

Automatic classifier of the kind of car shock absorber damage

Abstract: The article presents an analysis of the impact of external factors (extra load, tire pressure changes) on the value of the EUSAMA ratio. A method of automatic diagnosis of shock absorbers is proposed. This method is based on image analysis using a neural network appraising the "EUSAMA plus" ratio in the time domain. For the purpose of this paper a mathematical model of quarter of the car suspension with the test stand based on the method EUSAMA was prepared. The method of automatic diagnosis of shock absorbers assumes the correctness of the EUSAMA test. The results met expectations.

Keywords: shock absorber diagnosis, EUSAMA method, neural network, image analysis, automatic classifier

Automatyczny klasyfikator rodzaju uszkodzenia amortyzatora samochodowego

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę wpływu czynników zewnętrznych (dodatkowe obciążenie, zmiany ciśnienia w oponach) na wartość wskaźnika EUSAMA. Jednocześnie zaproponowano automatyczną metodę diagnozowania stanu amortyzatorów przy pomocy analizy obrazów z wykorzystaniem sieci neuronowej oceniającej przebieg wartości wskaźnika EUSAMA w czasie. Na potrzeby pracy przygotowano model matematyczny części zawieszenia wraz ze stanowiskiem badawczym opartym o metodę EUSAMA plus. Zamodelowano układ odzwierciedlający dynamikę jednej czwartej zawieszenia pojazdu. Metoda automatycznego diagnozowania stanu amortyzatorów zakłada poprawność przeprowadzonego badania metodą EUSAMA. Uzyskane wyniki spełniły oczekiwania.

Słowa kluczowe: diagnozowanie amortyzatorów, metoda EUSAMA, sieć neuronowa, analiza obrazu, automatyczny diagnosta, klasyfikator

1. Wstęp

Układ jezdny w samochodzie zaliczany jest do podstawowych zespołów konstrukcyjnych pojazdu. Jest on w dużym stopniu odpowiedzialny za bezpieczeństwo podczas jazdy. Z tego względu stan techniczny zawieszenia kół jest jednym z czynników wpływających na bezpieczeństwo na drogach [1], [9]. Niesprawny układ jezdny z prawdopodobieństwem sięgającym nawet 20% może być przyczyną wypadków drogowych [15]. Dlatego tak ważną jest regularna i należyta kontrola stanu technicznego elementów tłumiących w zawieszeniu. To właśnie one odpowiedzialne są za przyczepność koła podczas jazdy samochodem. Niewystarczające tłumienie w zawieszeniu sprzyja odrywaniu się koła od podłoża. Może być bezpośrednią przyczyną utraty sterowności przez pojazd oraz w znacznym stopniu wydłuża drogę hamowania. W samochodach osobowych najczęściej stosowane są obecnie teleskopowe amortyzatory hydrauliczne.

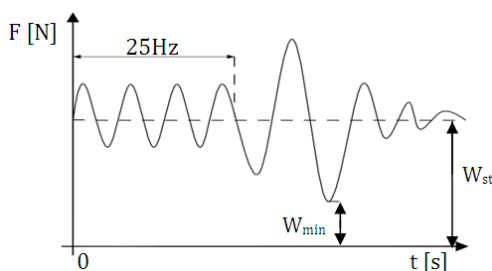
Na tłumienie drgań w układzie jezdny mają wpływ amortyzatory, opon, sprężyny, elementy gumowe zawieszenia. O wartości tłumienia decydują jednak głównie parametry amortyzatorów. W trakcie ostatniego dwudziestolecia opracowano wiele metod służących do określania stanu amortyzatorów samochodowych bez konieczności ich demontażu. Niniejsza praca bazować będzie na metodzie EUSAMA. W artykule przeanalizowany zostanie wpływ czynników zewnętrznych na wartość wskaźnika EUSAMA. Jak wiadomo z innych

prac [2], [3], [6], [8], [16] zmiana obciążenia statycznego w samochodzie oraz zmiana ciśnienia w ogumieniu w znacznym stopniu wpływają na wartość współczynnika EUSAMA uzyskanego podczas badania na Stacji Kontroli Pojazdów. Jednocześnie należy zaznaczyć, że metoda ta nie daje pełnego obrazu uszkodzenia amortyzatora a jedynie stanowi pewien rodzaj badania przesiewowego. W niniejszym artykule zostanie zaproponowana innowacyjna metoda analizy przebiegu wskaźnika EUSAMA w czasie pozwalająca na identyfikację rodzaju uszkodzenia w amortyzatorze.

2. Metoda EUSAMA

Metoda EUSAMA została opracowana przez Europejskie Stowarzyszenie Producentów Amortyzatorów aby uprościć badanie sprawności amortyzatorów samochodowych [5]. Z założenia metoda ta miała być prosta w implementacji i dawać zgrubne, niezależne od rozwiązań technicznych układu jezdny, wyniki. Skuteczność tłumienia amortyzatorów określa wskaźnik EUSAMA definiowany jako iloraz minimalnej siły dynamicznej przylegania opony do podłoża do siły statycznej. Wskaźnik ten określa procentowe przylegania koła do powierzchni podłoża. Na początku badania koło samochodu spoczywa na nieruchomej płycie. Wtedy dokonywany jest pomiar siły statycznej nacisku na powierzchnię płyty. Następnie płyta zostaje wprowadzona w ruch drgający o amplitudzie do 8 mm oraz częstotliwości sięgającej 25 Hz. Po wyłączeniu

napędu drgania są tłumione przez elementy zawieszenia i przy częstotliwości około 16 Hz dynamiczna siła nacisku koła na podłoże jest najmniejsza. Częstotliwość tak jest częstotliwością rezonansową mas nieresorowanych samochodu. Jeżeli podczas badania koło oderwie się od płyty, to wskaźnika EUSAMA wyniesie zero. Tak zdefiniowana metoda niezależna jest od parametrów technicznych zawieszenia zastosowanego w badanym pojeździe. Wadą metody jest silna wrażliwość na sztywność opony oraz obciążenie statyczne pojazdu. Rysunek 1 przedstawia graficzną interpretację wskaźnika EUSAMA. W początkowej części przebiegu widoczne jest wymuszenie z częstotliwością 25 Hz. Po jego ustaniu mierzona jest właściwa wartość wskaźnika EUSAMA.



Rys. 1. Graficzna interpretacja wskaźnika EUSAMA
Fig. 1. Graphic interpretation of EUSAMA ratio

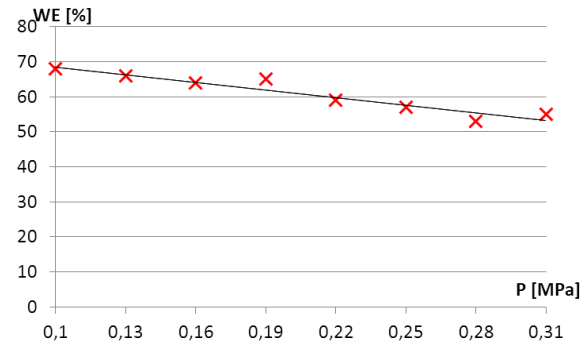
Przyjęto czterostopniowe kryterium oceny sprawności amortyzatorów. Amortyzatory cechujące się wartością WE na poziomie mniejszym niż 20% klasyfikują się do natychmiastowej wymiany. Ocena w przedziale 21% do 40% oznacza konieczność wykonania dodatkowego badania klasyfikacyjnego. Amortyzatory cechujące się wartością współczynnika EUSAMA na poziomie 41% do 60% zostają dopuszczone do ruchu. WE o wartości większej niż 60% oznacza bardzo dobry stan amortyzatorów. Ograniczona jest również różnica w wyniku pomiarów pomiędzy stronami samochodu. Nie powinna ona przekraczać 20%.

Metoda EUSAMA plus dokonuje pomiaru współczynnika EUSAMA dla każdej z ustabilizowanych częstotliwości w przedziale 1 do 30 Hz z krokiem 1 Hz. Wartości dla każdej częstotliwości są nanoszone na wykres w postaci funkcji w dziedzinie stosunku mas resorowanych do nieresorowanych. Na tej podstawie klasyfikowane są amortyzatory. Jest to metoda o wiele dokładniejsza od podstawowej metody EUSAMA.

3. Wpływ czynników zewnętrznych na wartość wskaźnika EUSAMA

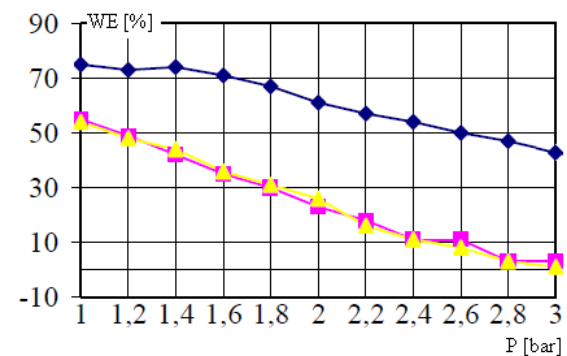
Autorzy wielu publikacji [2], [3] wykazują silną zależność pomiędzy ciśnieniem w oponie a wartością wskaźnika EUSAMA. Na potrzeby pracy przeprowadzono badania weryfikacyjne dla stałego obciążenia nominalnego pojazdu przy

zmieniającym się ciśnieniu w oponach w zakresie 0,10 do 0,31 MPa. Rysunek 2 przedstawia średnią arytmetyczną z uzyskanych wyników dla kół osi tylnej samochodu Volkswagen Golf IV w wersji nadwoziowej hatchback. Na wykres naniesiono aproksymację w postaci trendu liniowego. Przed badaniem stan zawieszenia badanego pojazdu został określony jako dobry. Wartość WE dla nominalnego ciśnienia w oponach wynosiła 61%.



Rys. 2. Wartość WE dla kół osi tylnej badanego samochodu dla zmieniającego się ciśnienia w kołach
Fig. 2. EUSAMA ratio for the rear axle of the test vehicle with changing tire pressure

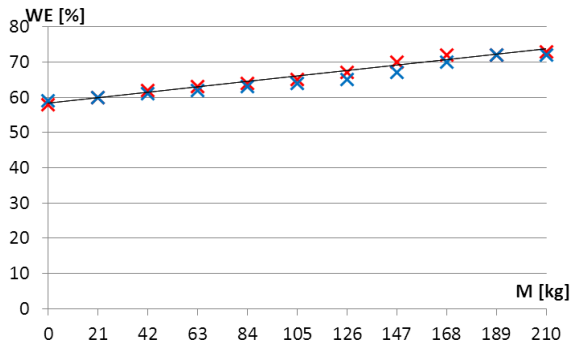
Dla porównania rysunek 3 przedstawia wyniki uzyskane przez autorów artykułu [3]. Samochód Skoda był w wersji nadwoziowej kombi. Pozostałe dwa samochody były w wersji nadwoziowej hatchback. Samochody, których tył nadwozia jest cięższy, są nieco mniej podatne na manipulację ciśnieniem w oponie. Mimo to trend jest zachowany. Wartość WE jest odwrotnie proporcjonalna do ciśnienia w oponie.



Rys. 3. Wartości WE dla koła tylnego lewego. Niebieski – Skoda Fabia, czerwony – Fiat Punto 2004, żółty – Fiat Punto 2006 [3]
Fig. 3. EUSAMA ratio for the rear left wheel of the test vehicles. Blue - Skoda Fabia, red - Fiat Punto 2004, yellow - Fiat Punto 2006 [3]

W publikacjach [6], [8], [16] autorzy wykazują brak powtarzalności metody EUSAMA oraz jej czułość na zmiany obciążenia statycznego. Wartość WE jest proporcjonalna do dodatkowego obciążenia statycznego. Rysunek 4 przedstawia zależność wartości WE od dodatkowego obciążenia statycznego umieszczonego we wspomnianym wcześniej

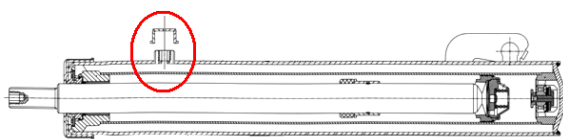
samochodzie testowym Volkswagen. Samochód w teście tym obciążany był dodatkowym ładunkiem w zakresie 0 do 210 kg z krokiem 21 kg. Badana była sprawność amortyzatorów kół tylnych. Z tego względu obciążenie w głównej mierze umieszczone zostało w bagażniku.



Rys. 4. Wartości wskaźnika EUSAMA dla kół tylnych. Czerwony – koło prawe, niebieski – koło lewe
Fig. 4. EUSAMA ratio for the rear wheels of the test vehicle.
Red – right wheel, blue – left wheel

4. Identyfikacja parametrów modelu

W pierwszej kolejności przy pomocy stanowiska do badań amortyzatorów niezabudowanych określono charakterystyki tłumienia amortyzatorów o różnym stopniu zużycia. Przeprowadzono również badania dla amortyzatora z zasymulowaną usterką polegającą na zmniejszonej ilości oleju. Do tego celu zmodyfikowano nowy amortyzator. Sposób modyfikacji amortyzatora został przedstawiony na rysunku 5. Sama modyfikacja nie wpłynęła na tłumienie amortyzatora. Zmiana ilości oleju w zakresie: 25% do 100% z krokiem 25% wykazała czułość amortyzatora na ubytek oleju. Wraz z ubytkiem oleju pogarsza się tłumienie amortyzatora. Proces ten nie jest symetryczny ani liniowy.

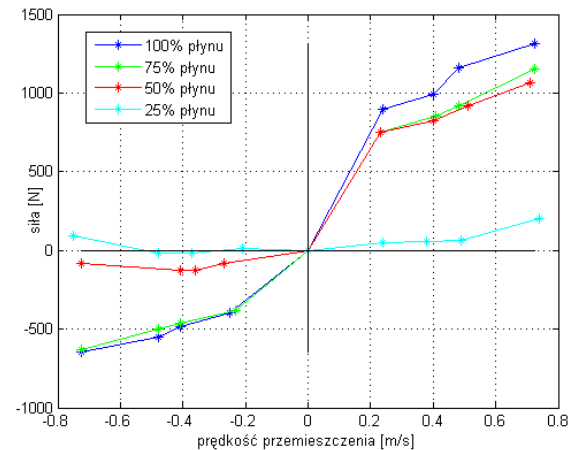


Rys. 5. Modyfikacja amortyzatora umożliwiającą wpływ na ilość oleju wewnątrz
Fig. 5. The modification allows changing amount of oil inside the shock absorber

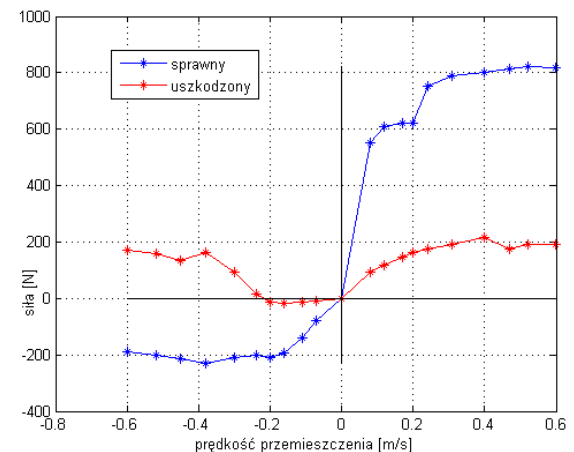
Przy pomocy stanowiska uzyskano charakterystyki tłumienia amortyzatora o zmieniającej się ilości oleju. Charakterystyki te przedstawione są na rysunku 6. Widać, że w pierwszej kolejności pogarszają się tłumienie podczas rozciągania amortyzatora. Następnie pogorszeniu ulega również tłumienie amortyzatora podczas jego ściskania.

Rysunek 7 przedstawia z kolei charakterystyki dwóch takich samych amortyzatorów o różnym stopniu zużycia. Kolorem niebieskim przedstawiono charakterystykę amortyzatora nowego. Kolorem

czerwonym zaznaczono charakterystykę amortyzatora zużytego.

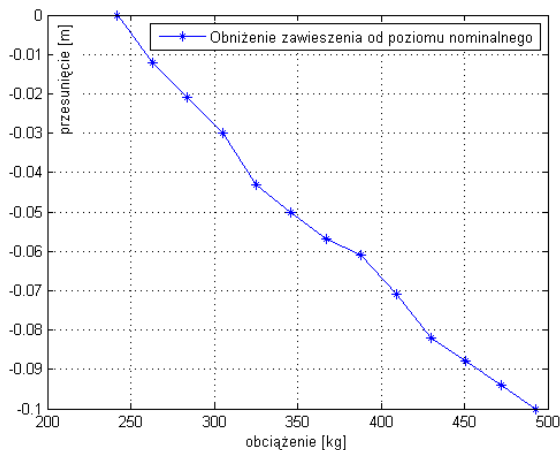


Rys. 6. Wpływ ubytku oleju na charakterystykę tłumienia amortyzatora
Fig. 6. Effect of the loss of oil to the characteristics of the shock absorber damping



Rys. 7. Charakterystyki amortyzatora sprawnego i zużytego
Fig. 7. The damping he characteristics of an efficient and used shock absorber

Na potrzeby symulacji wyznaczono doświadczalnie inne wartości parametrów modelu. Na podstawie próby obciążenia opon znaną siłą ustalono ich sztywność dla ciśnienia znamionowego wynoszącego 0,2 MPa. Na podstawie przeprowadzonej próby obciążenia pojazdu znaną siłą ustalono sztywność zawieszenia samochodu testowego. Rysunek 8 przedstawia ugięcie zawieszenia pod wpływem dodatkowego obciążenia.

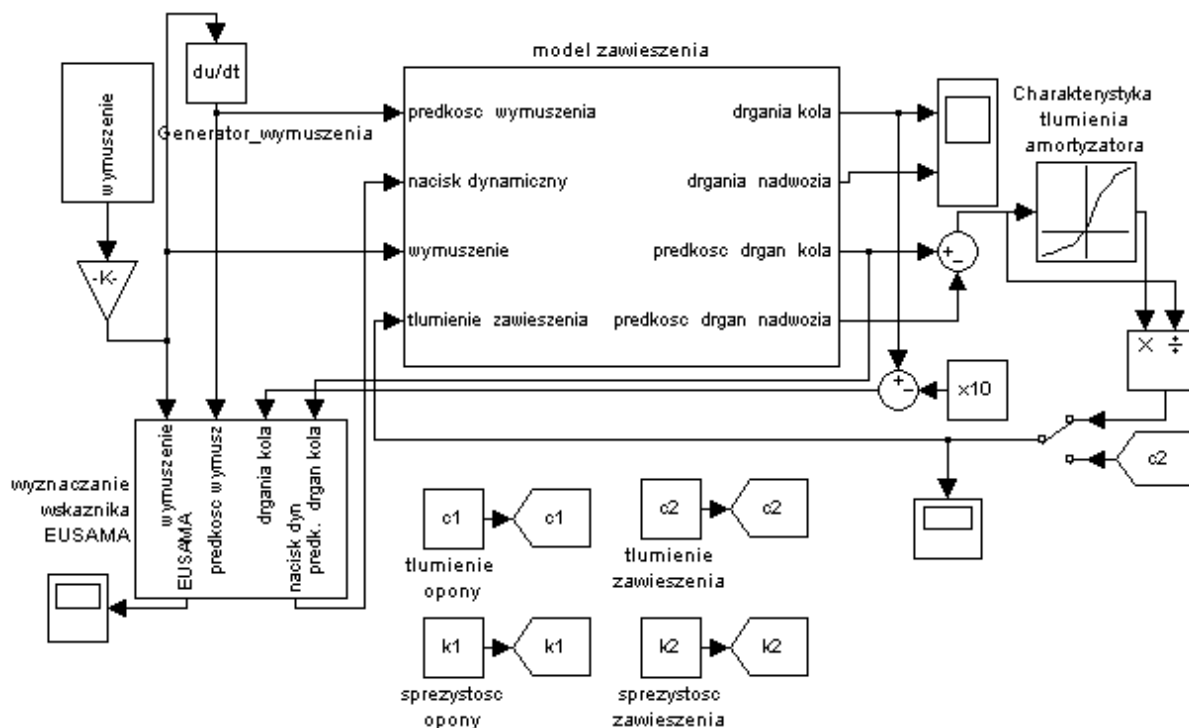


Rys. 8. Zależność ugięcia zawieszenia od dodatkowego obciążenia
 Fig. 8. Suspension deflection dependence on the additional load

5. Model matematyczny zawieszenia

Dla usprawnienia procesu analizy przebiegu wskaźnika EUSAMA w czasie opracowano model matematyczny zawieszenia jednego koła. Podstawy fizyczne, wyprowadzenie oraz uproszczenie zastosowane w modelu zostały szczegółowo opisane w książce [12]. Również inni autorzy [7], [10], [11] używali podobnych modeli do odwzorowania drgań w układzie zawieszenia pojazdów samochodowych uzyskując satysfakcjonujące wyniki.

Model matematyczny zawieszenia jednego koła umieszczono na wirtualnym stanowisku wyznaczającym wartość współczynnika EUSAMA plus. W modelu uwzględnione zostały faktyczne charakterystyki tłumienia amortyzatorów wyrażone zależnością siły tłumienia od prędkości przemieszczania się tłoczyska. Rysunek 9 przedstawia schemat blokowy modelu matematycznego ćwiartki samochodu wraz ze stanowiskiem pomiarowym EUSAMA plus.



Rys. 9. Schemat modelu matematycznego ćwiartki samochodu wraz ze stanowiskiem diagnostycznym EUSAMA
 Fig. 9. Mathematical model diagram of the quarter car suspension with the EUSAMA test stand

6. Przebieg symulacji oraz jej wyniki

Zamodelowany układ dynamiczny poddawany był wymuszeniu o stałej amplitudzie i zmieniającej się częstotliwości w zakresie od 1 do 30 Hz z krokiem wynoszącym 1 Hz. Każda z częstotliwości utrzymywana była przez okres 5 sekund. Gwarantowało to przejście układu ze stanu nieustalonego do stanu ustabilizowanej odpowiedzi na wymusze-

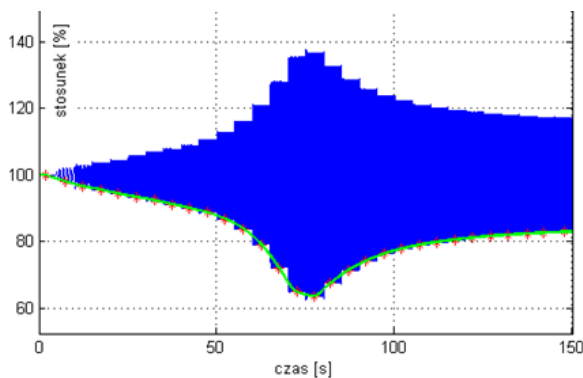
nie. Stosunek nacisku dynamicznego do statycznego był podstawą do wyznaczenia wskaźnika EUSAMA dla każdej z częstotliwości w połowie przedziału. Tak otrzymane punkty interpolowane były wielomianem Hermita. Uzyskana stanowiła sygnał diagnostyczny analizowany przez algorytm.

Rysunek 10 przedstawia przebieg zmienności nacisku dynamicznego dla amortyzatora sprawnego. Na niebiesko zaznaczono stosunek nacisku

dynamicznego koła do statycznego na podłoże. Na czerwono są punktowe wartości wskaźnika EUSAMA w połowie przedziału danej częstotliwości. Na zielono wykreślono estymatę przebiegu wskaźnika EUSAMA.

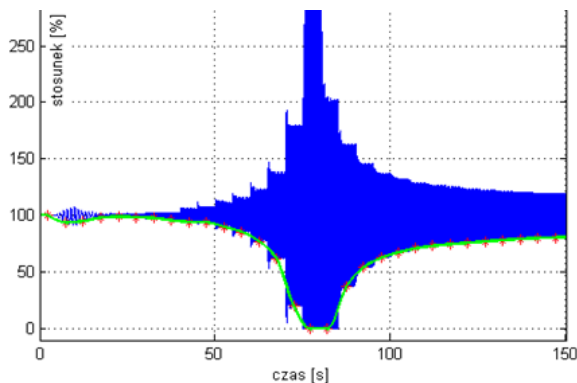
Rysunek 11 przedstawia przebieg zmienności nacisku dynamicznego koła dla amortyzatora zużytego. Oznaczenia są adekwatne jak na poprzednim rysunku.

Wykorzystując opracowany model z łatwością można obserwować wpływ czynników zewnętrznych takich jak dodatkowe obciążenia i zmiana ciśnienia na przebieg wartości wskaźnika EUSAMA (rys. 12). Prócz wartości WE przesunięciu ulega częstotliwość rezonansowa układu mas nieresorowanych.



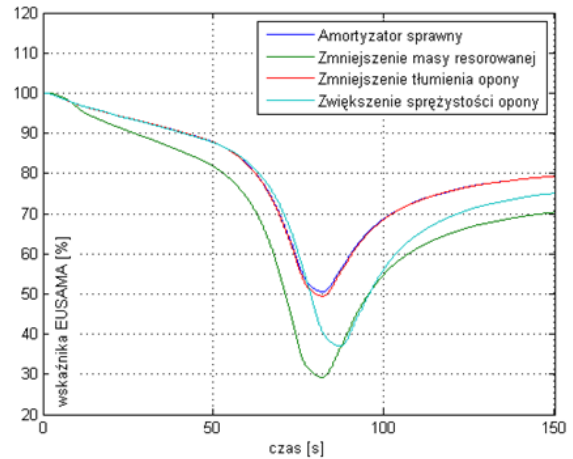
Rys. 10. Przebieg zmienności nacisku dynamicznego dla amortyzatora sprawnego

Fig. 10. Shape of the dynamic pressure variation for efficient shock absorber



Rys. 11. Przebieg zmienności nacisku dynamicznego dla amortyzatora zużytego

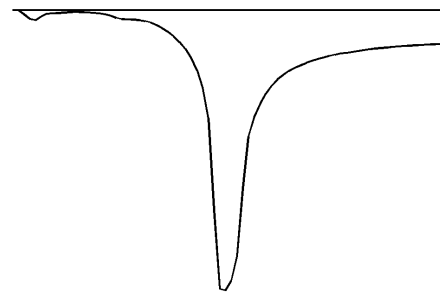
Fig. 11. Shape of the dynamic pressure variation for damaged shock absorber



Rys. 12. Przebieg wartości WE dla różnych parametrów
Fig. 12. EUSAMA rate for different model parameters

7. Automacyjny klasyfikator uszkodzeń amortyzatorów

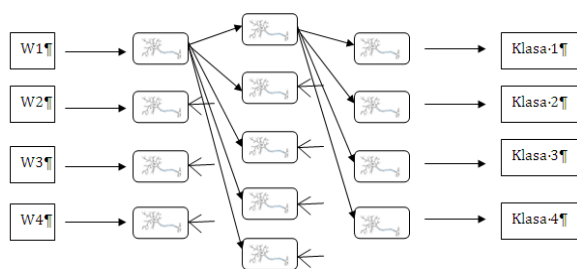
Celem badań było opracowanie koncepcji nowej metody diagnozowania amortyzatorów zabudowanych w samochodzie przy pomocy dedykowanych do tego celu urządzeń poddanych niewielkim modyfikacjom. Przy takich założeniach powstał mechanizm analizujący obraz graficzny jaki powstaje z przebiegu wartości wskaźnika „EUSAMA plus” w czasie od góry zamkniętego prostą na poziomie 100%. Rysunek 13 przedstawia przykładową figurę, która stanowi podstawę sygnału diagnostycznego.



Rys. 13. Przykładowa figura powstająca z estymaty WE stanowiąca miarę diagnostyczną
Fig. 13. Sample figure arising from the EUSAMA rate estimate representing diagnostic measure

Na potrzeby analizy obrazu (rys. 13) została zaimplementowana sieć neuronowa. Sieć ta przyporządkowywała uzyskiwany sygnał do jednej z czterech klas określających stan amortyzatora. W pierwszej klasie amortyzator był w pełni sprawny. Każda następna klasa charakteryzowała się 25% większym ubytkiem oleju. Do klasyfikacji stanu amortyzatora wybrano wielowarstwową sieć neuronową jednokierunkową z jedną warstwą ukrytą. Rysunek 14 przedstawia strukturę sieci. Sieć składa się z czterech neuronów wejściowych, pięciu neuronów warstwie pośredniej oraz czterech neuronów w warstwie wyjściowej. Dla warstwy ukrytej zasto-

sowano funkcję przejścia w postaci tangensa hiperbolicznego sigmoidy.



Rys. 14. Struktura sieci neuronowej klasyfikatora
Fig. 14. The structure of the neural network classifier

Wektor uczący składał się z 4 elementów:

- W1** - minimalna wartość wskaźnika EUSAMA.
- W2** - minimalna wartość wskaźnika EUSAMA dla wymuszenia o częstotliwości 2 Hz.
- W3** - stosunek średnicy transwersalnej do średnicy sprzężonej elipsy o takim samym znormalizowanym momencie centralnym drugiego rzędu co obszar zamknięty nad krzywą wyznaczoną przez wskaźnik EUSAMA. Od góry krzywa ta domknięta jest przez linię prostą biegnącą na poziomie 100%.
- W4** – stosunek średnic Fereta.

Wektor wyjściowy również składał się z czterech elementów. Elementy te mogły przyjmować tylko jedną z wartości binarnych. Wektor wyjściowy musiał mieć taką postać, by sygnał wejściowy przypisywany był tylko do jednej z klas wyjściowych.

Proces nauczania sieci zakończył się powodzeniem już po 9 epokach. Dla innych weryfikowanych struktur sieci neuronowych proces ten kończył się po większej liczbie epok. Każda z rozważanych sieci równie dobrze radziła sobie z zadaniem. Mniejsza liczba epok koniecznych do nauki sieci neuronowej jest zaletą, dzięki której późniejsze douczanie sieci będzie trwało krócej.

8. Weryfikacja działania klasyfikatora

Klasyfikator został nauczony przy wykorzystaniu jednego zestawu danych pochodzących z amortyzatora o zmieniającej się ilości oleju. Jako dane sprawdzające zastosowano parametry dwóch identycznych amortyzatorów o różnym stopniu zużycia. Należy pamiętać, że dane uczące były przez sieć rozpoznawane ze 100% pewnością.

Pośród danych sprawdzających amortyzator sprawny został rozpoznany poprawnie z prawdopodobieństwem nieco ponad 80%. Amortyzator zużyty, ze znacznym ubytkiem oleju został przypisany do ostatniej klasy z prawdopodobieństwem sięgającym 92%.

Klasyfikator został zweryfikowany również w warunkach zakłóconego pomiaru. Klasyfikator oparty o przebieg wartości wskaźnika EUSAMA jest również czuły na zakłócenia. Zakłócenia skutkują błędnym klasyfikowaniem amortyzatorów.

9. Wnioski

Metoda analizy obrazu wykorzystująca w swej strukturze sieć neuronową dobrze przystosowuje się do rozpoznawania sygnałów diagnostycznych i może z powodzeniem zostać zastosowana jako kolejna ewolucja metody EUSAMA zwiększająca jej funkcjonalność. Aby możliwy był dalszy rozwój koncepcji konieczne jest przeprowadzenia symulacji z użyciem większej liczby charakterystyk tłumienia amortyzatorów. Model należy jeszcze zweryfikować z wykorzystaniem parametrów innego niż testowy samochodu. W związku z elastycznością jaką daje sieć neuronowa możliwy jest rozwój koncepcji metody. Kolejne dane umożliwią douczenie sieci neuronowej i poprawne rozpoznawanie większej liczby przypadków.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

F	Sila nacisku [N]	WE	Wartość wskaźnika EUSAMA [%]
W_{\min}	Minimalny nacisk dynamiczny koła [N]	P	Ciśnienie w oponach [MPa], [bar]
W_{st}	Nacisk statyczny koła na podłoże [N]	M	Dodatkowe obciążenie [kg]

Bibliography/Literatura

- [1] Burdzik R.: Automatyczne diagnozowanie stanu technicznego amortyzatorów zabudowanych w samochodach osobowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Katowice 2006.
- [2] Burdzik R., Konieczny Ł.: Diagnosing of Shock absorbers of car vehicles at changeable pressure in tires. Diagnostyka vol. 3, No. 51, pp. 27-31, 2009.
- [3] Filipiak R., Jósko M.: Badania wpływu ciśnienia w oponach pojazdów samochodowych na skuteczność tłumienia ich układu zawieszenia. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering vol. 54, No. 2, pp. 42-47, 2009.
- [4] Gardulski J.: Wavelet classifier used for diagnosing shock absorbers in cars. Transport Problems vol. 2, No. 3, pp. 115-123, 2007.
- [5] Gardulski J.: Metody badania amortyzatorów samochodów osobowych. Diagnostyka vol. 3, No. 51, pp. 93-100, 2009.

-
- [6] Gardulski J., Konieczny Ł.: Wpływ obciążenia statycznego na tłumienie kolumny hydro-pneumatycznej. *Diagnostyka* vol. 4, No. 40, pp. 33-36, 2006.
- [7] Gładyszek P., Tomaszewski S., Wpływ uwzględnienia rzeczywistej charakterystyki tłumienia amortyzatora na modelowanie drgań samochodu. *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Maszyny Robocze i Transport* vol. 55, pp. 201-208, 2002.
- [8] Kupiec J., Ślaski G.: Błędy w ocenie zdolności tłumienia amortyzatorów przy badaniu z wykorzystaniem wskaźnika Eusama. *Diagnostyka* vol. 1 No. 30, pp. 301-304, 2004.
- [9] Kuranc A.: Diagnostyczne badania zawieszenia pojazdu w aspekcie zmian parametrów eksploatacyjnych. *Inżynieria Rolnicza* vol. 8, No. 117, pp. 99-106, 2009.
- [10] Lozia Z., Zdanowicz P.: Zastosowanie modelu "ćwiartki samochodu" do symulacji testu diagnostycznego stanu amortyzatorów. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport* vol 63, pp. 163-170, 2007.
- [11] Makowski M., Grzesiewicz W.: Modelowanie drgań układu mechanicznego ze sterowanymi amortyzatorami. *Modelowanie inżynierskie* vol. 36, pp. 221-228, 2008.
- [12] Reński A.: Zawieszenia w: Reński A.: *Budowa samochodów. Układy hamulcowe i kierownicze oraz zawieszenia*. Oficyna Wydawnicza PW, pp. 157-205, 2004.
- [13] Ślaski G., Pikosz H.: Wpływ zmian tłumienia w zakresie zmienności charakterystyki amortyzatora na pionowe obciążenia dynamiczne kół. *Logistyka* vol 6, 2010.
- [14] Tadeusiewicz R., Korochod P.: *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*, Wyd. Fundacji Postępu Telekomunikacji, chapt. 6.4.6 – 6.4.7, 1997.
- [15] Walusiak S., Pietrzyk W., Sumorek A.: Ocena diagnostyczna stanu technicznego pojazdów samochodowych w wybranej stacji diagnostycznej. *Motrol* vol. 5, pp. 219-226, 2003.
- [16] Zdanowicz P.: Problematyka oceny stanu amortyzatorów na stanowisku EUSAMA. *Logistyka* vol 4, 2010.
- [17] Żmuda J., Barski M., Jędruch W.: *Sztuczne sieci neuronowe. Podstawy teorii i zastosowania*. PWN, Warszawa 1996.

Dawid Cempiel, MSc. – PhD student in the Faculty of Machine Design and Information Technology, University of Bielsko-Biala. Researcher at the Engine Research Department, BOSMAL in Bielsko-Biala.

mgr inż. Dawid Cempiel – doktorant na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki ATH Bielsko-Biala. Inżynier ds. badań w Zakładzie Badań Silników, BOSMAL Bielsko-Biala.

