

Metodyka i wyniki badań wybranych amortyzatorów o regulowanym tłumieniu z wykorzystaniem systemu czasu rzeczywistego.

GRZEGORZ ŚLASKI, WALDEMAR WALERJAŃCZYK

Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych

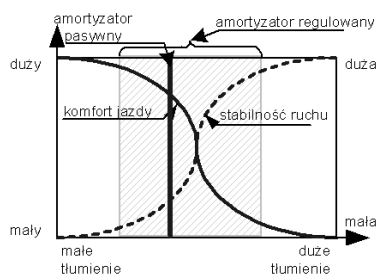
Dostępne na rynku amortyzatory o regulowanej w czasie rzeczywistym charakterystyce tłumienia różnią się zarówno co do istoty funkcjonowania, jak i co do bardziej szczegółowych cech funkcjonalnych. W artykule przedstawiono możliwe do zastosowania typy takich amortyzatorów omawiając budowę i funkcjonowanie zarówno amortyzatorów magnetoreologicznych, jak i amortyzatorów wykorzystujących regulację przy pomocy zaworów proporcjonalnych. Dla wybranych amortyzatorów, omówiono sposób sterowania zaworem oraz przedstawiono metodykę i wyniki badań charakterystyk pracy wybranych konstrukcji. Badania wykonano przy użyciu stanowiska do badań amortyzatorów wymontowanych z pojazdu przy wyposażeniu go w układ sterowania pracą amortyzatora w czasie rzeczywistym oraz system pomiaru parametrów pracy amortyzatora. Do wykonania badań pozwalających określić charakterystyki sterowania amortyzatorów, ich odpowiedzi skokowe, czułość i wpływ prędkości pracy i skoku amortyzatora na jakość sterowania zostały wykorzystane procedury sterujące opracowane w środowisku Matlab/Simulink i zaimplementowane w systemie prototypowania sterowników czasu rzeczywistego. Wykonano również badania wpływu różnych wariantów parametrów sygnałów sterujących na jakość sterowania. Uzyskane wyniki wraz z analizą ich znaczenia dla budowy systemów zawieszonych półaktywnych zostały przedstawione w końcowej części pracy. Omówiono również wnioski dotyczące samej metodyki badawczej.

1. Wstęp

Zawieszenia samochodów - jako układy drgające dla prawidłowej pracy zapewniającej komfort i bezpieczeństwo podróży - wymagają stosowania odpowiednich tłumików drgań. Rolę tę w zawieszeniach współczesnych samochodów pełnią amortyzatory hydrauliczne. Charakteryzują się one zmienną siłą tłumienia w zależności od prędkości, z jaką amortyzator podlega ścisaniu lub rozciąganiu.

W większości przypadków poprzez odpowiedni dobór statycznych parametrów konstrukcyjnych amortyzatora udaje się uzyskiwać charakterystyki wymagane dla właściwej pracy zawieszenia.

Jednakże ze względu na zmienność takich parametrów, jak masa pojazdu, zmienność wymuszeń kinematycznych od drogi oraz przede wszystkim zmienność warunków ruchu pojazdu powodujących pogłębianie się sprzeczności pomiędzy kryterium komfortu a kryterium bezpieczeństwa w zakresie stateczności ruchu, dobór charakterystyk amortyzatora jest trudny i wymaga ciągłej modyfikacji granicy kompromisu pomiędzy komfortem a bezpieczeństwem. Tradycyjne amortyzatory projektowane tak, aby modelować pewien założony konstrukcyjnie kompromis pomiędzy tymi sprzecznymi wymaganiami posiadają więc wbudowane ograniczenie, które długi czas było trudne do przezwyciężenia. W wielu ośrodkach badawczych na całym świecie przez ostatnie 20 lat prowadzono prace, które w efekcie pozwoliły na znaczne rozszerzenie obszaru modelowania kompromisu pomiędzy komfortem a bezpieczeństwem. Różnica, jaka wynika z możliwości zastosowania regulowanej w czasie rzeczywistym siły tłumienia w amortyzatorach w porównaniu z tradycyjnymi amortyzatorami - określanymi od tej pory mianem pasywnych - pokazana została na rysunku 1.



Rys. 1. Ilustracja graficzna kompromisu pomiędzy komfortem i bezpieczeństwem przy doborze tłumienia oraz różnic w możliwościach amortyzatora regulowanego i pasywnego.

Fig. 1. Graphical illustration of safety and comfort compromise and differences of possibilities of adjustable and passive shock absorber.

W chwili obecnej istnieje na rynku kilka różnych konstrukcji amortyzatorów, które pozwalają uzyskiwać zmienność siły tłumienia przy tej samej prędkości pracy poprzez regulację dokonywaną drogą elektroniczną.

Stwarza to nowe możliwości dla konstruktorów zawiesznień i elektronicznych systemów sterujących wpływających na stateczność ruchu samochodu. Mając do dyspozycji amortyzatory pozwalające w elastyczny sposób ustalać aktualną siłę tłumienia, pozostaje umiejętnie wykorzystanie tej cechy w zintegrowanych sterownikach dynamiki jazdy samochodu.

Aby jednak w sposób właściwy wykorzystywać możliwości, jakie dają takie amortyzatory konieczna jest znajomość ich charakterystyk nie tylko w tradycyjnym ujęciu – zależności siły tłumienia od prędkości pracy, ale również charakterystyk istotnych z punktu widzenia projektowania układów sterowania takimi amortyzatorami.

2. Rozwiązania konstrukcyjne amortyzatorów o regulowanym tłumieniu

Wśród dostępnych na rynku rozwiązań dających możliwość elektronicznej regulacji siły tłumienia spotkać się można z dwiema odmiennymi kategoriami konstrukcji:

- amortyzatory wykorzystujące elektromagnetyczne zawory proporcjonalne do zmiany przekroju kanałów obejściowych w zewnętrznych bądź wewnętrznych zaworach amortyzatora,
- amortyzatory wykorzystujące zmienne w zależności od natężenia pola magnetycznego własności reologiczne specjalnych cieczy (ciecze magnetoreologiczne) używanych w amortyzatorach.

W niniejszej pracy autorzy prezentują wyniki badań dwóch konstrukcji amortyzatorów z pierwszej grupy – wykorzystujących zawory proporcjonalne do uzyskiwania zmiennej w sposób ciągły siły tłumienia amortyzatora. Warto podkreślić możliwość uzyskiwania ciągłej w pewnych granicach siły tłumienia. Jest to najnowsza generacja amortyzatorów o zmiennej sile tłumienia (III generacja) odmienna od poprzednich, które pozwalały na regulację wielostopniową lub wcześniej tylko dwustanową.

Badaniu poddano amortyzatory dwóch różnych producentów firm, oznaczone na potrzeby niniejszej publikacji jako amortyzator A i B – pierwszy z wewnętrznym zaworem, drugi z zaworem zewnętrznym. Oba rozwiązania różnią się istotnie co do sposobu sterowania i uzyskiwanych charakterystyk.

3. Badania amortyzatorów

W celu zrealizowania badań amortyzatorów konieczne było stworzenie sterownika pozwalającego na uzyskiwanie zachowania zaworu amortyzatora zgodnego z przyjętym programem i metodyką badań.

W celu wyznaczenia charakterystyk badanych amortyzatorów wykorzystano mechaniczne stanowisko do badania amortyzatorów wymontowanych z pojazdu, wyposażone w czujniki siły i przemieszczenia oraz układ sterujący opracowany w systemie Simulink i uruchomiony na platformie sprzętowej dSpace, pozwalającej na pracę systemu w czasie rzeczywistym.

3.1. Program badań

Aby wyznaczyć charakterystyki amortyzatorów wykonano badania pozwalające na wyznaczenie następujących parametrów:

- odpowiedzi skokowych amortyzatora,
- charakterystyk pracy,
- wykresów pracy amortyzatora dla różnych prędkości i nastaw sterowania.

3.2. Metodyka badań

Badania wykonano projektując w tym celu specjalny sterownik, pozwalający na realizację zautomatyzowanych testów z wykorzystaniem pętli sprzężenia sprzętowego do sterowania procesem akwizycji danych i zadawania określonych nastaw badanych amortyzatorów.

Po zrealizowaniu cyklu badań uzyskane wyniki poddawano dodatkowej obróbce w trybie „off-line” z wykorzystaniem narzędzi programistycznych systemu Matlab. Ta metodyka zastosowana była głównie ze względu na konieczność eliminacji opóźnień fazowych wprowadzanych przez układy filtracji systemu czasu rzeczywistego oraz ze względu na konieczność usunięcia z sygnału składowych wynikających z sinusoidalnego charakteru skoku amortyzatora, a tym samym takiego charakteru prędkości i sił (dla wyznaczenia odpowiedzi skokowych).

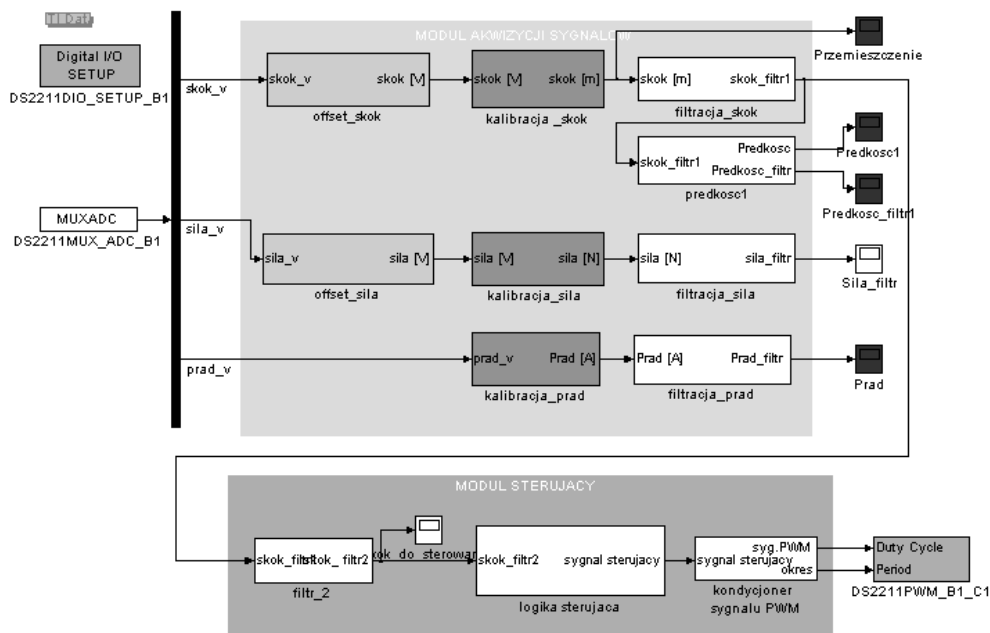
Podstawowym założeniem opracowanego systemu sterującego procesem realizacji badań amortyzatorów było:

- wykorzystanie systemu czasu rzeczywistego do akwizycji danych pomiarowych,
- przejęcie funkcji układu sterującego zaworem amortyzatora (zapewnienie właściwych warunków pracy oraz wbudowanie mechanizmów kontroli poprawności przebiegu eksperymentu wraz z mechanizmami uodporniającymi na możliwe i dające się przewidzieć sytuacje awaryjne),
- elastyczna realizacja szeregu scenariuszy badawczych uwzględniających konieczność monitorowania w czasie rzeczywistym sterowanego układu (znajomość położenia, prędkości, wielkości rzeczywistych prądów sterujących).

Schemat blokowy na najwyższym poziomie ogólności opracowanego systemu (model w systemie Simulink) przedstawia rysunek 2.

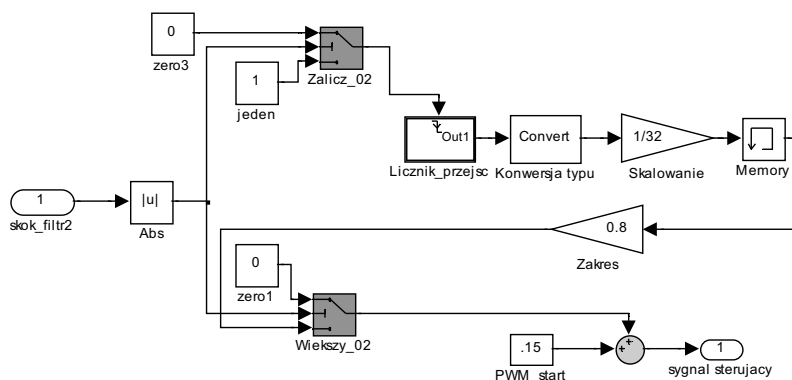
Realizacja poszczególnych eksperymentów zakładała modyfikację podukładu „logika sterująca” w celu uzyskania określonej funkcjonalności. Przykładowy schemat podukładu przedstawiony na kolejnym rysunku (rys. 3) pozwalał na zrealizowanie cyklu badań odpowiedzi na skok jednostkowy dla określonej (zmienianej w trakcie trwania eksperymentu) prędkości ściskania i rozciągania amortyzatora oraz przy zmieniającym się prądzie wyzwalającym zawór obejściowy. W celu realizacji powyższego zadania układ wykonuje w czasie rzeczywistym detekcję położenia (prędkości) badanego amortyzatora i w zaprogramowanych sytuacjach powoduje uruchomienie zaworu obejściowego przy każdym cyklu, zmieniając parametry sygnału wymuszającego.

Dodatkowym zadaniem układu logiki sterującej jest adaptacja sterowania w zależności od badanego obiektu (np. w przypadku amortyzatora A konieczna była zmiana logiki wyzwalania ze względu na odwróconą charakterystykę prądowo-siłową oraz utrzymanie minimalnej wartości sygnału sterującego, aby układ był w obszarze swojej pracy nominalnej – amortyzator A w przypadku spadku poziomu sygnału sterującego poniżej pewnego progu przechodzi do trybu „fail-safe”).



Rys. 2. Schemat blokowy zbudowanego systemu pomiarowego czasu rzeczywistego.

Fig. 2. Block diagram of control and data acquisition real time system.



Rys. 3. Przykład realizacji prostego układu logiki sterującej.

Fig. 3. An example of realization of simple control logic subsystem.

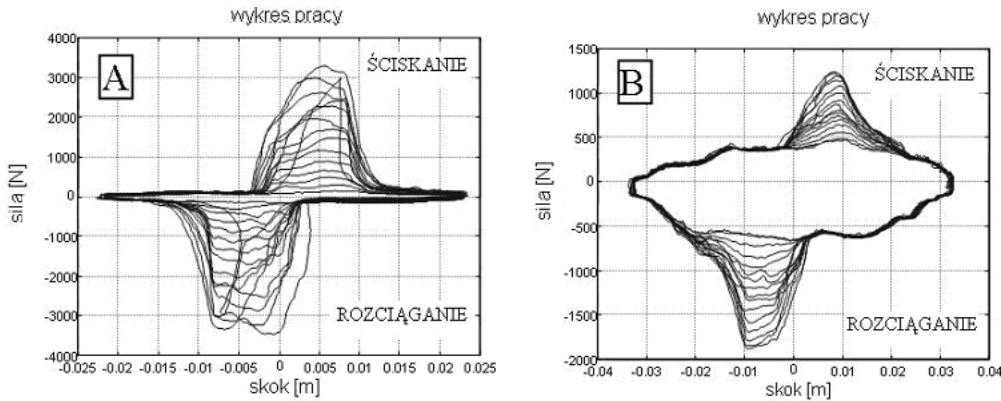
4. Wyniki badań

4.1. Wykresy pracy amortyzatorów

Wykres pracy amortyzatora, przedstawiający zmianę siły tłumienia w zależności od skoku, wykonano przy wzrastającej wartości siły tłumienia w każdym kolejnym

skoku rozciągania i ściskania o 1/32 wartości wybranego zakresu zmian siły. Dla przykładowo wybranych badań w pełnych granicach zmienności siły tłumienia uzyskano wyniki przedstawione na rysunku 4. Badania wykonano dla prędkości obrotowej wymuszenia równej 90 obr/min.

Poprzez wykonanie badań w powyższy sposób, zaprezentowano pełny zakres zmian siły tłumienia dla wybranej wartości wymuszenia. Pokazano również sposób narastania siły tłumienia w odpowiedzi na skokowe wymuszenie sygnału sterującego w kategorii opóźnień odniesionych do skoku. Dla amortyzatora B w trakcie ściskania skok przebyty podczas opóźnienia włączenia wyższego poziomu siły tłumienia wynosił do 10 mm przy całkowitym skoku ± 30 mm. Dla wyłączenia wartość ta była większa i wynosiła około 12 mm. W trakcie rozciągania, gdzie poziom siły tłumienia był wyższy o około 30%, długość skoku w trakcie opóźnienia dla włączenia wyższego poziomu siły tłumienia wyniosła około 7 mm, dla wyłączenia około 8 mm. W przypadku amortyzatora A dla ściskania skok podczas opóźnienia włączenia wyższego poziomu siły tłumienia wynosił od 3 do 8 mm i odmiennie niż dla amortyzatora B był znacznie krótszy podczas wyłączenia wyższego poziomu siły tłumienia – jego wartości wynosiły tu około 4 mm. Dla wyłączenia uzyskano zbliżone wartości. Pewną różnicą w stosunku do amortyzatora B jest mniejsza powtarzalność tych opóźnień dla różnych przebiegów.



Rys. 4. Wykresy pracy amortyzatora A i B podczas skokowej zmiany stopnia tłumienia w 32 poziomach między siłą minimalną i maksymalną.

Fig. 4. Force vs. displacement shock absorbers characteristics during 32 step changes of damping force between minimum and maximum value.

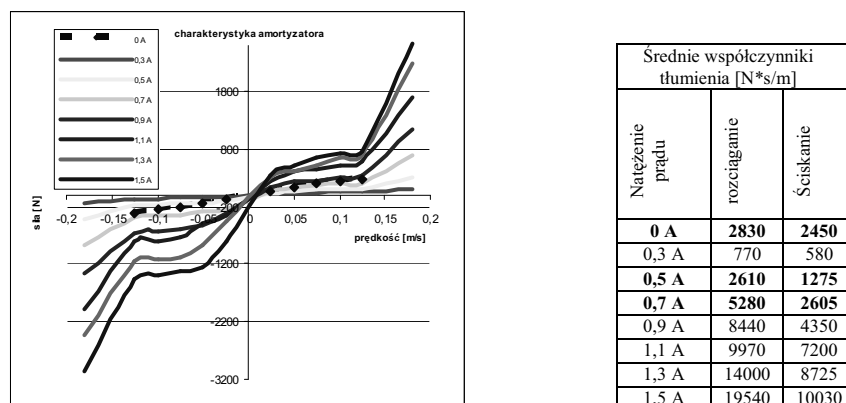
4.2. Charakterystyki amortyzatorów

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów, po wykonaniu numerycznego przetworzenia sygnałów w celu uzyskania informacji o zmianach prędkości ściskania i rozciągania, możliwe było wyznaczenie charakterystyk amortyzatorów.

Przedstawione na rysunkach 5 i 6 charakterystyki zawierają uśrednione współczynniki tłumienia, co ze względu na znaczne nieliniowości, dosyć mocno odbiega od

rzeczywistości. Jednak celem ich wyliczenia była jedynie możliwość porównania przyrostu sił tłumienia w zależności od zmian natężenia prądu, a nie ich zamodelowanie.

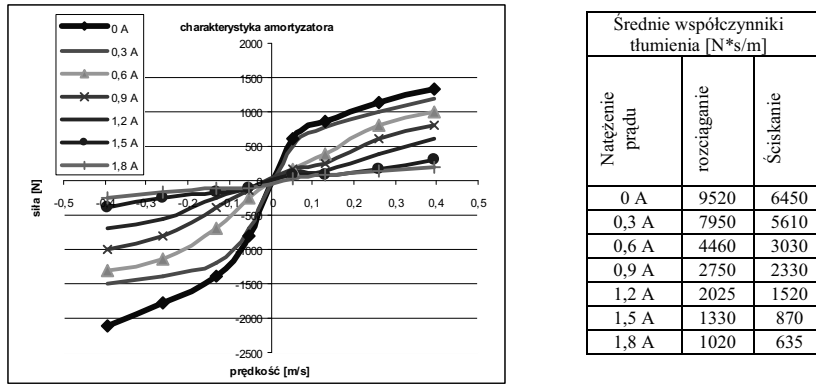
Charakterystyki te różnią się dosyć znacznie. Przede wszystkim w przypadku amortyzatora A uzyskać można szerszy zakres zmian regulacji sił tłumienia - nieznacznie w kierunku wartości najmniejszych oraz ponad dwukrotnie w kierunku wartości największych. W przypadku amortyzatora A najwyższe wartości sił tłumienia są 6 do 8 razy wyższe niż dla amortyzatora pasywnego. W przypadku amortyzatora B różnice te nie są aż tak duże i siły tłumienia są większe około 2 do 4 razy od amortyzatora pasywnego.



Rys. 5. Charakterystyka amortyzatora A z zaworem wewnętrznym oraz średnie współczynniki tłumienia.

Fig. 5. Force vs. velocity characteristic of A shock absorbers with internal valve and average damping coefficients.

Z przedstawionych charakterystyk wynika również inna znaczna różnica dotycząca sterowania. Rozwiązanie użyte w amortyzatorze B jest prostsze. Pozwala ono uzyskiwać różne siły tłumienia, poczynając od najwyższych i w miarę zwiększania natężenia prądu sterującego zaworem proporcjonalnym, przechodząc w stronę wartości najniższych. W przypadku braku zasilania amortyzator pracował będzie na najwyższych współczynnikach tłumienia. Pozwala to w takiej sytuacji zachować odpowiedni poziom bezpieczeństwa jazdy kosztem komfortu, ale ogranicza również możliwości związane z potencjalną możliwością uzyskiwania jeszcze większych sił tłumienia.



Rys. 6. Charakterystyka amortyzatora B z zaworem zewnętrznym oraz średnie współczynniki tłumienia.

Fig. 6. Force vs. velocity characteristic of B shock absorbers with external valve and average damping coefficients.

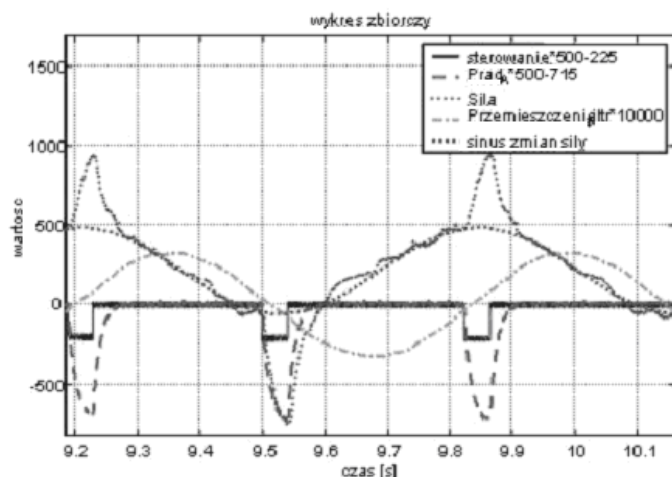
W przypadku amortyzatora B mamy do czynienia z możliwością uzyskiwania znacznie większych sił tłumienia, ale najwyższe z nich osiągają zbyt wysoki poziom tłumienia, aby był on bezpieczny na każdym możliwym rodzaju drogi. Dlatego też ten amortyzator ma tak skonstruowany zawór regulujący tłumienie, iż w przypadku braku prądu ustawia się on w tzw. pozycji „fail-safe”, w której tłumienie amortyzatora ustawione jest na poziomie amortyzatorów pasywnych.

4.3. Odpowiedzi skokowe

Dla procesu sterowania siłą tłumienia istotna jest nie tylko charakterystyka zależności współczynnika tłumienia od wartości prądu sterującego zaworem proporcjonalnym, ale również odpowiedzi czasowe, w tym przede wszystkim odpowiedź skokowa wskazująca na czasy reakcji i narastania wartości siły do wysterowywanego poziomu.

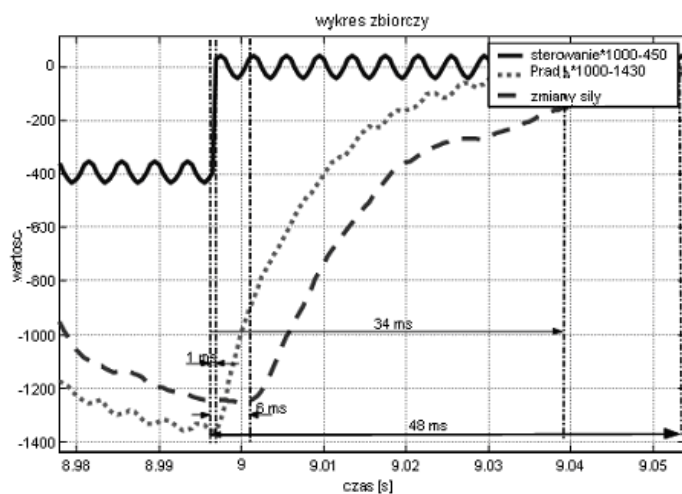
W celu wyznaczenia odpowiedzi skokowych skonstruowano odpowiednią logikę sterującą, pozwalającą na zadawanie wymuszenia skokowego w zakresie najmniejszej zmienności sił tłumienia oraz ich największych wartości (wynikających z sinusoidalnego charakteru zmian prędkości pracy amortyzatora). Wymuszenie skokowe zadawane było w zakresie maksymalnej prędkości amortyzatora. Jednocześnie dokonywano pomiaru sygnału sterującego, średniej wartości prądu zasilającego zawór oraz wartości siły tłumienia.

Po wykonaniu badań, zmierzających do ustalenia zależności pomiędzy wielkością zmian prądu oraz kierunkiem zmian (włączenie i wyłączenie) oraz wpływem wyższych (rozciąganie) i niższych sił tłumienia, można dokonać pewnych uogólnień.



Rys. 7. Wykres zmian w czasie głównych parametrów eksperymentu badawczego.
Fig. 7. Time history of main parameters of investigation experiment.

W przypadku obu amortyzatorów opóźnienie pomiędzy sygnałem sterującym a początkiem zmiany natężenia prądu wynosiło dla większości wypadków około 1 milisekundy. Dla sygnału siły to opóźnienie w przypadku amortyzatora A wynosiło od 4 do 12 ms, ze średnią wartością około 9 ms. Dla amortyzatora B to opóźnienie siły miało wartości około 4 do 9 ms z wartością średnią około 4...5 ms.



Rys. 8. Analiza parametrów czasowych odpowiedzi skokowej dla wyłączenia wysokiego poziomu tłumienia podczas rozciągania amortyzatora dla zmiany prądu sterującego z 1,45 A na 0,03 A (amortyzator B).

Fig. 8. Analysis of time parameters of step response for switching on high damping level during shock absorber rebound for current change from 1,45 A to 0,03 A (B shock absorber).

Czas narastania lub spadku prądu dla amortyzatora A zmieniał się, rosnąc w miarę zwiększania wartości docelowej natężenia prądu. Zmiany te zawierały się w przedziale od 15 do 23 ms.

Dla amortyzatora B wartości te zmieniały się w miarę zwiększania różnicy w wartościach prądu i dla zmian o 1,4 A wynosiły około 34 ms, a dla zmian o 0,3 A ich poziom wynosił około 25 ms. W przypadku amortyzatora A zmiany te były bardzo małe i trudne, w związku z tym, do jednoznacznej interpretacji.

Dla czasów narastania lub spadku siły największy wpływ miała wartość siły tłumienia oraz zakres zmiany prądu. Najdłuższe czasy uzyskiwano dla najwyższych sił tłumienia i największych wartości zmian prądu - dla czasów załączenia wysokiego poziomu tłumienia były to wartości rzędu 45 do 58 ms. Dla tych najwyższych wartości sił tłumienia również największa była różnica między czasami narastania siły dla włączenia wysokiego poziomu oraz spadku dla wyłączenia, dla którego czasy te osiągały poziom 25 ms. Przy mniejszych wartościach sił i poziomów zmian prądu czas opóźnienia dla wyłączenia i włączenia utrzymywał się na podobnym poziomie.

Dla amortyzatorów B różnice pomiędzy czasami narastania siły tłumienia dla włączenia i wyłączenia wysokiego poziomu tłumienia były niewielkie. Były to odpowiednio wartości około 34 do 42 ms dla włączenia i około 39 do 56 ms dla wyłączenia wysokiego poziomu siły tłumienia. Zmiany powodowane spadkiem zakresu zmian natężenia prądu sterującego były bardzo małe.

5. Podsumowanie

Wyniki badań oraz metodyka ich prowadzenia zaprezentowane w niniejszym artykule nie wyczerpują problematyki własności amortyzatorów o zmiennym tłumieniu i badania ich charakterystyk. Wskazują one jednak na duży potencjał stojący za możliwością zmiany poziomu siły tłumienia przy pomocy tego typu amortyzatorów.

Zmienia to również sposób podejścia do projektowania współczesnych zawiesznień samochodowych, czyniąc go bardziej niż dotychczas procesem zintegrowanym z projektowaniem ogólnej dynamiki samochodu.

Z drugiej strony tego typu elementy wykonawcze powodują konieczność doskonalenia technik pomiarowych dla badania i wyznaczania charakterystyk amortyzatorów. Pojawia się konieczność włączania w nie również układów sterowania obiektem badań. W tym przypadku okazuje się, że do przeprowadzenia samych badań konieczne jest opracowanie odpowiednich algorytmów sterujących. Doskonale do tego celu nadają się platformy prototypowania systemów czasu rzeczywistego takie jak np. użyty do realizacji badań prezentowanych w artykule system czasu rzeczywistego firmy dSpace.

Literatura

- [1] MROZEK B., MROZEK Z.: *Matlab 5.x, Simulink 2.x – poradnik użytkownika*. Wydawnictwo PLJ, Warszawa 1998.
- [2] WILLIAMS R. A.: *Automotive active suspensions Part 1: basic principles.*, Engineering Centre, Jaguar Cars, Coventry Proc. Instn Mech. Engrs, Part D, 1997.

Methodology and results of tests of some adjustable shock absorbers with use of real time system

S u m m a r y

In this paper some types of real time adjustable shock absorbers construction is presented. The way of control for two types of such a shock absorbers and the methodology of measuring shock absorbers characteristic are described. The measurements were performed using conventional damper tester and control software on real time platform used also for data acquisition. Some procedures written in Matlab and Simulink were used for control and data processing for estimation of step response of current and force signals for input control signal, and of course for damper characteristic – force vs. deflection and force vs. velocity. The results are presented in the last part of paper with some conclusion concerning the measurements methodology.