

MAKOWSKI Michał¹
ZAJĄC Maciej²
POKORSKI Janusz³

OGRANICZENIE ZMIAN NACISKU KÓŁ POJAZDU PATROLOWEGO ZE STEROWANYMI TŁUMIKAMI MAGNETOREOLOGICZNYMI

Praca jest poświęcona opracowaniu algorytmu sterowania siłą tłumienia układu z tłumikiem magneto-reologicznym (MR). Przedstawiono metodę ograniczenia drgań przez zastosowanie sterowania tłumikiem MR. Podczas badań symulacyjnych opracowano model pojazdu w programie DADS. Jako kryterium doboru sił tłumienia przyjęto wskaźnik charakteryzujący zmiany nacisków kół. Wyniki badań wykazały, że możliwe jest ograniczenie drgań wojskowego pojazdu patrolowego Honker.

REDUCTION OF WHEEL FORCE VARIATIONS IN PTROL VEHICLE WITH MAGNETORHEOLOGICAL DAMPERS

This paper describes a control algorithm for a damping system equipped with a magnetorheological damper (MR). A method of vibration limitation by a controlled MR damper has been presented. The model of the vehicle has been built using DADS software. As a criterion of optimizing the damping force, the index characterizing wheel force variations has been used. The research results showed that it is possible to control the suspension of military patrol vehicle Honker.

1. WSTĘP

Prezentowana w opracowaniu problematyka należy do aktywnych metod ochrony pojazdów i maszyn oraz konstrukcji budowlanych przed zewnętrznymi wymuszeniami. Próby zastosowania sterowanych tłumików drgań w układach mechanicznych podejmowane były od dawna i w dalszym ciągu trwają prace nad rozwojem tzw. inteligentnych konstrukcji [1]. Prace badawcze ukierunkowane na praktyczną realizację

¹ Warsaw Univeristy of Technology, Faculty of Automotive and Construction Machinery Engineering, POLAND, 02-524 Warsaw, Narbutta 84, Phone: + 48 22 234-85-91, Fax: + 48 22 849-03-03
E-mail: m.makowski@simr.pw.edu.pl

² Land Forces Command, Warsaw, POLAND, Phone: + 48 22 234-85-91, Fax: + 48 22 849-03-03
E-mail: maciezk@autograf.pl

³Warsaw Univeristy of Technology, Faculty of Automotive and Construction Machinery Engineering, POLAND, 02-524 Warsaw, Narbutta 84, Phone: + 48 22 234-85-45, Fax: + 48 22 849-03-03
E-mail: Janusz.Pokorski @simr.pw.edu.pl

redukcji drgań przy zastosowaniu sterowanych tłumików w pojazdach i maszynach roboczych został również podjęty w Instytucie Pojazdów Politechniki Warszawskiej opisany w pracach [2], [3].

W pracy została przedstawiona metodyka badań sterowania zawieszeniem pojazdu patrolowego celem minimalizacji zmian nacisków kół na nawierzchnię drogi w odniesieniu do obciążenia statycznego (bezpieczeństwo). W trakcie prac przeprowadzone zostały badania symulacyjne modelu pojazdu, który został zamodelowany w programie MBS DATS. W programie tym opisany został również opracowany algorytm sterowania wg założonego kryterium bezpieczeństwa. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem modelu tłumika magnetoreologicznego (MR). Sterowane tłumiki MR cechuje zmiana lepkości cieczy pod wpływem pola magnetycznego. Wówczas poprzez zmianę natężenia prądu w układzie elektronicznym można wpływać na zmianę sił tarcia w układzie mechanicznym tłumika. Do przeprowadzenia badań doświadczalnych opracowana została konstrukcja tłumika MR Honker, która została oparta na bazie oryginalnego tłumika drgań. Konstrukcja ta powstała w Instytucie Pojazdów Politechniki Warszawskiej.

Badania własności tłumika przeprowadzono na stanowisku doświadczalnym w laboratorium Instytutu Pojazdów. Następnie przeprowadzono badania terenowe na wojskowym pojeździe patrolowym Honker 2000. Badania przeprowadzono na poligonie oraz na drodze asfaltowej. W pracy przedstawiono przykładowe wyniki badań numerycznych i doświadczalnych prowadzonych na pojeździe Honker ze sterowaniem siłą tarcia przy uwzględnieniu kryterium bezpieczeństwa oraz w celach porównawczych przeprowadzono badania z oryginalnym zawieszeniem.

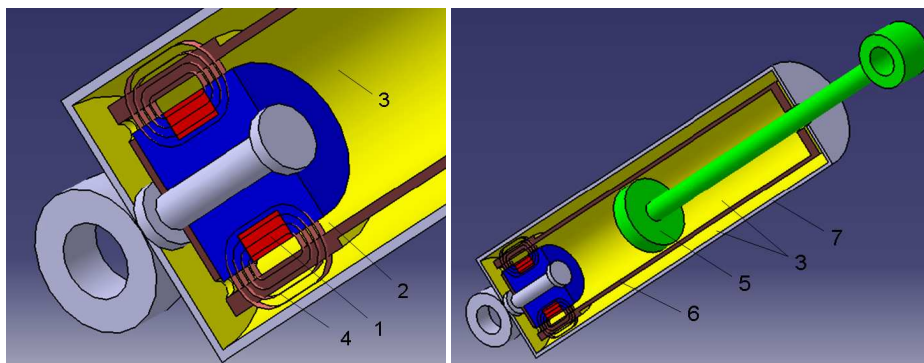
Przedstawione w pracy rozwiązanie sterowania układu mechanicznego ze względu na minimalizację zmian nacisków kół na nawierzchnię drogi pozwala na stosowanie również do innych rodzajów tłumików elektoreologicznych lub piezoelektrycznych. Istotą tej metody jest sterowanie siłą tłumienia w układach mechanicznych w niemalże w czasie rzeczywistym. Tłumiki MR są również stosowane do tłumienia drgań w pojazdach z uwzględnieniem kryterium minimalizacji modułu przyspieszeń pionowych (komfort). Rozwój sterowanych układów mechatronicznych umożliwił rozwinięcie praktycznych zastosowań systemów kontroli drgań nie tylko pojazdów, ale również w maszynach roboczych i innych obiektach technicznych.

2. BUDOWA TŁUMIKA MR HONKER

Badania na pojeździe wykonano z zastosowanym w zawieszeniu tłumikiem MR Honker. Konstrukcja tego tłumika została oparta na elementach oryginalnego amortyzatora pojazdu. Oryginalny tłumik jest konstrukcją dwururową a ciecz hydrauliczna przepływa przez dwa zawory w tłoczysku i cylindrze roboczym.

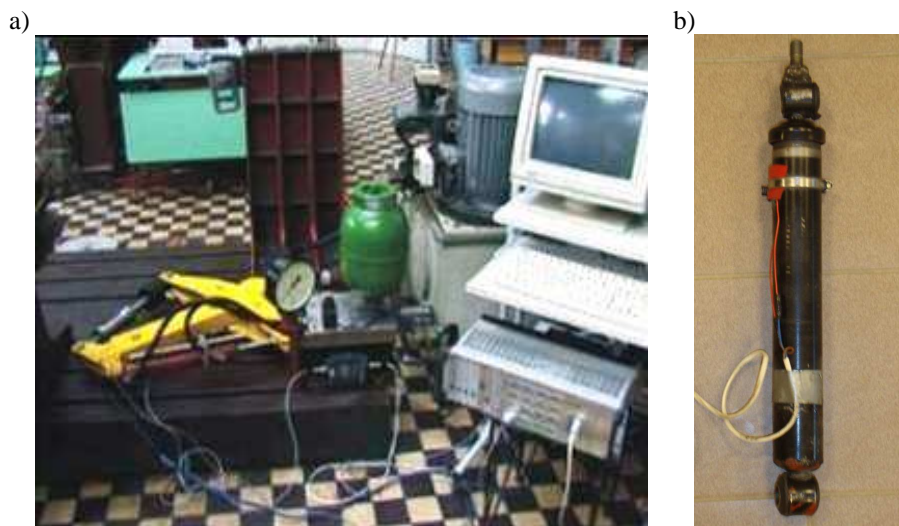
Na rysunku 1 przedstawiono został schemat konstrukcyjny tłumika MR Honker. Zmiana ta polegała na zamknięciu zaworu w tłoku oraz wykonaniu głowicy z cewką, która została zabudowana na cylindrze roboczym. Elementy te umożliwiły stworzenie odpowiedniej wielkości szczeliny ($h = 0,5$ mm) oraz na wytworzenie pola magnetycznego. Tłumik hydrauliczny został wypełniony cieczą magnetoreologiczną wyprodukowaną przez firmę Lord [4] o symbolu MRF-265. Ciecz MR przepływając przez szczelinę, w której zostało wytworzone pole magnetyczne, zmieniała swoją lepkość, co

wpływało na zwiększenie dyssypacji energii. Poprzez zmianę natężenia prądu można było wpływać na własności dyssypacyjne tłumika MR.



Rys. 1. Schemat tłumika magnetoreologicznego: 1 - cewka, 2 - szczelina, 3 - ciecz magnetoreologiczna, 4 - linie pola magnetycznego, 5 - tłok, 6 - cylinder roboczy, 7 - obudowa

Badania własności dyssypacyjnych tłumika MR przeprowadzono na stanowisku pomiarowym przedstawionym na rysunku 2. Na stanowisku badawczym realizowane jest wymuszenie kinematyczne za pomocą układu hydraulicznego. Rejestrowane są przemieszczenia tłoczyska tłumika oraz siły tłumienia. Układ sterowania umożliwił regulację prądów zasilania układu elektronicznego (cewki).



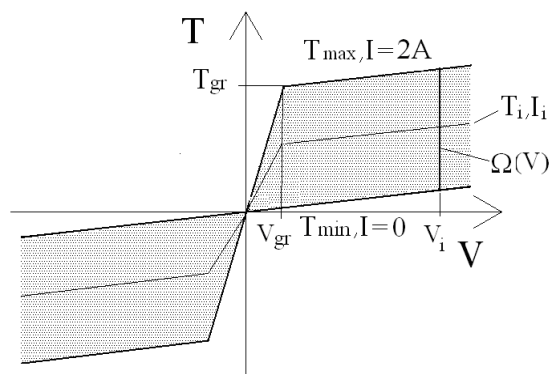
Rys. 2. Stanowisko do badań właściwości tłumików: a) widok stanowiska, b) tłumik MR Honker

Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono charakterystyki dyssypacyjne tłumika MR Honker względem prądów zasilania. Opracowane charakterystyki tłumika

wykorzystano do badań numerycznych modelu pojazdu. Wykorzystano je również podczas opracowania programu sterowania tłumikami podczas badań terenowych. Charakterystyki tłumika posłużyły do wyznaczenia pola sterowania sił tłumienia w zależności od prądu zasilania układu. Schematycznie pole sterowania zostało przedstawione na rysunku 3. Istota możliwości ograniczenia drgań układu mechanicznego z tłumikami magnetoreologicznymi sprowadza się do doboru w jak najkrótszym czasie sił tłumienia w tłumiku (układzie mechanicznym), realizowane jest to poprzez wygenerowanie odpowiedniego sygnału sterującego.

3. ALGORYTM STEROWANIA

Opracowany algorytm sterowania powinien zapewniać działanie układu mechanicznego, tak aby spełnić założone kryterium minimalizacji zmian nacisków kół pojazdu na nawierzchnię drogi. Wówczas istota sterowania sprowadza się do wygenerowania sygnału sterującego w_i w układzie elektronicznym, który zostanie zamieniony na siłę tarcia w tłumiku. Sygnał sterujący był wyznaczany na podstawie ugięć zawieszenia pojazdu oraz prędkości odkształceń tłumika.



Rys. 3. Charakterystyka tłumika MR

Sygnał sterujący tłumikami w_i , $i=(1,\dots,4)$ został ustalony na podstawie algorytmu, gdzie równania ruchu przyjmują postać:

$$M\ddot{X} + S(U) + T(V, w) = 0 \quad (1)$$

$$w = \gamma(U, V) \quad (2)$$

gdzie γ - funkcja opisująca algorytm wyznaczania sygnałów sterujących w

Pomiar sił w zawieszeniu w trakcie badań numerycznych w programie DATS odbywał się za pomocą czujników. Natomiast podczas badań terenowych wartości sił były wyznaczane na podstawie ugięcia zawieszenia i prędkości odkształceń sterowanych tłumików. Na podstawie danych z czujników ugięcia zawieszenia, prędkości odkształceń i charakterystyki tłumika MR wyznaczana była dopuszczalna wartość sił tarcia w tłumiku T w zbiorze rozwiązań $\Omega(V)$.

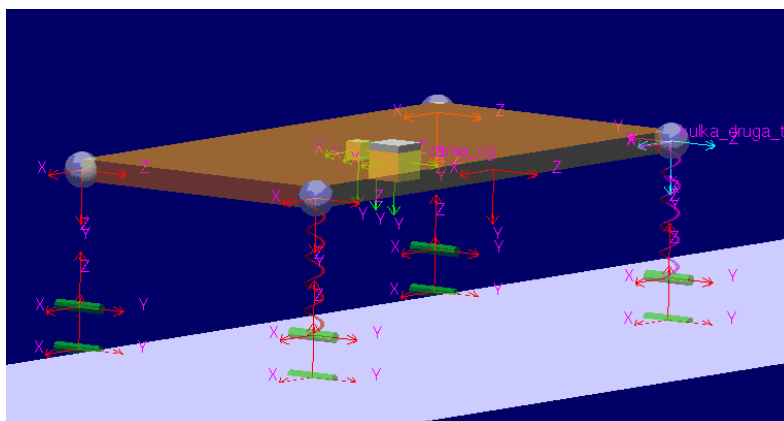
Do oceny jakości sterowania przyjęty został wskaźnik charakteryzujący zmianę nacisków kół na nawierzchnię drogi:

$$W = \frac{1}{Q_{st}} \sum_{i=1}^N \sqrt{(\Delta S_i + T_i)^2}, \quad (3)$$

gdzie: ΔS_i – zmiana siły w sprężynach, T_i – siła tarcia w sterowanym tłumiku, Q_{st} – obciążenie statyczne, N – liczba kół pojazdu.

Rozwiązanie zadania polegało na wyznaczeniu wektora sił T w zbiorze rozwiązań $\Omega(V)$. Na podstawie wyznaczonego wektora sił tarcia dobierany był prąd zasilający cewki tłumików w postaci wektora prądów $I = [I_1, I_2, I_3, I_4]$. W generatorze sygnału pojawiało się napięcie sterujące a następnie w cewkach z opóźnieniem wynikającym z bezwładności urządzeń elektronicznych pojawiał się prąd o zadanym natężeniu.

4. BADANIA SYMULACYJNE POJAZDU



Rys. 4. Model pojazdu patrolowego w programie DATS

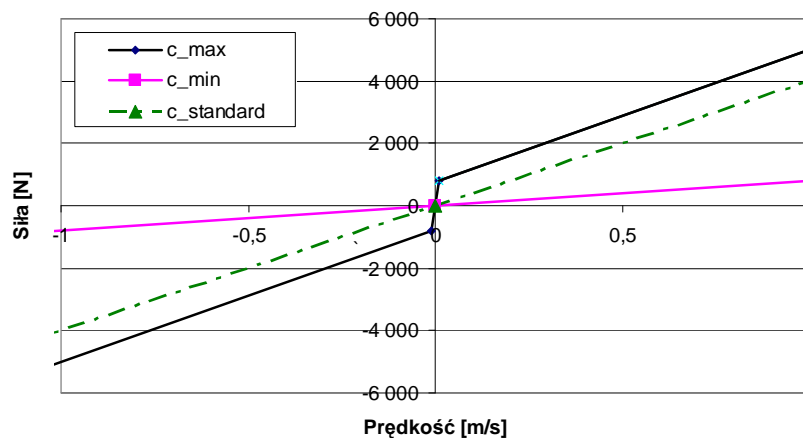
Badania symulacyjne przeprowadzono w programie MBS DATS. Program ten umożliwił zbudowanie modelu geometrycznego układu mechanicznego oraz opis cechami fizycznymi poszczególnych członów modelu. Nadwozie pojazdu opisano jako ciało o masie m , które posiada 3 stopnie swobody. Mierzono przemieszczenie pionowe w środku ciężkości, który był umieszczony w środku geometrycznym bryły, oraz obroty względem osi Z i osi X . Zawieszenie pojazdu zostało opisane przez sprężyny o sztywności k oraz sterowane tłumiki o zmiennym współczynniku tłumienia c . W modelu pojazdu wpisano koła o promieniu dynamicznym r_d oraz sztywności opon k_o . Zamodelowane w pojeździe koła nie miały możliwości odrywania się od podłoża. Drgania układu mechanicznego były wymuszane kinematycznie przez przejazd po zadanej nierówności drogi. Na rysunku 4 przedstawiony został model pojazdu w programie DATS.

Opracowany model geometryczny pojazdu posiadał 7 stopni swobody i charakteryzował się następującymi parametrami: masa ciała drgającego $m = 5200$ kg, sztywność sprężyn $k = 51270$ N/m, wartości graniczne bezwymiarowego współczynnika tłumienia $\gamma_{min} = 0,05$ i $\gamma_{max} = 3$ (odpowiednio $c_{min} = 800$ Ns/m, $c_{max} = 50000$ Ns/m).

Przyjęto następujące wartości opisujące koła pojazdu: promień dynamiczny $r_d = 0,3$ m, sztywność opony $k_o = 2 \times 10^5$ N/m. Założono rozstaw kół $L_k = 1,6$ m oraz rozstaw osi $L_o = 3,2$ m. Współczynniki tłumienia c w zawieszeniu pojazdu zostały wyznaczone na podstawie zależności:

$$c = 2 \cdot \gamma \cdot \sqrt{k \cdot m} \quad (4)$$

Wyznaczone wartości współczynnika tłumienia określały cechy tłumika MR bez zasilania prądem c_{\min} i z zasilaniem maksymalną wartością prądu c_{\max} . Do celów porównawczych wyznaczona została wartość współczynnika c_{standard} dla tłumika bez sterowania przy bezwymiarowym współczynniku tłumienia $\gamma = 0,25$ otrzymano współczynnik tłumienia $c = 4000$ Ns/m.



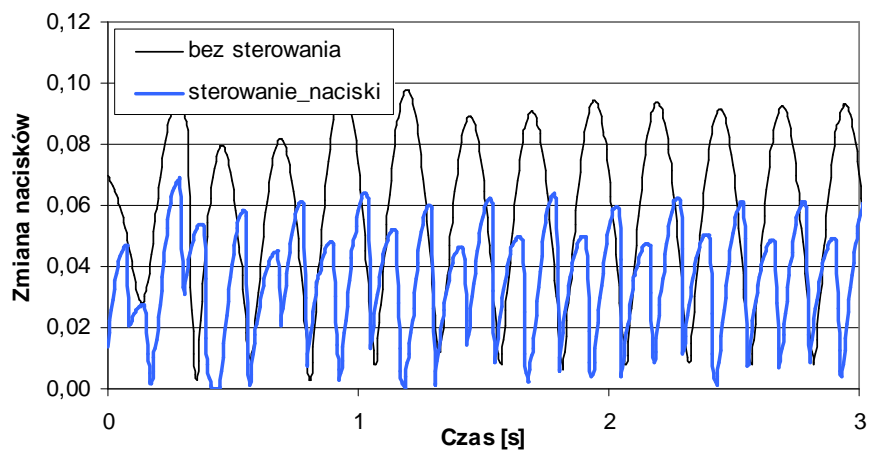
Rys. 5. Pole sterowania tłumika MR

Na rysunku 5 przedstawiono pole sterowania tłumika MR ograniczone przez krzywe c_{\min} i c_{\max} oraz linie c_{standard} . Wyznaczono wartości graniczne sił tarcia $T_{gr} = 800$ N przy prędkości granicznej $V_{gr} = 0,01$ m/s.

Badania symulacyjne przeprowadzone zostały dla przejazdu pojazdu ze stałą prędkością 10 m/s. Badania przeprowadzono dla wymuszeń harmonicznym funkcją sinus o amplitudzie $a = 0,05$ m przy różnych długościach fali (częstości wymuszeń). Zgodnie z przedstawioną zależnością pomiędzy częstością wymuszeń i długością fali:

$$\omega = \frac{V}{L} \quad (5)$$

Siła tłumienia w zawieszeniu pojazdu była wyznaczana na podstawie przyjętego kryterium minimalizacji zmian nacisków kół na nawierzchnię drogi, które zostało opisane zależnością (3). W celach porównawczych przeprowadzono badania dla stałej wartości współczynnika tłumienia przy takich samych warunkach wymuszenia kinematycznego.



Rys. 6. Zmiana nacisków kół na nawierzchnię drogi w układzie ze sterowaniem i bez sterowania

Na rysunku 6 przedstawiono porównanie przebiegów zmiany nacisków kół na nawierzchnię uzyskanych podczas badań symulacyjnych, przy wymuszeniu harmonicznym. Przedstawione zostały dwa przebiegi zmian nacisków w warunkach sterowania współczynnikiem tłumienia (c – zmienne) i bez sterowania dla stałej wartości współczynnika tłumienia (c – stałe).

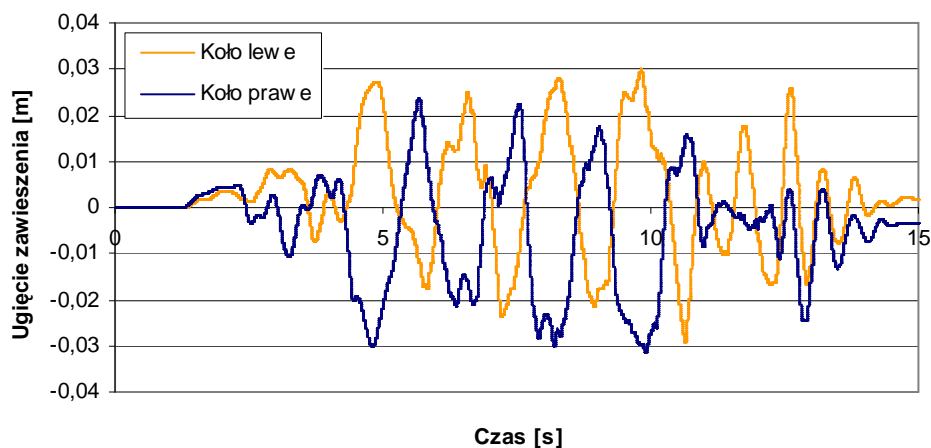


Rys. 7. Wojskowy pojazd patrolowy Honker 2000 na torze doświadczalnym

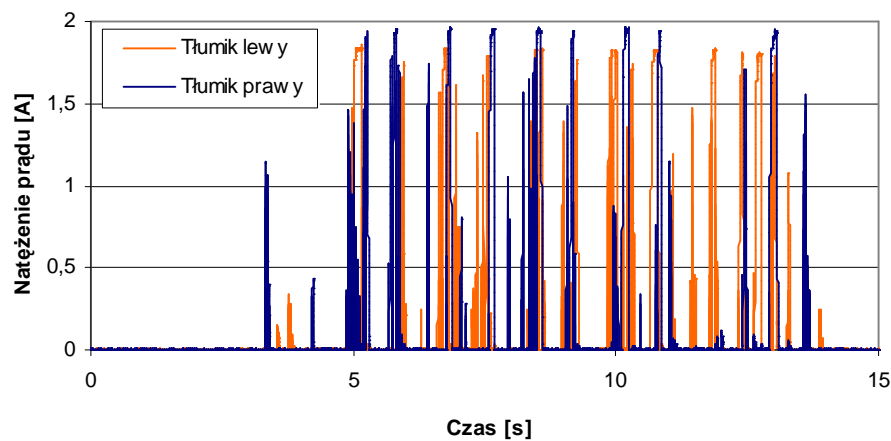
Ocenę wpływu sterowania na ograniczenie zmian nacisków kół na nawierzchnię drogi dokonano na podstawie wartości średniej z przebiegu. Wartość zmian nacisków bez sterowania wynosiła $5,95 \times 10^{-2}$. Natomiast przy sterowaniu z uwzględnieniem kryterium bezpieczeństwa uzyskano wartość średnią $3,67 \times 10^{-2}$. Uzyskano zmniejszenie wartości

średniej zmian nacisków kół na nawierzchnię drogi w porównaniu z przebiegiem ze stałym współczynnikiem tłumienia.

5. BADANIA DOŚWIADCZALNE



Rys. 8. Przebiegi ugięcia zawieszenia pojazdu koła prawego i lewego z tłumikami MR



Rys. 9. Przebiegi zmian natężenia prądu w tłumiku prawym i lewym z tłumikami MR

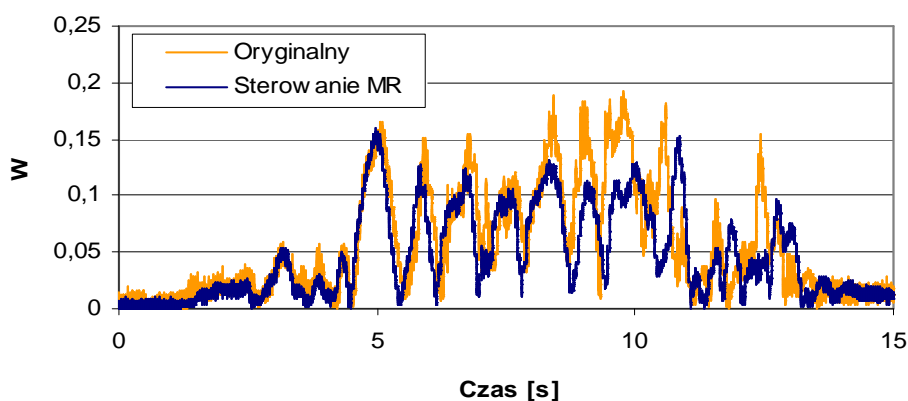
Badania terenowe wojskowego pojazdu terenowego Honker 2000 prowadzono na różnych torach badawczych. Na rysunku 7 przedstawiony został przebieg badań na poligonie wojskowym. Pojazd został wyposażony w sterowne tłumiki magneto-reologiczne w zawieszaniu, czujniki przemieszczeń kół względem nadwozia. Do

sterowania wartościami sił tłumienia wykorzystano aparaturę sterującą tłumikami MR stworzoną w Instytucie Pojazdów Politechniki Warszawskiej.

W pracy prezentowane są wyniki badań z przejazdu na torze z przeszkodami pokazanymi na rysunku 7. Tylne zawieszenie pojazdu zostało wyposażone w sterowane tłumiki magnetoreologiczne natomiast w przednim zawieszeniu znajdowały się oryginalne amortyzatory. Sterowanie siłą w tłumikach odbywało się przy użyciu programu, w którym opisano algorytm sterowania przedstawiony w punkcie 3. Do programu sterującego została wprowadzona również charakterystyka tłumika MR.

W pojeździe podczas badań znajdowały się trzy osoby prowadzące badania plus kierowca. Badania prowadzone na odcinku drogi z przeszkodami przejazd odbywał się z prędkością ok. 15 km/h. Rejestrowano sygnały odkształceń zawieszenia oraz prądów sterowania w układzie elektronicznym tłumików MR. Na rysunku 8 przedstawiono wyniki z rejestracji przemieszczeń zawieszenia koła prawego i lewego. Widoczne są zmiany wartości ugięć zawieszenia na podstawie, którego wyznaczano wartość natężenia prądu w cewkach tłumików MR.

Na rysunku 9 przedstawiono przebieg prądów zasilania tłumików MR zamontowanych w prawym i lewym zawieszeniu pojazdu Honker. Widoczne są zmiany wartości prądów sterowania zgodnie ze zmianami ugięć zawieszenia kół prezentowanych na rysunku 8.



Rys. 10. Przebiegi współczynnika zmian nacisku kół na nawierzchnię drogi przy przejazdach ze sterowaniem tłumikiem MR i z zawieszeniem oryginalnym

Przeprowadzono również badania porównawcze pojazdu z oryginalnymi amortyzatorami przy takich samych warunkach badań. Na rysunku 10 przedstawiono przebieg wskaźnika zmian nacisków kół na nawierzchnię drogi dla przejazdów ze sterowanymi tłumikami i z oryginalnym zawieszeniem.

W wyniku przeprowadzenia badań porównawczych uzyskano średnią wartość wskaźnika $W_O = 5,54 \times 10^{-2}$ przy badaniach z oryginalnym zawieszeniem, natomiast przy badaniach ze sterowaniem zawieszenia uzyskano wartość wskaźnika $W_{MR} = 4,69 \times 10^{-2}$. Uzyskano zmniejszenie wskaźniki zmian nacisków o ok. 15 %.

6. PODSUMOWANIE

Celem podjętych prac było opracowanie systemu sterowania drganiami pojazdu umożliwiającego zmniejszenie zmian nacisków kół na nawierzchnię drogi. Opracowano algorytm doboru sił tłumienia w sterowanych tłumikach drgań. Możliwość sterowania wartościami sił tarcia w tłumikach przeprowadzono na podstawie badań numerycznych, gdzie do modelu pojazdu w programie DATS zastosowano sterowane tłumiki drgań. W Instytucie Pojazdów Politechniki Warszawskiej opracowano oryginalne tłumiki magneto reologiczne (MR Honker), które miały zapewnić możliwość montażu oraz sterowania wartościami sił tłumienia w zawieszeniu pojazdu patrolowego Honker. Przeprowadzone pomiary terenowe potwierdziły założony cel zmniejszenia zmian nacisków kół na drogę.

W Instytucie Pojazdów Politechniki Warszawskiej wykonywany jest projekt finansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, w ramach którego prowadzone są prace związane z redukcją drgań pojazdu patrolowego wyposażonego w sterowane tłumiki magnetoreologiczne.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Metered H., Bonello P., Oyadiji S. O.: *The experimental identification of magnetorheological dampers and evaluation of their controllers*; Mechanical Systems and Signal Processing 24 (2010) p. 976–994
- [2] Zajac M., Grzesikiewicz W., Makowski M.: *Wpływ sterowania tłumikiem MR na ograniczenie drgań pojazdu patrolowego*. Zeszyty Naukowe WSOWL, Nr 1 (159) 2011, ISSN 1731-8157, s. 294-301
- [3] Makowski M., Knap L., Grzesikiewicz W., Pokorski J.: *Badanie możliwości ograniczenia drgań pojazdu przy użyciu sterowanych amortyzatorów magneto-reologicznych*. ZN Instytutu Pojazdów, 3(62)/2006, Warszawa 2006, s. 33-54.
- [4] Materiały katalogowe firmy Lord Corporation, www.mrfluid.com.