieci neuronowej, spowodują zwiększenie wiarygodności diagnostyki hamulców. Za poprawę wiarygodności diagnostyki uznano zbliżenie średnich wartości otrzymanych przebiegów parametrów diagnostycznych do wartości wzorcowej oraz ograniczenie wartości odchylenia standardowego parametrów diagnostycznych. Do rozwiązania omawianych problemów wykorzystano sieć neuronową, działającą w oparciu o model nieliniowej autoregresji (NAR). Jej schemat przedstawiono na rys. 71.



Rys. 71. Schematyczne przedstawienie modelu nieliniowej autoregresji (NAR) [47]

Stosowana sieć neuronowa to dwuwarstwowa (składająca się z warstwy ukrytej i warstwy wyjściowej) sieć ze sprzężeniem zwrotnym. Sieć posiada neurony w warstwie ukrytej, posiadające sigmoidalną funkcję aktywacji. Z kolei neurony w warstwie wyjściowej posiadają liniową funkcję aktywacji. Formułowana sieć neuronowa posiada sześć sygnałów wejściowych - są to wartości opóźnienia każdego z hamowanych kół, opóźnienie hamowania samochodu oraz odpowiadające im ciśnienie w układzie hamulcowym. Opóźnienia kół wprowadzono ponieważ w zależności na  $\sum k$  występują momenty bezwładności kół, zależne od opóźnienia obwodowego kół. Wartości te związane są z bieżącym procesem hamowania.

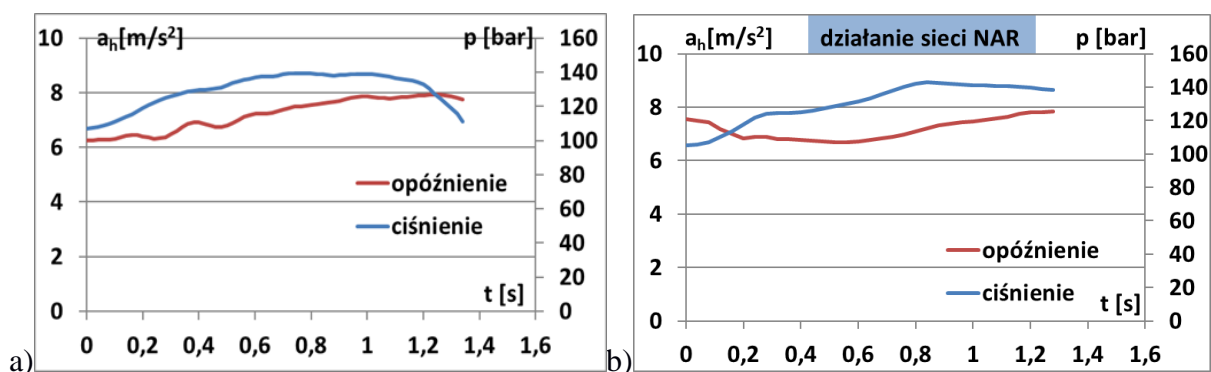
Schemat na rys. 71 odnosi się do sytuacji, w której wykorzystano 5 neuronów w warstwie ukrytej. Wartość ta została dobrana doświadczalnie na podstawie przeprowadzonej analizy efektywności sformułowanej sieci neuronowej dla różnych liczb neuronów w warstwie ukrytej. Liczba danych wejściowych do sieci neuronowej (wartości opóźnienia i ciśnienia hamowania), różna w zależności od długości procesu hamowania, była dzielona na zbiór uczący, testowy i walidacyjny

w taki sposób, że stanowiły one odpowiednio 70, 15 i 15 % całości danych wejściowych. Dane wejściowe były wybierane do zbiorów uczącego, testowego i walidacyjnego w sposób losowy. Liczba punktów danych wyjściowych opóźnienia kół i samochodu i ciśnienia hamowania, będących wynikiem działania sieci neuronowej, została dla każdego z wykorzystanych procesów hamowania ustalona na połowę liczby danych wejściowych. Działanie to było podyktowane koniecznością zapewnienia analogicznych warunków działania sieci neuronowej dla każdego z analizowanych procesów hamowania. Algorytm nieliniowej autoregresji dokonuje wyznaczenia trzech punktów omawianej zależności na podstawie trzech poprzednich na zasadzie pętli obliczeniowej. Literą *w* oznaczono na rys. 71 wagi neuronów. Z kolei litera *b* oznacza wyrazy wolne (BIAS).

Omawianą metodę zastosowano dla procesów hamowania, w których obliczeniowy monitor diagnostyczny układu hamulcowego przyjmował różną dokładność, jednakże w każdym przypadku średni błąd  $\sum k$  względem wartości wzorcowej nie przekraczał 10 %. Wybrane procesy hamowania to:

- proces 1: gwałtowne hamowanie z prędkości początkowej 80 km/h, z ciśnieniem w ogumieniu 1,5 bar, brak dodatkowego obciążenia pojazdu,
- proces 2: łagodne hamowanie z prędkości początkowej 80 km/h, z ciśnieniem w ogumieniu 1,5 bar, pojazd bez dodatkowego obciążenia,
- proces 3: gwałtowne hamowanie z prędkości początkowej 80 km/h, z ciśnieniem w ogumieniu 2,0 bar, brak dodatkowego obciążenia pojazdu.

Przykładowy wynik odwzorowania wartości ciśnienia w układzie hamulcowym oraz opóźnienia samochodu przez sieć neuronową NAR przedstawiono na rys. 72 b). Został on porównany z przebiegami uzyskanym na podstawie badań i stanowiącymi część (oprócz opóźnień kół) danych wejściowych do sieci neuronowej (rys. 72a).



Rys. 72: Proces hamowania 1. Przebiegi czasowe opóźnienia samochodu i ciśnienia w układzie hamulcowym: a) dla wyników badań, b) dla wyników działania sieci NAR

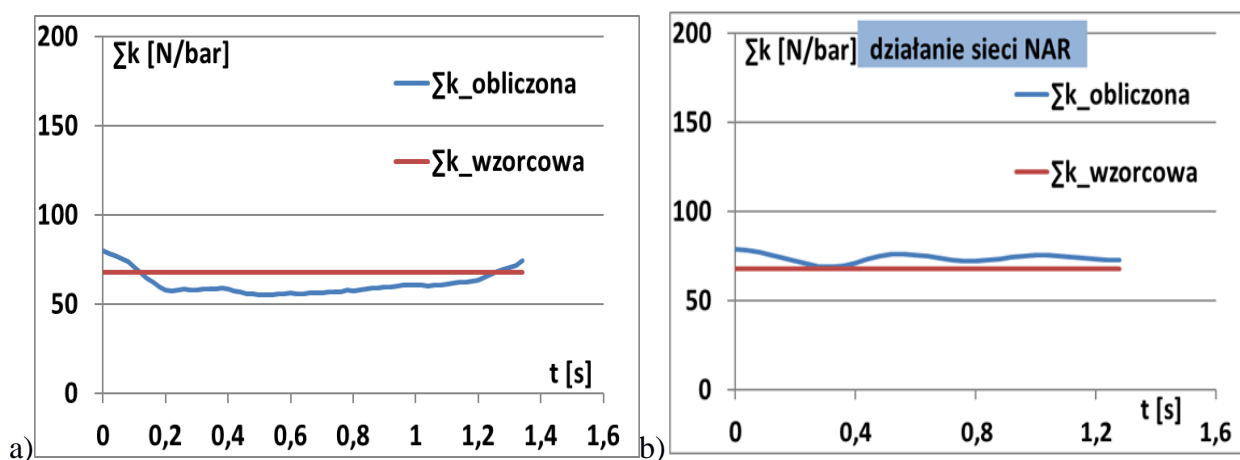
W celu porównania omawianych przebiegów, wyniki działania sieci NAR zostały przedstawione w funkcji czasu hamowania. W obydwu przebiegach występuje obszar ustalenia

ciśnienia hamownia na poziomie około 140 bar w czasie od 0,8 do 1,2 sekundy. Średnie wartości opóźnienia hamowania samochodu w tym zakresie wynoszą dla wyników badań oraz wyników działania sieci NAR odpowiednio 7,8 oraz 7,4 m/s<sup>2</sup>. Różnica między tymi wartościami (0,4 m/s<sup>2</sup>) nie przekracza wartości opóźnienia, za które odpowiada moment hamujący silnika spalinowego. Jednakże, przy mniejszych opóźnieniach hamowania niż występujące w omawianym przypadku, różnica ta może ulegać zwiększeniu.

Dla każdego z procesów hamowania dokonano obliczenia parametru  $\Sigma k$  na podstawie danych, uzyskanych za pomocą modelu nieliniowej autoregresji. Dokonano porównania wyników tych obliczeń z wartościami  $\Sigma k$ , uzyskanymi na podstawie danych z badań drogowych.

- **Próba hamowania 1**

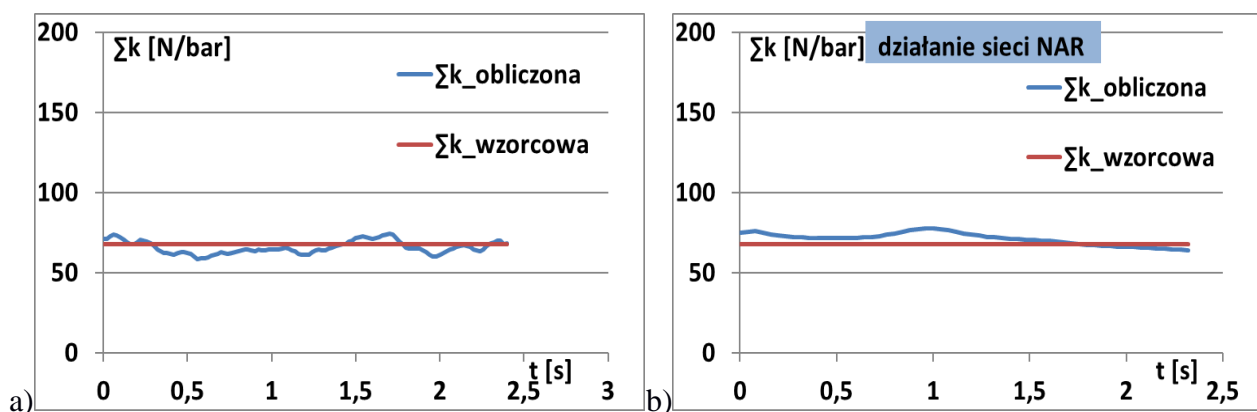
W przedstawionym na rys. 73 przebiegu hamowania działanie algorytmu sieci NAR spowodowało zawyżenie wartości parametru  $\Sigma k$  w stosunku do wyników badań. Jednakże wartości  $\Sigma k$ , uzyskane na podstawie działania tego algorytmu, różnią się od wartości wzorcowej w mniejszym stopniu niż wartości  $\Sigma k$  otrzymane na podstawie wyników badań.



Rys. 73. Proces hamowania 1: Przebiegi czasowe parametru diagnostycznego  $\Sigma k$  dla wyników badań (a) oraz wyników działania sieci NAR (b), wraz z wartością wzorcową  $\Sigma k$

- **Próba hamowania 2:**

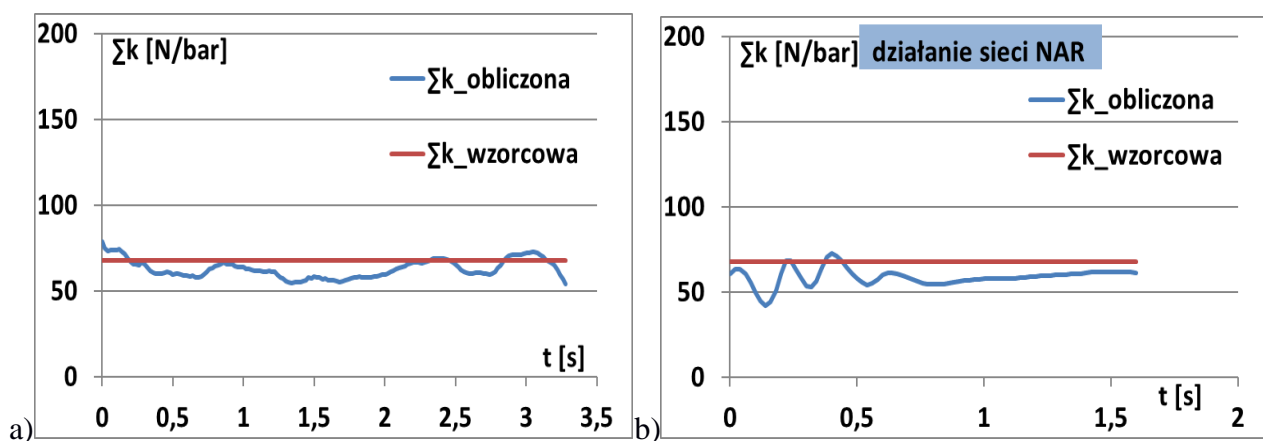
Zastosowanie algorytmu NAR spowodowało wygładzenie przebiegu wartości parametru  $\Sigma k$  w funkcji czasu hamowania względem wartości uzyskanych na podstawie wyników badań. Na podstawie rys. 74 możliwe jest stwierdzenie, że dokładność wyznaczenia parametru  $\Sigma k$  dla wyników badań oraz dla wyników działania sieci NAR jest zbliżona.



Rys. 74. Proces hamowania 2: Przebiegi czasowe parametru diagnostycznego  $\Sigma k$  dla wyników badań (a) oraz wyników działania sieci NAR (b), wraz z wartością wzorcową  $\Sigma k$

- **Próba hamowania 3**

Przedstawiony na rys. 75 proces hamowania charakteryzuje się największymi oscylacjami. Wartości parametru  $\Sigma k$ , uzyskane na podstawie wyników badań w procesie hamowania 3, charakteryzują się największymi oscylacjami spośród trzech omawianych procesów hamowania. W przebiegu parametru  $\Sigma k$ , uzyskanym jako wynik działania sieci NAR również występują oscylacje. Mają one miejsce w początkowym jego fragmencie. Wartości średnie  $\Sigma k$  dla wyników badań oraz wyników działania sieci neuronowej są zbliżone.



Rys. 75. Proces hamowania 3: Przebiegi czasowe parametru diagnostycznego  $\Sigma k$  dla wyników badań (a) oraz wyników działania sieci NAR (b) wraz z wartością wzorcową  $\Sigma k$

- **Analiza wyników**

W tabeli nr 13 zestawiono dane pozwalające porównać wyniki działania sieci NAR z metodą analityczną. Błąd względny  $\Sigma k$  w stosunku do wyników badań pozwala na analizę dokładności odwzorowania przebiegów ciśnienia hamowania oraz opóźnienia kół i samochodu przez sieć neuronową.



Tab. 13. Analiza statystyczna wyników obliczeń  $\Sigma k$  w rozpatrywanych przypadkach

<b>Błąd względny <math>\Sigma k</math> w stosunku do wyników badań</b>			
	Przebieg 1	Przebieg 2	Przebieg 3
Wyniki działania NAR	2,27 %	7,64 %	6,99 %
<b>Błąd względny <math>\Sigma k</math> w stosunku do wartości wzorcowej</b>			
	Przebieg 1	Przebieg 2	Przebieg 3
Dane badawcze	9,68 %	3,04 %	7,20 %
Wyniki działania NAR	11,68 %	4,99 %	13,26 %
<b>Odchylenia standardowe <math>\Sigma k</math></b>			
	Przebieg 1	Przebieg 2	Przebieg 3
Dane badawcze	6,20	3,96	5,29
Wyniki działania NAR	6,63	3,77	5,15

Wartości błędu parametru  $\Sigma k$  względem wyników badań wynosiły około 2 - 8 %. Wartości błędu parametru  $\Sigma k$  względem wartości wzorcowej są większe w przypadku wykorzystania do obliczeń  $\Sigma k$  wyników działania sieci NAR niż w przypadku zastosowania wyników działania badań. W przypadku procesów hamowania 1 i 2 to pogorszenie jest nieznaczne (tab. 13). Natomiast dla procesu hamowania nr 3 (jednego z hamowań gwałtownych) różnica średnich wartości błędu  $\Sigma k$  w stosunku do wartości wzorcowej dla wykorzystania wyników badań i wyników sieci NAR jest większa.

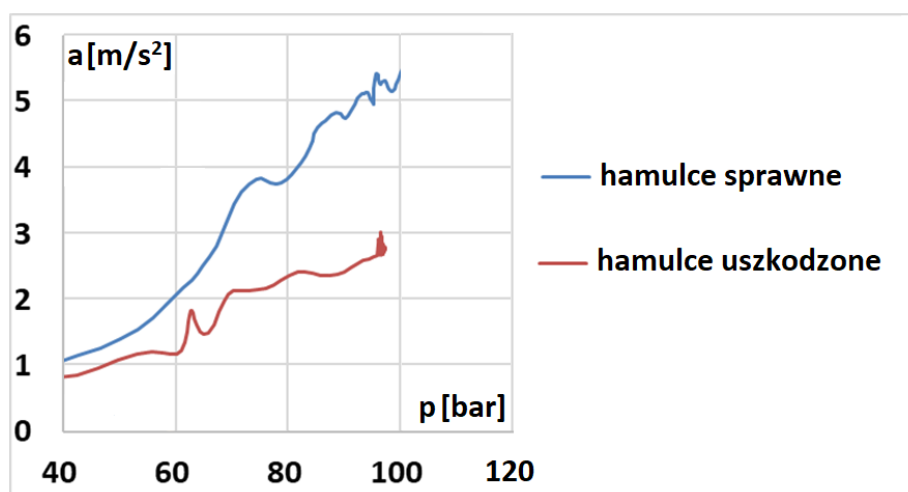
Zastosowanie algorytmu sieci NAR do obliczeń parametru  $\Sigma k$  zmniejszyło wartości jego odchylenia standardowego dla dwóch z trzech przeanalizowanych procesów hamowania. Zmniejszenie to, podobnie jak zwiększenie odchylenia standardowego  $\Sigma k$  dla procesu hamowania nr 1, jest nieznaczne.

Zastosowanie danych, będących wynikiem działania sieci NAR do wyznaczenia parametrów diagnostycznych  $k$  dla poszczególnych kół jest nieskuteczne

Na podstawie przeprowadzonej analizy należy stwierdzić, że zastosowanie tego rodzaju sieci wymaga zwiększenia dokładności jej uczenia. Dodatkową trudność stanowi możliwość występowania niejednoznaczności zależności ciśnienia od opóźnienia w okresach zmniejszania ciśnienia w układzie hamulcowym (zmniejszania nacisku na pedał hamulca).

## 9. Analiza skuteczności diagnostyki hamulców dla wybranych niesprawności układu

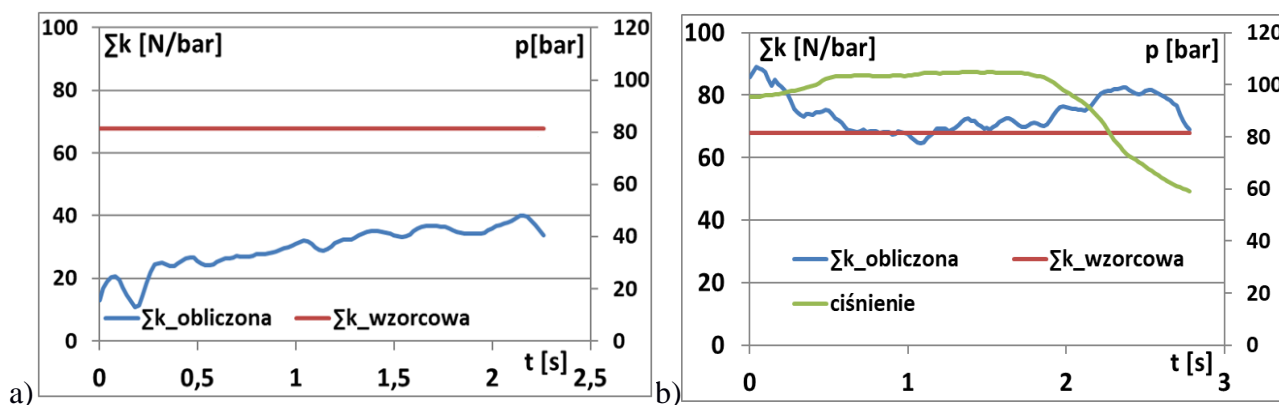
Dokonano weryfikacji działania monitora diagnostycznego dla układu hamulcowego z usterką polegającą na wycieku płynu hamulcowego w jednym z obwodów dwuobwodowego, hydraulicznego układu hamulcowego, w który wyposażony był samochód badawczy. Przeprowadzono porównanie działania monitora diagnostycznego dla przebiegów hamowania z omawianym osłabieniem hamulców oraz ze sprawnym układem hamulcowym, realizowanych w tych samych warunkach, przy zachowaniu podobnej dynamiki hamowania. Był to proces hamowania pojazdu obciążonego masą kierowcy, aparatury pomiarowej oraz 300 kg dodatkowego obciążenia, umieszczonego w tylnej jego części. Ciśnienie w ogumieniu wynosiło 1,5 bar. Przebiegi przedstawione na rys. 76 związane są z dwoma procesami hamowania. Jeden z nich był procesem hamowania z wyciekami płynu hamulcowego (zależność  $a_h(p)$  dla hamulców uszkodzonych). Opóźnienie hamowania dla tego przebiegu przedstawiono na rys. 76 w funkcji ciśnienia w szczelnym z obwodów hamulcowych. Natomiast drugi to proces hamowania ze sprawnym układem hamulcowym, przeprowadzany w warunkach analogicznych, względem hamowania z wyciekami płynu hamulcowego.



Rys. 76. Przebiegi opóźnienia samochodu podczas procesu hamowania ze sprawnym układem hamulcowym oraz z jego usterką w funkcji ciśnienia hamowania

Różnica między opóźnieniem samochodu dla przedstawionych na rys. 76 przypadków hamowania ze sprawnym i niesprawnym układem hamulcowym wynosi około 50 %. Zatem zmniejszenie parametru  $\sum k$  powinno wynosić około 50 %. W celu określenia zakresu osłabienia hamulców, do obliczenia wartości  $\sum k$  dla przebiegu hamowania z wyciekami płynu hamulcowego w jednym z obwodów, wykorzystano przebieg ciśnienia płynu hamulcowego w obwodzie szczelnym. To postępowanie zastosowano również aby symulować osłabienie hamulców, występujące przykładowo poprzez zużycie okładzin ciernych.

Rys. 77 a) przedstawia wyniki obliczeń parametru  $\Sigma k$  dla uszkodzonego układu hamulcowego. Z kolei rys. 77 b) przedstawia wyniki obliczeń  $\Sigma k$  dla przebiegu hamowania sprawnego układu hamulcowego. Aby zapewnić możliwość porównania wartości  $\Sigma k$  w obu przedstawionych na rys. 77 procesach do obliczeń  $\Sigma k$  wybrano te ich fragmenty, w których rozwinięte już zostało opóźnienie hamowania oraz ciśnienie płynu hydraulicznego w sprawnym obwodzie miało ustalony przebieg. Różnica wartości parametru  $\Sigma k$  między dwoma przedstawionymi hamowaniami sięga 50 %. Jej poziom jest zatem zbliżony do różnicy wartości opóźnień dla obu procesów hamowania (rys. 76) i potwierdza prawidłowość sygnalizacji osłabienia hamulców przez monitor diagnostyczny.



Rys. 77. Porównanie działania monitora diagnostycznego: a) dla przebiegu hamowania z usterką, b) ze sprawnym układem hamulcowym

Sygnalizacja osłabienia układu hamulcowego w sterowniku realizującym monitor diagnostyczny układu hamulcowego powinna, w celu niwelacji wpływu zakłóceń, odbywać się na podstawie pewnej liczby eksploatacyjnych procesów hamowania, w których nastąpiło zmniejszenie wartości parametru  $\Sigma k$  w określonym zakresie. Możliwym rozwiązaniem jest obliczenie średniej arytmetycznej wartości  $\Sigma k$  na podstawie ustalonej liczby procesów hamowania. Ich liczba powinna zostać dobrana doświadczalnie. Do obliczenia wartości średniej  $\Sigma k$  przyjmujemy te kolejne hamowania, które spełniają warunki realizacji monitora diagnostycznego układu hamulcowego.

Kolejnym sposobem postępowania jest wyznaczanie średniej kroczącej parametru  $\Sigma k$ . Dla bieżącego procesu hamowania, wykorzystywanego do analizy, nadawana jest waga  $F$ . Przyjmuje się unormowane wartości wag w zakresie od 0 do 1. Wartość średniej kroczącej parametru  $\Sigma k$  obliczana jest zgodnie z zależnością:

$$(\overline{\Sigma k_n}) = \Sigma k_n \cdot F + (1 - F) \cdot \overline{\Sigma k_{n-1}} \quad (69)$$

gdzie:

$(\overline{\Sigma k_n})$  - średnia krocząca parametru  $\Sigma k$  po  $n$  hamowaniach,

$\overline{\Sigma k_{n-1}}$  - średnia arytmetyczna parametru  $\Sigma k$  z  $n-1$  poprzednich hamowań,

$\sum k_n$ - wartość parametru  $\sum k$  w bieżącym hamowaniu,

$F$ - waga bieżącego procesu hamowania.

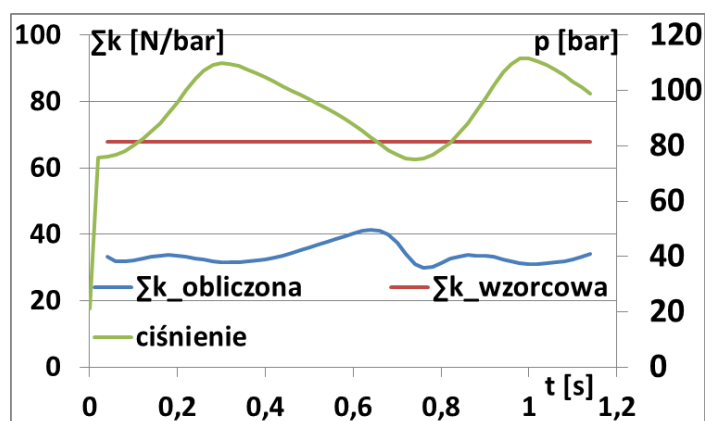
Im waga bieżącego procesu hamowania jest bliższa wartości 1 tym w większym stopniu wpływa on na wartość średniej kroczącej. Od wartości wagi zależy czułość metody.

Metoda średniej kroczącej może być stosowana w analogiczny sposób dla parametru diagnostycznego  $k_i$  (związanego z hamulcami poszczególnych kół pojazdu). Zastosowanie średniej kroczącej jest metodyką stosowaną w diagnozowaniu układów o stopniowej zmianie parametrów wyjściowych i dużym wpływie zakłóceń na wartość badaną. Dla tych przypadków diagnoza na podstawie pojedynczego pomiaru może być obciążona dużą niepewnością. Zastosowanie średniej kroczącej pozwala na minimalizację wpływu chwilowych zakłóceń na wynik diagnozowania.

Poza zwiększeniem wiarygodności metoda średniej kroczącej pozwala wykryć stopniową zmianę stanu układu w czasie eksploatacji.

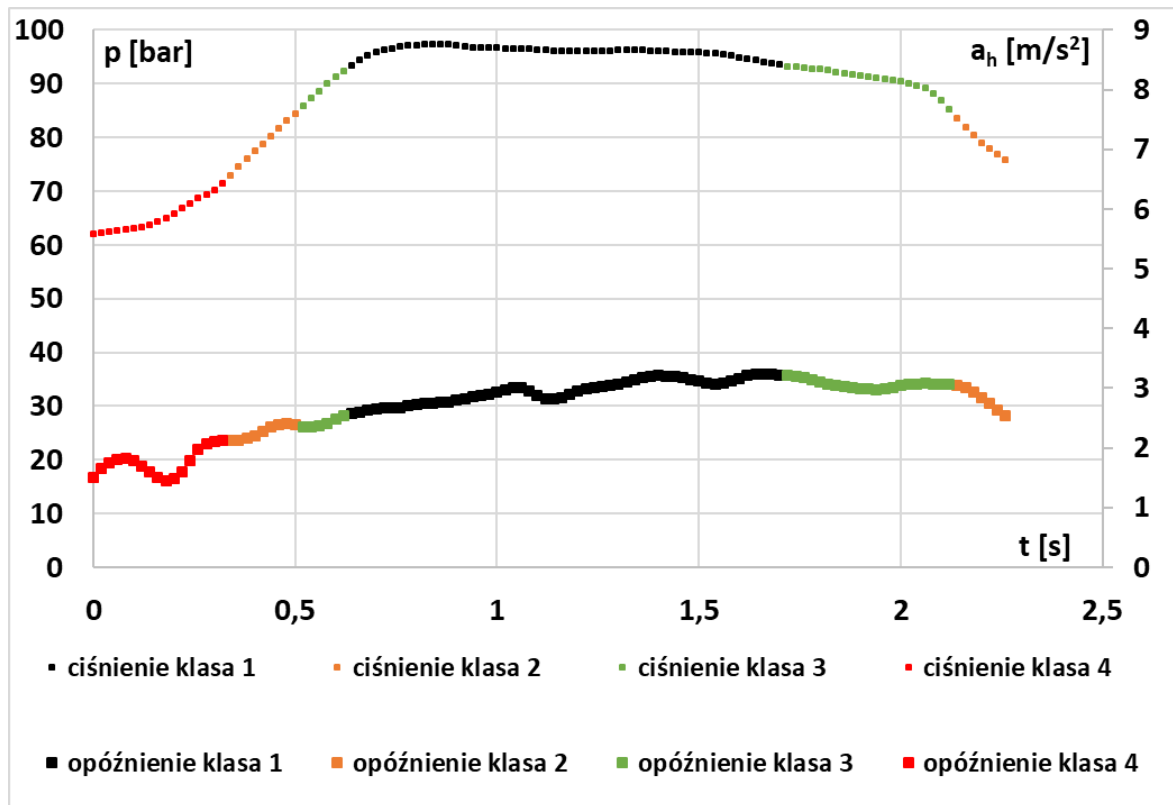
Kolejny etap analizy stanowi zastosowanie sformułowanych w pracy algorytmów NAR i SOM do przebiegu hamowania z uszkodzonym układem hamulcowym. Jej cel stanowi sprawdzenie, czy dane wejściowe pochodzące z procesu hamowania z usterką a więc o charakterze różniącym się względem danych związanych z hamulcami sprawnymi wykażą różnicę działania sieci neuronowych.

Wartość średnia ciśnienia w układzie hamulcowym, odwzorowana przez sieć NAR jest zbliżona do średniej wartości ciśnienia hamowania dla danych wejściowych do sieci neuronowej. Wartości parametru  $\sum k$ , przedstawione na rys. 78, są zbliżone wobec wartości  $\sum k$  uzyskanych w sposób wyłącznie obliczeniowy (rys. 77 a). Ten wynik potwierdza możliwość wykorzystania sieci NAR dla monitora diagnostycznego w przypadku analizy procesów hamowania z osłabionym układem hamulcowym.



Rys. 78. Przebieg ciśnienia hamowania uzyskany przez sieć NAR dla hamowania z usterką oraz wartości  $\sum k$  dla danych uzyskanych przez sieć NAR

W przypadku podziału danych związanych z procesem hamowania z usterką przez sieć SOM możliwe jest zaobserwowanie trendu klasyfikacji danych do poszczególnych klas (rys 79). W klasach od 1 do 4 znajdują się odpowiednio dane od największych do najmniejszych wartości ciśnienia i opóźnienia. Klasa 1, która zawiera dane związane z największymi wartościami opóźnień oraz ciśnienia jest klasą najbardziej liczną.



Rys. 79. Podział danych przez sieć neuronową SOM dla przebiegu hamowania z usterką

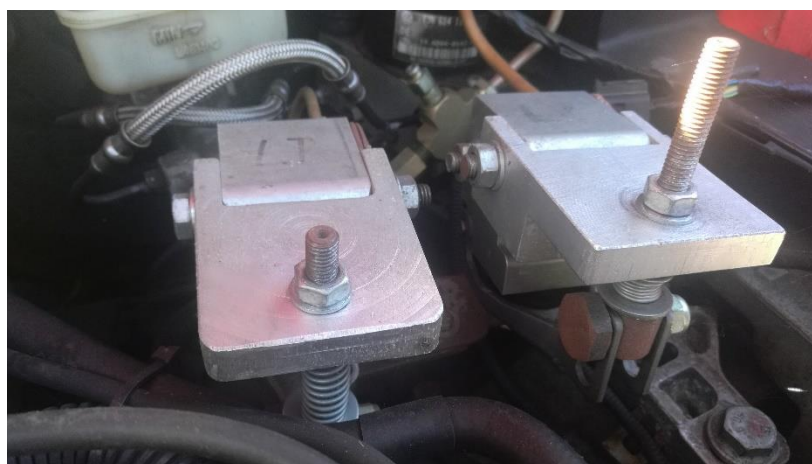
Wyniki obliczeń parametru  $\sum k$  dla przebiegu z usterką po analizie SOM ujęto w tab. 14. Zostały one porównane z obliczeniowym wariantem monitora diagnostycznego. Wyznaczono również względne osłabienie hamulców na skutek zaistniałej usterki w stosunku do hamulców sprawnych. Zostało ono obliczone z wykorzystaniem wzoru (63), w którym wartością oczekiwaną była wartość wzorcowa  $\sum k$  dla hamulców sprawnych.

Przydatność sieci SOM do analizy danych związanych z procesem hamowania z usterką należy ocenić pozytywnie. Ponieważ klasa danych 1 jest klasą najbardziej liczną i rozrzut wartości ciśnień dla tej klasy jest najmniejszy, wyniki obliczeń  $\sum k$  dla danych z tej klasy należy uznać za najbardziej wiarygodne.

Tab. 14. Wyniki analizy SOM dla omawianego przebiegu hamowania z usterką

	klasa 1	klasa 2	klasa 3	klasa 4	Bez sieci neur.
średnia $\sum k$	32,19	30,09	33,44	17,97	29,82
odchylenie st. $\sum k$	3,38	5,68	4,65	4,53	6,70
względne osłabienie hamulców	0,53	0,56	0,51	0,73	0,56

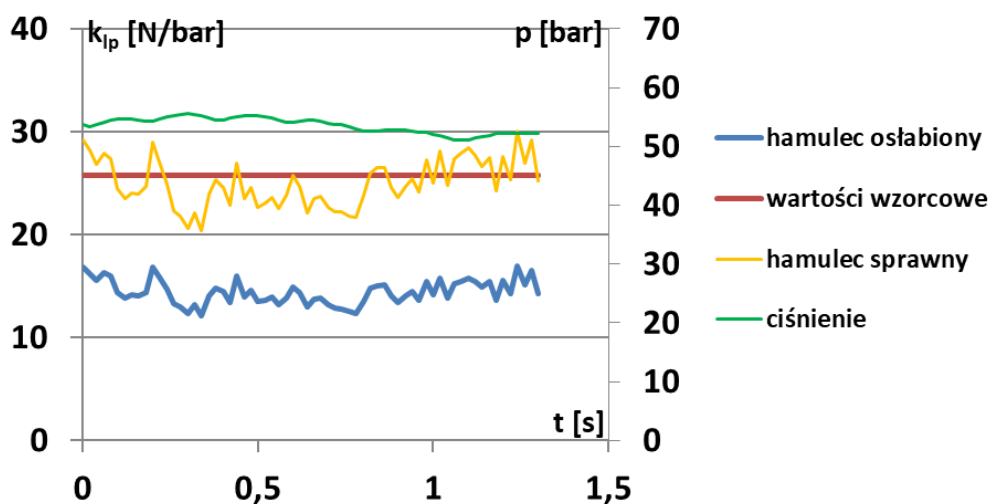
Kolejnym krokiem analizy efektywności rozpoznawania usterek układu hamulcowego było wykorzystanie przebiegów hamowania z zasymulowanymi usterką hamulca koła przedniego lewego. W tym celu dokonano przesterowania zaworu dławiącego przepływ płynu hamulcowego do hamulca tego koła. Wykorzystywane zawory zostały przedstawione na rys. 80.



Rys. 80. Zawory ograniczające ciśnienie płynu hamulcowego, doprowadzane do kół samochodu badawczego

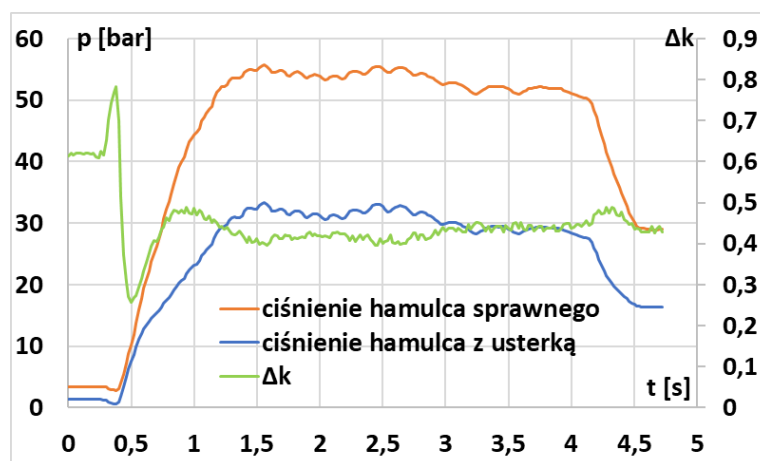
Przedstawione na rys. 80 zawory ograniczały dopływ płynu hamulcowego do zacisków poszczególnych kół przy hamowaniu z dużą gwałtownością.

W obliczeniach parametru diagnostycznego hamulca uszkodzonego, dla którego ograniczano dopływ ciśnienia płynu hamulcowego wykorzystywano wartości ciśnienia płynu dochodzące do hamulca, dla którego ciśnienie to nie było ograniczane. Wykonano hamowania z zasymulowanym osłabieniem hamulca lewego przedniego koła i sprawnym hamulcem koła prawego. W celu sprawdzenia efektywności rozpoznawania osłabienia hamulca, dla poszczególnych przebiegów hamowania obliczano parametr  $k_{lp}$  metodą analityczną (rys. 81). Wartości ciśnienia, przedstawione na rys. 81, są wartościami dochodzącymi do sprawnej części układu hamulcowego. W analizowanym przypadku monitor diagnostyczny zasygnalizował niesprawność.



Rys.81. Wyniki obliczeń parametru diagnostycznego  $k_{ip}$  dla hamulca sprawnego oraz osłabionego wraz z wartością ciśnienia w hamulcu sprawnym i wartością wzorcową  $k_{ip}$  : przebieg hamowania z prędkości początkowej 80 km/h, ciśnienie pompowania kół 2,0 bar, zwiększona dynamika hamowania

Sprawdzono również metodę różnicową przedstawioną w pkt 5.3 pracy. Dokonano analizy tej metody dla usterki polegającej na ograniczeniu ciśnienia płynu hamulcowego dochodzącego do jednego z zacisków hamulców kół przedniej osi z wykorzystaniem jednego z zaworów, przedstawionych na rys. 80. Do obliczeń wykorzystano ten sam proces hamowania, który posłużył do analizy przedstawionej na rys. 81. Na rys. 82. Przedstawiono wyniki obliczeń parametru  $\Delta k$  dla kół osi przedniej wraz z wartościami ciśnienia płynu hamulcowego w siłowniku hamulca sprawnego. Do chwili czasowej około 1,5 sekundy miał miejsce narost ciśnienia hamowania. Był to stan nieustalony, powodujący rozrzut obliczonych wartości  $\Delta k$ . Następnie miało miejsce ustalenie ciśnienia hamowania - okres rozwiniętego opóźnienia hamowania trwający do około 4 sekundy. Średnia wartość wskaźnika  $\Delta k$  z zakresu czasowego od 1,5 do 4 sekundy wynosi około 0,42. Odpowiada ona w przybliżeniu, występującej w tym przedziale czasowym, względnej różnicy ciśnienia w siłowniku hamulca nieuszkodzonego oraz w siłowniku hamulca z zasymulowaną usterką.



Rys. 82. Przebiegi czasowe ciśnienia płynu hamulcowego w siłowniku hamulca sprawnego oraz z zasymulowaną usterką dla kół osi przedniej wraz z odpowiadającymi wartościami parametru  $\Delta k$

Omawiany sposób kontroli pozwala wykazać, który z hamulców badanej osi daje mniejszy moment hamujący oraz jaka jest względna różnica tych momentów. Jednak w przypadku uszkodzenia obu hamulców badanej osi ten parametr nie wykryje niesprawności. Może ona być ujawniona na podstawie małej wartości parametru  $\sum k$  dla całości układu hamulcowego.

Parametr  $\Delta k$  powinien być wyznaczany podczas hamowania prostoliniowego. Podczas hamowań na łuku występuje różnica prędkości koła prawego i lewego na tyle duża, że zakłóca to obliczenie parametru  $\Delta k$ .

Parametr  $\Delta k$  wyznaczany w warunkach drogowych odpowiada różnicy sił hamujących kół badanej osi wyznaczanych na stanowisku rolkowym zgodnie z obowiązującymi przepisami [5]. Parametr  $\sum k$  może zastąpić ocenę skuteczności hamowania  $sk_h$  w warunkach stanowiskowych.

- **Ocena skuteczności hamowania na podstawie parametru diagnostycznego  $\sum k$**

W programie diagnostycznym, realizującym monitor układu hamulcowego w danym pojeździe, należy sprawdzić czy parametr diagnostyczny  $\sum k$  spełnia warunek minimalnej, wymaganej przez normy prawne, skuteczności układu hamulcowego  $sk_h$ . W tym celu, na etapie wdrożenia monitora diagnostycznego do danego modelu, należy wykonać na stanowisku rolkowym pomiar ciśnienia w układzie hamulcowym, przy którym występują siły hamujące zapewniające wymaganą skuteczność hamowania.

Związek między parametrem diagnostycznym  $\sum k$  uzyskanym w monitorze diagnostycznym hamulców, a skutecznością hamowania jest następujący:

$$sk_h = \frac{\sum F_{hmax}}{G_{dmc}} = \frac{\sum k \cdot p_{st}}{G_{dmc}} \quad (70)$$

Równanie (70) powinno spełniać warunek :

$$\frac{\sum k \cdot p_{st}}{G_{dmc}} \geq sk_h \quad (71)$$

gdzie:

- $sk_h$  - wymagana minimalna skuteczność układu hamulcowego,
- $\sum F_{hmax}$  - suma sił hamujących na stanowisku rolkowym odpowiadająca wymaganej skuteczności hamowania,
- $G_{dmc}$  - ciężar pojazdu odpowiadający jego dopuszczalnej masie całkowitej,
- $p_{st}$  - ciśnienie hamowania, przy którym uzyskano na stanowisku rolkowym siły hamujące kół przednich i tylnych dla uzyskania wymaganej skuteczności  $sk_h$ .



Spełnienie warunku (71) oznacza, że w warunkach drogowych, w bieżących hamowaniach pojazd spełnia wymagania przepisów prawnych odnośnie skuteczności hamowania.

Jeżeli parametr diagnostyczny  $\sum k$  jest mniejszy od wyrażenia  $\frac{sk_h \cdot G_{dmc}}{p_{st}}$ , to program diagnostyczny powinien zasignalizować niesprawność hamulców.

## 10. Wnioski i plan dalszych prac

Cel naukowy pracy w postaci opracowania diagnostycznej metody oceny skuteczności działania układu hamulcowego w warunkach bieżącej eksploatacji pojazdu został zrealizowany.

Opracowany monitor diagnostyczny jest częścią systemu diagnostyki pokładowej samochodu w zakresie bezpieczeństwa. Pozwala ocenić skuteczność hamowania pojazdu w warunkach bieżącej eksploatacji oraz oszacować stan hamulców pojedynczych kół. Ma szczególne znaczenie w pojazdach autonomicznych, w których proces hamowania odbywa się bez udziału kierującego.

Wnioski o charakterze poznawczym:

1. Opracowany monitor diagnostyczny ma charakter warunkowy, to znaczy powinny zaistnieć odpowiednie warunki hamowania do jego realizacji: wartość rozwiniętego opóźnienia pojazdu większa o ponad 100% od opóźnienia hamowania silnikiem i mniejsza od opóźnienia powodującego uruchamianie układu ABS.
2. Najmniejszy błąd względny monitora diagnostycznego można uzyskać dla kilkusekundowych hamowań z opóźnieniem większym od  $2 \text{ m/s}^2$ .
3. Zaproponowana metodyka wyznaczania warunków procesu hamowania niezwiązanych ze stanem hamulców: masy pojazdu, stanu jezdni i jej nachylenia, oporów powietrza, oporów toczenia pozwala na obliczenie tej części opóźnienia, za którą odpowiada układ hamulcowy. Zwiększenie dokładności wyznaczania warunków procesu hamowania będzie przedmiotem dalszych prac autora.
4. Ocena stanu hamulców kół na podstawie parametru diagnostycznego  $k_i$  wymaga stosowania ogumienia o znanej charakterystyce  $\mu(s)$ .
5. Wykonane badania i obliczenia wskazują, że dla ustalonych warunków hamowania błąd względny proponowanej metody diagnozowania wynosi około 10% dla parametru diagnostycznego  $\Sigma k$  całości układu hamulcowego i około 20% dla parametru  $k_i$  dotyczącego poszczególnych kół pojazdu. Wobec możliwych różnic współczynnika tarcia sprawnych okładzin hamulcowych około 10% oraz dopuszczalnej przepisami nierówności sił hamujących badanej osi do 30% dokładność wyznaczania parametru  $k_i$  dla kół hamowanych rzędu 20% wydaje się wystarczająca.

6. Metoda względnej różnicy parametrów diagnostycznych  $k_i$  hamulców kół tej samej osi wymaga mniej danych pomiarowych w porównaniu do bezpośredniego wyznaczenia tego parametru, natomiast zawiera mniej informacji diagnostycznej. w stosunku do bezpośredniego obliczania parametru  $k_i$ .

7. Podział danych z procesu hamowania na klasy, z zastosowaniem sieci neuronowej SOM, pozwala wybrać za jej pomocą dane o niewielkich wzajemnych różnicach. Odbywa się bez konieczności wcześniejszego określania liczbowych kryteriów tego podziału. Fakt ten stanowi zaletę omawianej metody ponieważ jest ona możliwa do zastosowania dla dowolnego przebiegu hamowania o różnym czasie trwania i zmienności opóźnienia.

8. Podział danych na klasy z wykorzystaniem samoorganizującego się odwzorowania SOM pozwala na zwiększenie dokładności diagnostyki układu hamulcowego w gwałtownych procesach hamowania w porównaniu do wykorzystania wyłącznie obliczeniowej formy monitora diagnostycznego. Stosowanie algorytmu SOM powoduje zmniejszenie uzyskiwanych wartości odchylenia standardowego  $\sum k$ . Zatem pozwala na zwiększenie pewności oceny stanu hamulców.

9. W przypadku wyznaczenia parametru  $\sum k$  na podstawie danych będących wynikiem działania sieci opartej o algorytm nieliniowej autoregresji (NAR), wartości średniego błędu wyznaczenia  $\sum k$  były większe niż w przypadku wartości  $\sum k$  uzyskanych w sposób analityczny. Na podstawie przeprowadzonej analizy należy stwierdzić, że zastosowanie algorytmu sieci NAR w monitorze diagnostycznym układu hamulcowego wymaga dalszego rozwoju tego algorytmu, zorientowanego na zwiększeniu dokładności jego uczenia.

Wnioski o charakterze utylitarnym:

1. Ze względu na wymagane minimalne opóźnienia hamowania monitor diagnostyczny może być realizowany na nawierzchniach o współczynniku przyczepności pozwalającym na uzyskanie opóźnień hamowania możliwych do osiągnięcia na nawierzchniach suchych, lub mokrych.

2. Sygnalizacja stanu niesprawności układu hamulcowego powinna odbywać się na podstawie kilkukrotnych powtórzeń wystąpienia wartości parametru diagnostycznego  $\sum k$  lub parametrów  $k_i$  mniejszych niż wartości dopuszczalne. Konieczność powtórzeń pomiarów jest spowodowana wpływem warunków hamowania (dynamiką zmian ciśnienia i opóźnienia oraz zmiennością przyczepności jezdni) na wartość parametrów diagnostycznych.

3. Do sygnalizacji stanu niesprawności hamulców można zastosować średnią krocząca parametru diagnostycznego z wagą. W diagnostyce układów pracujących w zmiennych warunkach metoda ta pozwala ograniczyć błędy diagnozowania. W dalszych pracach należy dobrać wagę bieżącego wyniku oraz ilość powtórzeń pomiarów tak, aby ograniczyć błędy typu „fałszywy alarm” z równoczesnym zachowaniem wystarczającej czułości metody.

4. Wdrożenie opracowanego monitora diagnostycznego układu hamulcowego możliwe jest w układach posiadających czujnik ciśnienia płynu hamulcowego bądź większą ich liczbę. Są to pojazdy z układem ESP lub elektrohydrauliczne układy hamulcowe.

Na podstawie dotychczas zrealizowanych badań i uzyskanych wyników, dalsze prace powinny dotyczyć:

- opracowania monitora diagnostycznego układu hamulcowego z odzyskiem energii kinetycznej,
- opracowania algorytmu rozpoznawania rodzajów usterek układu hamulcowego, z wykorzystaniem nie tylko sieci neuronowej ale także dodatkowych metod analizy sygnału (przykładowo analizy falkowej),
- doświadczalnej oceny wpływu charakterystyki przyczepności opon  $\mu(s)$  na dokładność wyznaczania parametru diagnostycznego  $k_i$  czyli stanu hamulców poszczególnych kół.

## 11. Literatura

1. Korbicz J., Obuchowicz A., Uciński D.: Sztuczne sieci neuronowe: podstawy i zastosowania. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1994
2. Manolis Louarkis: A Brief Description of the Levenberg-Marquardt Algorithm Implemented by levmar, Foundation for Research and Technology - Hellas (FORTH), Heraklion 2005
3. Tadeusiewicz R, Szaleniec M: Leksykon Sieci Neuronowych, Wydawnictwo Fundacji "Projekt Nauka", Wrocław 2015
4. Kuliś E., Żółtowski B.: Badania Układów Hamulcowych, Studies & Proceedings of Polish Association for Knowledge Management Nr 47. 2011
5. Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia, projekt z dnia 16 kwietnia 2012
6. Bocheński C. (redaktor): Badania kontrolne samochodów, Praca zbiorowa, WkiŁ, Warszawa, 2000
7. Petruszewicz K.: Projektowanie Mechatroniczne. Technika Hardware-in-the-loop a założenia Industry 4.0, Napędy i sterowanie nr 4., kwiecień 2016
8. Revin A, Dygalo V, Boyko G, Ljaschenko M, Dygalo L.: Methods of monitoring the technical condition of the braking system of an autonomous vehicle during operation, , 2018, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 315 012020
9. Ene G: Continuous monitoring the vehicle dynamics and driver behavior using navigation systems, 2017, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 252 012002
10. Katsuba Y., Grigoreva L.: Application of Artificial Neural Networks in Vehicles' Design Self-Diagnostic Systems for Safety Reasons, Transportation Research Procedia, vol. 20. 2017
11. Fenzhu J, Lijun L.; Study on Braking Stability of Electromechanical Hybrid Braking System in Electric Vehicles Based on ECE Regulation 2011 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring

12. Sankavaram Ch, Pattipati B, Pattipati K, Zhang Y,: Fault Diagnosis in Hybrid Electric Vehicle Regenerative Braking System, IEEE Aerospace Conference Proceedings 2, 2012
13. Subramanian S. C., Darbha S, Rajagopal K. R.,: A Diagnostic System for Air Brakes in Commercial Vehicles, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (Volume: 7, Issue: 3, 2006.
14. Cirocic V., Dragam A.,: Intelligent Control of Automovie Braking System, F2008-SC-046, Automotive department, Faculty of Mechanical Engineering University of Belgrade, Kraljice Marije 16, 11120 Belgrade 35, Serbia
15. Hai-cheng L., Zhou Y.,: Fault Diagnosis by Bayesian Network in System of Poor Braking Efficiency, 2012 4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, 2012
16. Navarro A., Joerdening J., Khalil R., Brown A., Asher Z. D., : Development of an Autonomous Vehicle Control Strategy Using a Single Camera and Deep Neural Networks, WCX World Congress Experience, 2018
17. Bamigboye, O. O., Obaje S. E.: Intelligent Automatic Car Braking Control System Using Neural Network Classifier, International Journal of Engineering Inventions, Volume 5, Issue 06[June 2016], 2016
18. Castro A. A., Weber H. I.: Designing an integrated vehicle control based on a hierarchical architecture to improve the performance of ground vehicles, Proceedings of the 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2015), 2015
19. Gajek A.: Diagnostics monitor of the braking efficiency in the on board diagnostics system for the motor vehicles, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 148, Scientific Conference on Automotive Vehicles and Combustion Engines (KONMOT 2016) 22–23 September 2016, Krakow, Poland
20. Pacejka H.: Tyre and Vehicle Dynamics- 3rd Edition, Elsevier, 2012

21. Li H., Schindler, C., Three-dimensional finite element and analytical modeling of tyre-soil interaction. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, 2013, 227(1), pp. 42-60, 2013
22. Kayri M.: Predictive Abilities of Bayesian Regularization and Levenberg–Marquardt Algorithms in Artificial Neural Networks: A Comparative Empirical Study on Social Data, Mathematical and Computational Applications 2016, 21, 20; doi:10.3390/mca21020020, 2016
23. Sariev E, Germano G: Bayesian regularized artificial neural networks for the estimation of the probability of default, Quantitative Finance, DOI: [10.1080/14697688.2019.1633014](https://doi.org/10.1080/14697688.2019.1633014), 2019
24. Burden F., Winkler D.: Bayesian Regularization of Neural Networks. In: Livingstone D.J. (eds) Artificial Neural Networks. Methods in Molecular Biology™, vol 458. Humana Press, 2008
25. Garrido P, Soares F, Moreira A. P. (editors): CONTROLO 2016: Proceedings of the 12th Portuguese Conference on Automatic Control, 2016. Lecture Notes in Electrical Engineering 402, Springer, 2016
26. Luo J., Namburu M., Pattipati K. R., Qiao L., Chigusa S.: Integrated Model-Based and Data-Driven Diagnosis of Automotive Antilock Braking Systems, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans ( Volume: 40 , Issue: 2 , March 2010 ), 2010
27. Merkisz J., Mazurek S.: Pokładowe systemy diagnostyczne pojazdów samochodowych. WKiŁ, 2002
28. Rajamani R.: Vehicle Dynamics and Control, second edition, 2012, Springer
29. Gustafsson F.: Slip-based tire-road friction estimation. Automatica 33(6):1087--1099, June 1997
30. Amyan A. Aly: Hardware-in-the-loop of Simulation for a Hydraulic Antilock Brake System, I.J. Intelligent Systems and Applications, 2013, 02, 91-95
31. Tumasov A.V., Vashurin A. S., Trusov Y. P., Toropov E. I., Moshkov P. S., Kryaskov V. S., Vasilyev A. S.: The Application of Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulation for Evaluation of Active Safety of Vehicles Equipped with Electronic Stability Control (ESC) Systems

32. Yusob B., Mustafa Z., Shamsuddin S. M.: Preserving the Topology of Self- Organizing Maps for Data Analysis: A Review, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 769 (2020) 012004 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/769/1/012004
33. Dobaj K.: The initial conception of the neural network model for the driving active safety estimation, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – 2018, Vol. 421
34. Szczypiński-Sala W., Dobaj K.: The estimation of friction coefficient of brake pad- disc during braking process in different operating conditions, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – 2018, Vol. 421
35. Gajek A., Strzępek P., Dobaj K.: Algorithms for diagnostics of the hydraulic pressure modulators of ABS / ESP systems in stand conditions, MATEC Web of Conferences– 2018, Vol. 182, doi: 10.1051/mateconf/201818201020
36. Reński A., Pokorski J. Bieliński M., Sar H.: Investigation of Dynamic Properties of a Motor Car in its Curvilinear Motion, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 13, No. 3
37. Gajek A., Strzępek P., Szczypiński- Sala W.: Ocena Metod Pomiarów Opóźnienia Hamowania Pojazdu w Warunkach Drogowych, TRANSCOMP – XIV INTERNATIONAL CONFERENCE, COMPUTER SYSTEMS AIDED SCIENCE, INDUSTRY AND TRANSPORT, 2010
38. Materiały firmy Kistler- arkusz danych urządzenia Correvit L-Motion (źródło: [www.kistler.com](http://www.kistler.com))
39. Bartos K.: Sieć SOM jako przykład sieci samoorganizującej się, EKONOMETRIA 2(36), 2012
40. Zieliński J.: Inteligentne systemy zarządzania. Teoria i praktyka, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999, ISBN: 83-01-12968-9 (45+10)
41. Pozycja internetowa: [www.press.bmwgroup.com/global/photo/detail/P0051332/bmw-7-series-light-systems-adaptive-vertical-beam-control-variable-light-distribution-cornering-light](http://www.press.bmwgroup.com/global/photo/detail/P0051332/bmw-7-series-light-systems-adaptive-vertical-beam-control-variable-light-distribution-cornering-light), data dostępu 28.11.22, godzina 12.30.
42. Polkowski S.: Układy bezpieczeństwa i komfortu jazdy- informator Bosch, praca zbiorowa, WKŁ, 2013



43. Gajek A., Świder P.: Ocena nierówności momentów hamujących kół w pokładowym systemie diagnostycznym pojazdu samochodowego, *Archiwum Motoryzacji* 3, pp. 203-211 (2009)
44. Jaworski J.: Okładziny cierne do hamulców i sprzęgieł pojazdów mechanicznych, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, 1984
45. Volk W.: Statystyka stosowana dla inżynierów, Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa, 1976
46. Pozycja internetowa: [www.mathworks.com/help/releases/R2018a/nnet/gs/cluster-data-with-a-self-organizing-map.html?searchHighlight=SOM&s\\_tid=doc\\_srchtile](http://www.mathworks.com/help/releases/R2018a/nnet/gs/cluster-data-with-a-self-organizing-map.html?searchHighlight=SOM&s_tid=doc_srchtile), data dostępu 3.04.2023, godzina 9.00 (schemat sieci neuronowej SOM)
47. Pozycja internetowa: [www.mathworks.com/help/releases/R2018a/nnet/ref/narnet.html?searchHighlight=nar&s\\_tid=doc\\_srchtile](http://www.mathworks.com/help/releases/R2018a/nnet/ref/narnet.html?searchHighlight=nar&s_tid=doc_srchtile), data dostępu 3.04.2023, godzina 9.10 (schemat sieci neuronowej NAR)
48. Gajek A., Strzępek P.: Założenia i weryfikacja monitora nierówności sił hamowania w pokładowym systemie diagnostycznym układu hamulcowego pojazdu samochodowego. Diagnostyka Maszyn Roboczych i Pojazdów pod redakcją prof. dr hab. inż. Bogdana Żółtowskiego. Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu. Radom – Bydgoszcz 2009.
49. Pozycja internetowa: [www.autocentrum.pl/dane-techniczne/renault/espace/iv/grand-espace/](http://www.autocentrum.pl/dane-techniczne/renault/espace/iv/grand-espace/) (szkiec techniczny samochodu Renault Grand Espace), data dostępu 3.04.2023, godzina 9.45
50. Pozycja internetowa: [unimetal-moto.com/urządzenia-rolkowe/urządzenie-rolkowe-osobowe-rho-6-l/#1471584616574-7031b756-e2dc](http://unimetal-moto.com/urządzenia-rolkowe/urządzenie-rolkowe-osobowe-rho-6-l/#1471584616574-7031b756-e2dc), data dostępu 3.04.2023, godzina 10.00
51. Studziński K. Samochód. Teoria, konstrukcja i obliczanie, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, 1980
52. Mitschke M.: Dynamika samochodu- napęd i hamowanie, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, 1987

## 12. Streszczenie

W pracy przedstawiono monitor diagnostyczny układu hamulcowego pojazdu samochodowego, możliwy do wykorzystania w warunkach jego bieżącej eksploatacji. Zakres prac związanych z realizacją procedur diagnostycznych wynikał z przeprowadzonej analizy literaturowej aktualnego stanu wiedzy. Sformułowano monitor diagnostyczny, bazujący na równaniach ruchu prostoliniowego hamowanego samochodu, pozwalający na całościową diagnostykę układu hamulcowego oraz na diagnostykę hamulców poszczególnych kół pojazdu. Obydwa warianty zostały zweryfikowane doświadczalnie na podstawie badań drogowych. Badania drogowe polegały na realizacji procesów prostoliniowego hamowania samochodu osobowego w różnorodnych warunkach. Warunki te obejmowały zarówno różną intensywność hamowania jak i różną prędkość początkową pojazdu, kąt nachylenia jezdni, zmienianą masę pojazdu, różne ciśnienie w ogumieniu.

W celu zwiększenia dokładności diagnostyki realizowanej z wykorzystaniem hamowań o zmiennej dynamice i hamowań krótkotrwałych, zastosowano metody analizy danych oparte o sztuczne sieci neuronowe. Stanowiły one uzupełnienie analitycznej formy monitora diagnostycznego układu hamulcowego. Monitor diagnostyczny, uzupełniony o algorytmy analizy danych oparte o sieci neuronowe, również zweryfikowano w oparciu o doświadczalne procesy hamowania, przeprowadzane w różnorodnych warunkach. Następnie dokonano analizy możliwości rozpoznania niesprawności hamulców z wykorzystaniem zarówno analitycznej formy monitora diagnostycznego jak i jego wariantów uzupełnionych o zastosowanie sztucznych sieci neuronowych.

### **13. Summary**

The work presents a diagnostic monitor for the braking system of a motor vehicle, which can be used in the conditions of its current operation. The scope of work, related to the implementation of diagnostic procedures, resulted from the literature analysis of the current state of knowledge. A diagnostic monitor was formulated, based on the equations of rectilinear motion of the braking car. The formulated monitor allowed for a comprehensive diagnostics of the braking system and the diagnostics of the brakes of individual vehicle wheels. Both variants have been experimentally verified on the basis of road tests. The road tests included rectilinear braking processes of a passenger car, performed in various conditions. These conditions included: different intensity of braking, different vehicle initial speed, change of road inclination angle, changed vehicle weight, and different tire pressure.

In order to increase the accuracy of diagnostics, performed with the use of braking processes with variable dynamics and short-time braking processes, data analysis methods based on artificial neural networks were applied. They complemented the analytical form of the diagnostic monitor of the braking system. The diagnostic monitor, supplemented with data analysis algorithms based on neural networks, was also verified based on experimental braking processes carried out in various conditions. Then, the possibility of recognizing brake failure was analyzed using both the analytical form of the diagnostic monitor and its variants supplemented with the use of artificial neural networks.