

Przemysław Simiński

Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej

WPŁYW NIESPRAWNOŚCI UKŁADU HAMULCOWEGO NA ZACHOWANIE SIĘ POJAZDU SPECJALNEGO W CZASIE HAMOWANIA AWARYJNEGO W RUCHU KRZYWOLINIOWYM

Rękopis dostarczono, kwiecień 2013

Streszczenie: Budowa bezpiecznych pojazdów, to jeden z głównych priorytetów Sił Zbrojnych. Artykuł dotyczy realizacji modelowania i symulacji zachowania pojazdu specjalnego – transportera opancerzonego w trakcie hamowania awaryjnego w ruchu krzywoliniowym. Za pomocą zbudowanego modelu pojazdu, w którym uwzględniono układ hamulcowy z ABS i EBS, wykonano badania symulacyjne. Badania dotyczyły określenie wpływu niesprawności układu hamulcowego na zachowanie się transportera opancerzonego w ruchu krzywoliniowym.

Słowa kluczowe: transporter opancerzony, modelowanie, symulacja, bezpieczeństwo

1. WSTĘP

Wojskowe pojazdy kołowe powinny charakteryzować się wysokim poziomem własności trakcyjnych. Zdolność do poruszania się z dużą prędkością w zmiennych warunkach to jeden z elementów bezpieczeństwa żołnierzy. Niepożądanym efektem dynamicznej jazdy może być utrata stateczności. Jednym z manewrów, podczas którego może dojść do niebezpiecznego zdarzenia jest ruch krzywoliniowy. W trakcie pokonywania zakrętów z dużą prędkością i jednoczesnego hamowania pojazdy kołowe są szczególnie narażone na utratę stateczności. Ponadto pojazdy wojskowe, zwłaszcza bojowe są narażone na uszkodzenie układu hamulcowego, dlatego dla nich manewr hamowania w ruchu krzywoliniowym może być szczególnie niebezpieczny.

2. ZAGROŻENIE BEZPIECZEŃSTWA WOJSKOWYCH POJAZDÓW KOŁOWYCH

W odniesieniu do bezpieczeństwa pojazdów wojskowych należy wspomnieć o konieczności przeciwdziałania zagrożeniom bojowym i ochronie załóg z tym związaną. Zapewnienie optymalnej ochrony załodze umożliwia wysoki poziom zespołu cech pojazdu. Należą do nich: siła ognia (możliwość rażenia przeciwnika odpowiednio skutecznymi środkami ogniowymi), odporność balistyczna i antyminowa (wyrażana jakością opancerzenia), własności trakcyjne (dynamika jazdy, pokonywanie przeszkód terenowych, zwrotność). Dopiero kompleksowy rozwój wspomnianych cech pozwala na osiągnięcie zadowalającego poziomu bezpieczeństwa. Wszelkie dysproporcje, jak np. silne opancerzenie przy niskiej dynamice ruchu, są niepożądane i nie gwarantują bezpieczeństwa pojazdów wojskowych, zwłaszcza opancerzonych. Bezpieczeństwo pojazdów wojskowych należy rozpatrywać w szerszym aspekcie, np.: odporności balistycznej, transportowalności, urządzeń specjalnych, możliwości pokonywania przeszkód wodnych. O jakości pojazdu wojskowego (zwłaszcza bojowego) decydują jego główne cechy, tzn.: siła ognia, ruchliwość i opancerzenie, które w myśl zasady łańcucha powinny być ogniwami o takiej samej wytrzymałości.

Wśród pojazdów narażonych na zniszczenie wrażliwych układów i systemów, od których jednocześnie wymaga się wysokiego poziomu, wspomnianych, głównych cech, są transportery opancerzone. Oddziaływanie środków rażenia może doprowadzić do niesprawności układu hamulcowego. Ponadto bardzo intensywna lub nieprawidłowa eksploatacja, może doprowadzić do przyspieszonego zużycia elementów roboczych. Uznano wobec tego za zasadne przeprowadzenie badań symulacyjnych wpływu niesprawnego układu hamulcowego na zachowanie pojazdu w ruchu krzywoliniowym.

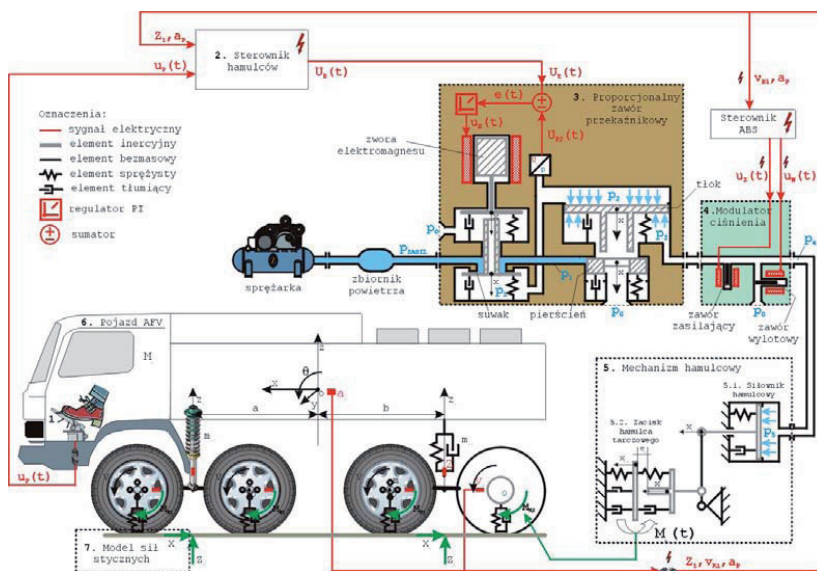
3. MODEL POJAZDU

Do badań przygotowano płaski model symulacyjny pojazdu czteroosiowego (rys. 1) z wbudowanym pneumatycznym układem hamulcowym, w którym ze względów funkcjonalnych można wyróżnić siedem modeli częściowych:

1. Model wymuszenia.
2. Model sterowania hamulcami.
3. Model proporcjonalnego zaworu przekątnikowego (jeden dla kół przednich i jeden dla kół tylnej osi jezdnej).
4. Model modulatora ciśnienia ABS wraz ze sterownikiem (jeden dla każdej z czterech grup kół jezdnych).
5. Model mechanizmu hamulcowego (dla każdego koła jezdneho);
6. Model pojazdu.
7. Model sił stycznych.

W modelu pojazdu wyeksponowano te właściwości, które uznano za szczególnie ważne w ruchu opóźnionym, wywołanym nagłym zadziałaniem układu hamulcowego, a mianowicie:

- parametry masowe pojazdu, w tym masy wózków poszczególnych osi;
- masowy moment bezwładności kół jezdnych I_i oraz moment bezwładności nadwozia pojazdu względem jego osi poprzecznej (I_Y);
- położenie środka ciężkości pojazdu (a , b , h_W);
- parametry fizyczne modelu zawieszenia osi kół jezdnych (k_{Ri} , c_{Ri});
- parametry fizyczne modelu sprężystości promieniowej ogumienia (k_{Ki} , c_{Ki}).

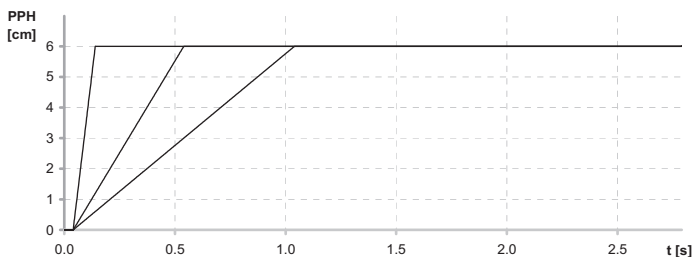


Rys. 1. Model symulacyjny – struktura bloków głównych

Ruch poszczególnych brył modelu opisują równania dla dziesięciu stopni swobody (sześć dla nadwozia, po jednym dla osi wózków kół jezdnych oraz dwa stopnie swobody kół jezdnych obracających się wokół swoich osi). Wielkością wejściową do modelu pojazdu jest przebieg wartości momentu tarcia M_{Hi} koła poszczególnych osi jezdnych. Wyjściem z modelu jest zbiór wielkości fizycznych opisujących kinematykę (a_p – opóźnienie hamowania, v_{Ki} – prędkości obrotowe kół jezdnych) oraz dynamikę (Z_i – siły nacisku kół jezdnych na podłoże) jego ruchu.

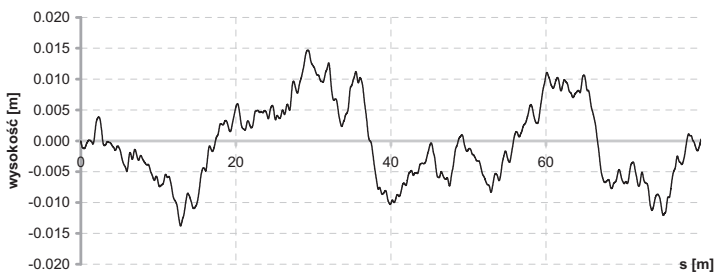
Model sił stycznych dostarcza informacji o wartościach sił w strefie współpracy ogumionego koła z podłożem. W modelu zastosowano algorytm zaproponowany przez Dugoffa, Fenchera, Segela. Niezbędne parametry wymagane w modelu sił stycznych przyjęto wg danych eksperymentalnych ogumienia stosowanego w pojazdach.

Wymuszeniem działającym na model jest przebieg przemieszczenia pedału hamulca. Przykładową zależność wykorzystywaną do wstępnych badań symulacyjnych w warunkach intensywnego hamowania przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Przykładowy przebieg przemieszczenia pedału hamulca (PPH) zróżnicowany ze względu na szybkość jego narastania (0,2 s, 0,5 s, 1,0 s)

Dodatковым wymuszeniem „zewnętrznym” działającym na model może być przebieg nierówności pionowych pochodzący od drogi (rys. 3).

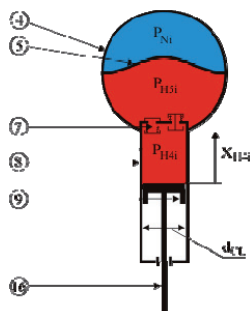


Rys. 3. Przebieg wartości pionowych nierówności drogi

Równania ruchu modelu pojazdu zapisano w trzech prostokątnych, prawoskrętnych układach współrzędnych $Oxyz$, $O_1x_1y_1z_1$, $O_2x_2y_2z_2$. Podstawowe równania decydujące o wartości dynamicznych sił pionowych działających na nadwozie pojazdu obejmują równania ruchu pionowego nadwozia z zawieszeniem mechanicznym lub hydropneumatycznym. Opis przedstawiono w pracy [4].

W modelu uwzględniono: właściwości sprężyste i tłumiące zawieszenia hydropneumatycznego. Przy formułowaniu równań matematycznych modelu kolumny zawieszenia hydropneumatycznego, której schemat przedstawiono na rysunku 4, przyjęto następujące założenia i uproszczenia:

- lepkość, gęstość i temperatura cieczy nie ulega zmianom podczas trwania procesu przejściowego,
- siły lepkościowego tarcia tłoka w cylindrze są pomijane z uwagi na ich małą wartość,
- ciecz jest nieściśliwa, a elementy przenoszące ciśnienie cieczy roboczej są sztywne i nie odkształcają się pod wpływem ruchu lub zmiany tego ciśnienia,
- strumień cieczy jest ciągły.



Rys. 4. Schemat obliczeniowy kolumny zawieszenia hydropneumatycznego
 Oznaczenia: 4 - pneumatyczny element sprężysty, 5 - membrana, 7 - element tłumiący,
 8 - cylinder hydrauliczny, 9 - tłok, 16 - tłoczysko

Opis matematyczny modelu kolumny hydropneumatycznej polegał na ułożeniu równań matematycznych obejmujących:

- równania opisujących działanie elementów ruchomych,
- równania strat ciśnienia przepływu cieczy w elementach hydraulicznych,
- równań bilansu chwilowych masowych strumieni cieczy (równania węzłów lub równania obwodów).

4. WARIANTY OBLICZEŃ SYMULACYJNYCH

Opracowany model pojazdu z zawieszeniem hydropneumatycznym i układem hamulcowym EBS/ABS umożliwia przeprowadzenie obliczeń symulacyjnych wg różnych wariantów konfiguracji modelu. W ramach badań możliwe jest także określanie wpływ wybranych zmian konstrukcyjnych na zachowanie pojazdu w ruchu: prędkości początkowej jazdy, rodzaju zawieszenia, czasu hamowania, rodzaju nawierzchni, ciśnienia powietrza w zbiorniku układu pneumatycznego, konfiguracji układu ABS, liczby hamowanych kół.

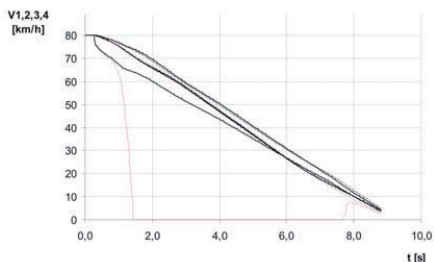
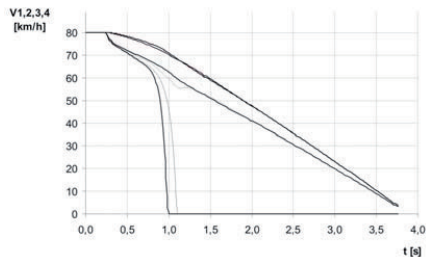
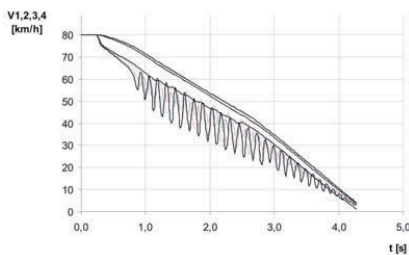
W celu pozyskania informacji na temat zachowania pojazdu opancerzonego w ruchu krzywoliniowym przeprowadzono badania symulacyjne według określonego testu – hamowanie awaryjne w ruchu krzywoliniowym. W teście symulowano przebieg procesu hamowania awaryjnego od prędkości początkowej 80 km/h do zatrzymania się na nawierzchniach: beton ($\mu_0=0,9$), mokry asfalt ($\mu_0=0,5$), lód ($\mu_0=0,2$). Przebieg hamowania rozważano dla układu hamulcowego z włączonym ABS lub wyłączonym oraz dla dwóch stanów sprawności układu hamulcowego: sprawny tj. 8 kół hamowanych, częściowo niesprawny tj. 4 koła tylne hamowane (układ hamulcowy kół pierwszej i drugiej osi jezdnej niesprawny, układ hamulcowy kół trzeciej i czwartej osi jezdnej sprawny). Nominalne wartości parametrów modelu odpowiadają pojazdowi Rosomak. Ponadto możliwy jest zmienny zakres wprowadzanych zmian konstrukcyjnych, który obejmuje następujące

parametry pojazdu: masa, masowe momenty bezwładności bryły nadwozia, zmiana położenia środka masy.

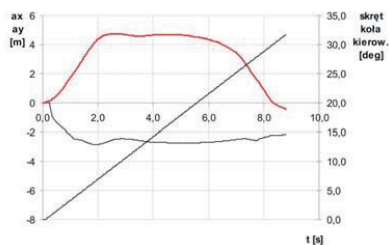
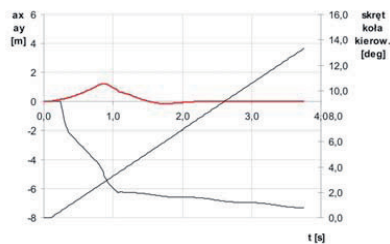
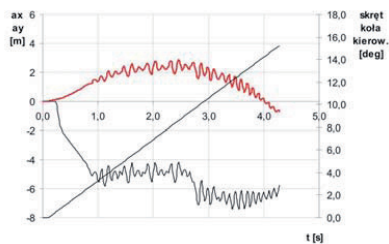
5. WYNIKI BADAŃ

5.1. BADANIA NA NAWIERZCHNI SUCHEJ

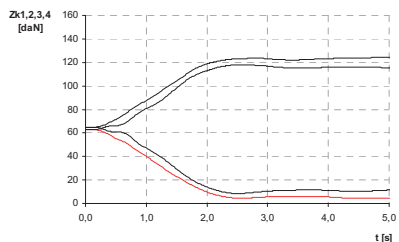
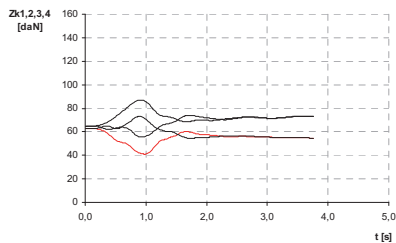
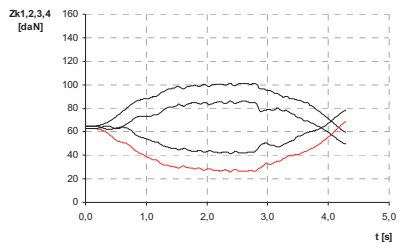
Wyniki badań zostały zestawione na licznych rysunkach przedstawiających charakterystyki czasowe zmiany parametrów w trakcie manewru. Nawierzchnia została scharakteryzowana poprzez współczynnik przyczepności równy 0,9. Na rysunkach 5 – 7 przedstawiono charakterystyki czasowe prędkości liniowej kół na poszczególnych 4 osiach pojazdu dla trzech wariantów: sprawny układ hamulcowy oraz włączony ABS (rys. 5); sprawny układ hamulcowy oraz wyłączony ABS (rys. 6); niesprawny układ hamulcowy oraz wyłączony ABS (rys. 7). Dla tożsamyh wariantów na rysunkach nr 8 – 10, przedstawiono charakterystyki czasowe przyspieszenia wzdłużnego oraz poprzecznego; na rysunkach nr 11 – 13 charakterystyki czasowe reakcji pionowych od podłoża; na rysunkach 14 – 16 charakterystyki czasowe przebiegu momentu hamującego na kołach podczas hamowania.



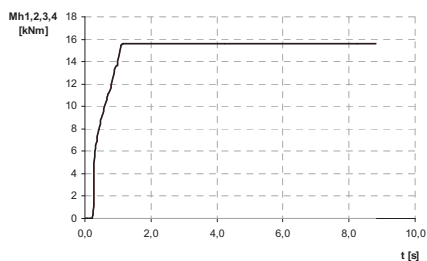
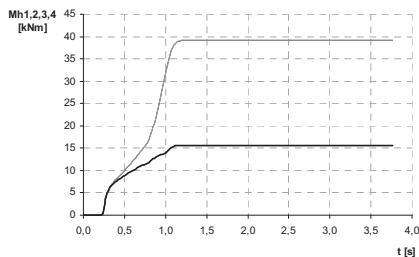
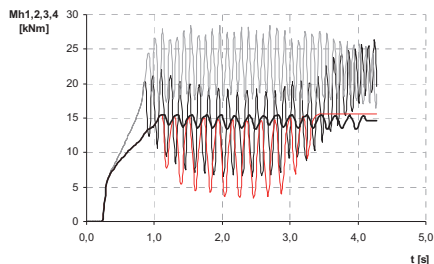
Rys. 5, 6, 7. Charakterystyki czasowe prędkości liniowej na kołach poszczególnych osi podczas hamowania na łuku drogi – nawierzchnia betonowa



Rys. 8, 9, 10. Charakterystyki czasowe przyspieszenia wzdłużnego oraz poprzecznego w środku masy pojazdu podczas hamowania na łuku drogi – nawierzchnia betonowa



Rys. 11, 12, 13. Charakterystyki czasowe reakcji pionowych od podłoża podczas hamowania na łuku drogi – nawierzchnia betonowa

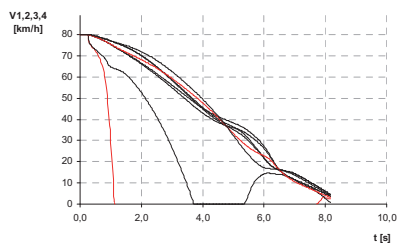
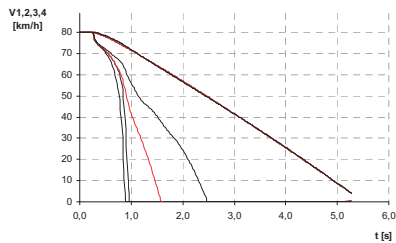
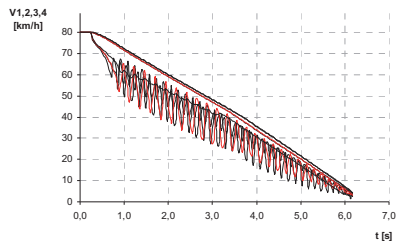


Rys. 13, 14, 15. Charakterystyki czasowe przebiegu momentu hamującego na kołach podczas hamowania na łuku drogi – nawierzchnia betonowa

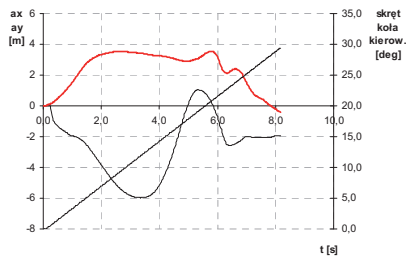
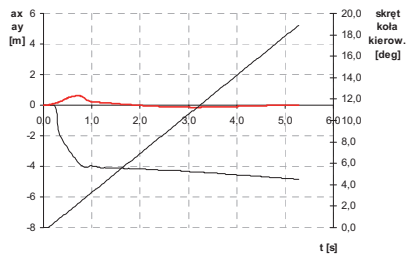
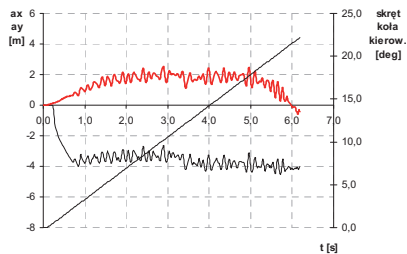
Rezultaty badań dla nawierzchni betonowej pozwoliły stwierdzić, że największą intensywnością hamowania charakteryzuje się wariant nr 2 (sprawne hamulce, brak ABS). Wystąpiło największe opóźnienie i zarazem wystąpił najwyższy moment hamujący. Przy tym dochodzi do zablokowania kół osi 3 i 4. Jednakże tylko w wariantcie nr 1 pojazd zachowuje stateczność. W wariantcie nr 2 pojazd nie kontynuuje zadanego toru jazdy po łuku, przechodzi w ruch opóźniony prostoliniowy. W wariantcie nr 3, w którym pracują tylko hamulce 3 i 4 osi dochodzi do odciążenia kół strony wewnętrznej. Pojazd znajduje się na granicy oderwania kół od podłoża zacieśnia tor jazdy.

5.2. BADANIA NA NAWIERZCHNI MOKREJ

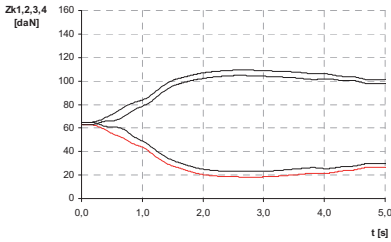
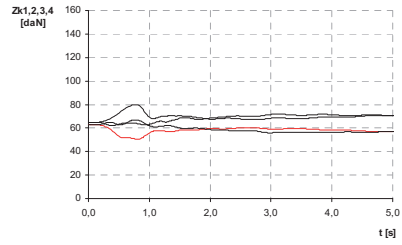
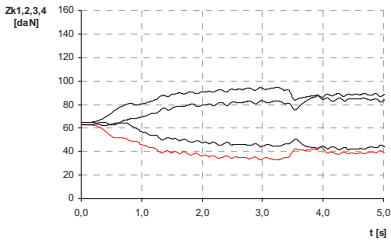
W kolejnym etapie badań modyfikując współczynnik przyczepności symulowano nawierzchnię mokrą. Na rysunkach 16 – 18 przedstawiono charakterystyki czasowe prędkości linowej kół na poszczególnych 4 osiach pojazdu dla wymienionych trzech wariantów. Dla tożsamyh wariantów na rysunkach nr 19 – 21, przedstawiono charakterystyki czasowe przyspieszenia wzdłużnego oraz poprzecznego; na rysunkach nr 22 – 24 charakterystyki czasowe reakcji pionowych od podłoża; na rysunkach 25 – 27 charakterystyki czasowe przebiegu momentu hamującego na kołach podczas hamowania.



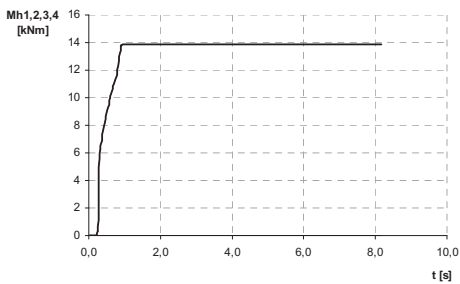
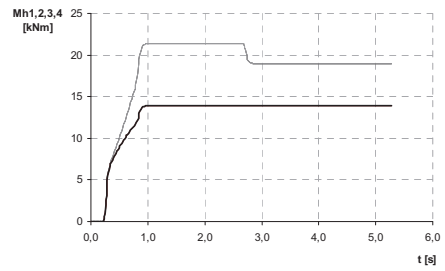
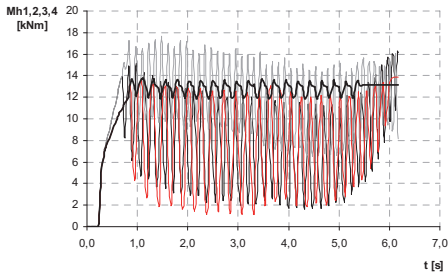
Rys. 16, 17, 18. Charakterystyki czasowe prędkości liniowej na kołach poszczególnych osi podczas hamowania na łuku drogi – nawierzchnia mokra



Rys. 19, 20, 21. Charakterystyki czasowe przyspieszenia wzdłużnego oraz poprzecznego w środku masy pojazdu podczas hamowania na łuku drogi – nawierzchnia mokra



Rys. 22, 23, 24. Charakterystyki czasowe reakcji pionowych od podłoża podczas hamowania na łuku drogi – nawierzchnia mokra

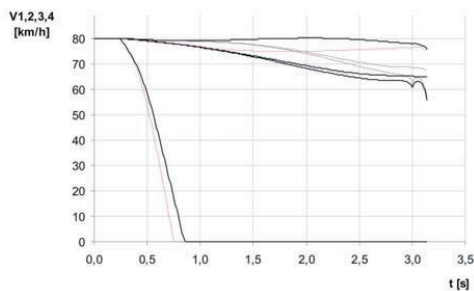
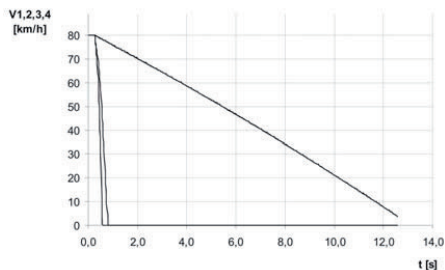
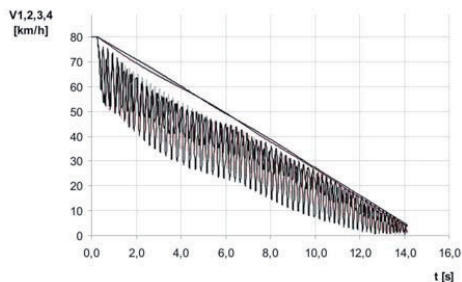


Rys. 25, 26, 27. Charakterystyki czasowe przebiegu momentu hamującego na kołach podczas hamowania na łuku drogi – nawierzchnia mokra

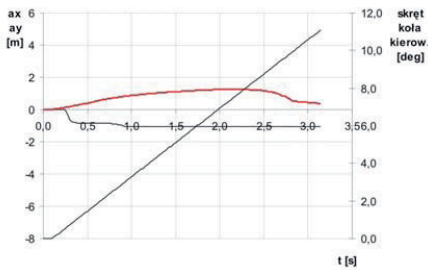
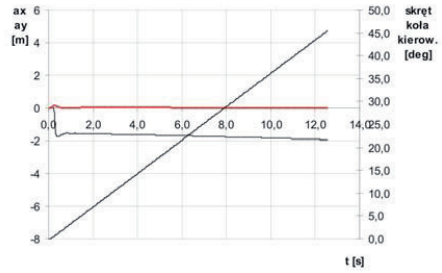
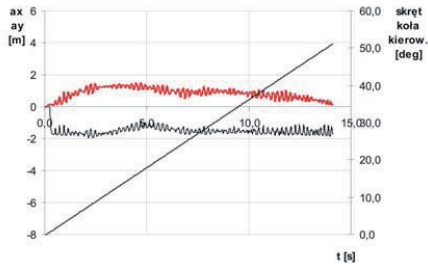
Badania na nawierzchni mokrej uwypukliły tendencje w zachowaniu się pojazdu na nawierzchni suchej. Najszybciej do zatrzymania pojazdu dochodzi w wariancie nr 2. To i w tym wypadku efekt najwyższej wartości momentu hamującego, który tym razem doprowadza do zablokowania kół 2, 3 i 4 osi. W efekcie blokowania kół pojazd rozpoczyna ruch prostoliniowym, mimo skręconych kół kierowanych. W wariancie nr 3 intensywność hamowania jest najmniejsza. Mimo niskiej wartości momentu hamującego dochodzi do zablokowania kół ostatniej osi. Pojazd przechodzi w nadsterowność, zacieśniając tor jazdy, co doprowadza do zmiany kierunku przyspieszenia poprzecznego i znacznej różnicy w reakcjach od podłoża między stronami pojazdu.

5.3. BADANIA NA NAWIERZCHNI OBLODZONEJ

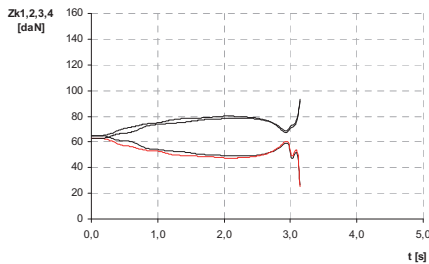
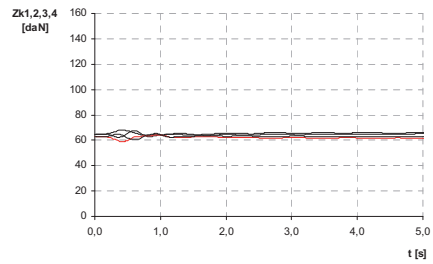
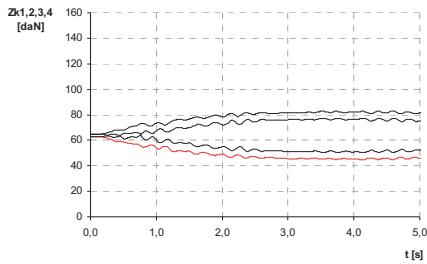
Obniżenie współczynnika przyczepności do wartości 0,2 pozwoliło prowadzić badania symulacyjne równoważne warunkom nawierzchni oblodzonej. Na rysunkach 28 – 30 przedstawiono charakterystyki czasowe prędkości liniowej kół na poszczególnych 4 osiach pojazdu dla wymienionych trzech wariantów. Dla tożsamyh wariantów na rysunkach nr 31 – 33, przedstawiono charakterystyki czasowe przyspieszenia wzdłużnego oraz poprzecznego; na rysunkach nr 34 – 36 charakterystyki czasowe reakcji pionowych od podłoża; na rysunkach 37 – 39 charakterystyki czasowe przebiegu momentu hamującego na kołach podczas hamowania.



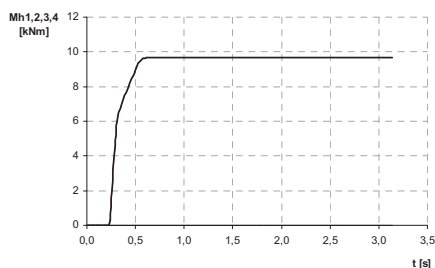
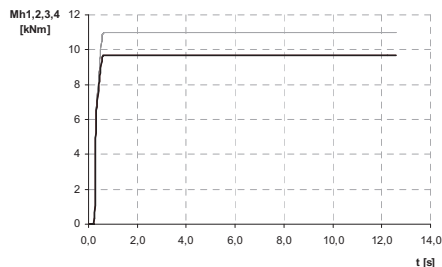
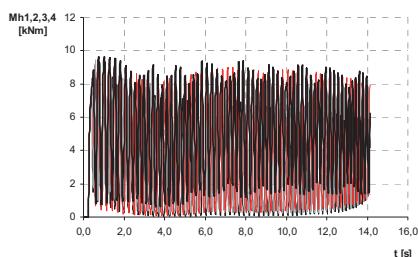
Rys. 28, 29, 30. Charakterystyki czasowe prędkości liniowej na kołach poszczególnych osi podczas hamowania na łuku drogi – nawierzchnia oblodzona



Rys. 31, 32, 33. Charakterystyki czasowe przyspieszenia wzdłużnego oraz poprzecznego w środku masy pojazdu podczas hamowania na łuku drogi – nawierzchnia oblodzona



Rys. 34, 35, 36. Charakterystyki czasowe reakcji pionowych od podłoża podczas hamowania na łuku drogi – nawierzchnia oblodzona



Rys. 37, 38, 39. Charakterystyki czasowe przebiegu momentu hamującego na kołach podczas hamowania na łuku drogi – nawierzchnia oblodzona

Ruch na nawierzchni oblodzonej skutkował wysoką aktywnością układu ABS. Jedynie w tym wariancie pojazd zachował krzywoliniowy tor jazdy. W wariancie nr 2 dochodzi do blokowania kół 2, 3 i 4 osi pojazd od początku traci stateczności i porusza się ruchem prostoliniowym, o czym świadczy wartość przyspieszenia poprzecznego bryły nadwozia równa 0. W przypadku niesprawnego układu hamulcowego po 3 sekundach ruchu dochodzi do zarzucenia na bok i niekontrolowanego poślizgu kół.

6. PODSUMOWANIE

Podczas hamowania awaryjnego, dla zestawu danych adekwatnych dla pojazdu klasy Rosomak, dają się zauważyć, że niedopuszczenie do zablokowania kół oraz sprawność układu hamulcowego wpływają na ruchliwość pojazdu. W tym wypadku jest to zdolność do zatrzymania pojazdu na zadanym krzywoliniowym torze jazdy. Może to mieć znaczenie w sytuacji omijania przeszkody i dynamicznej jazdy w warunkach zagrożenia bojowego. Rola sprawnego układu hamulcowego nabiera znaczenia wraz z obniżeniem współczynnika przyczepności. Blokowanie kół w ruchu krzywoliniowym przyczynia się do zwiększenia tendencji do przechodzenia w prostoliniowy tor jazdy lub poślizg boczny.

Wyniki badań symulacyjnych mogą stanowić podstawę do podjęcia decyzji o stosowaniu ABS, regulacji jego modulatora, czy też doboru korektora siły hamowania pomiędzy osiami. W oparciu o wyniki można budować programy szkoleniowe

(scenariusze) dla kierowców pojazdów specjalnych, jeśli ich szkolnie nie zawiera elementów techniki jazdy w sytuacjach krytycznych.

Bibliografia

1. Maclaurin B. Progress In British Tracked Vehicle Suspension Systems SAE Technical Paper Series Paper no. 830442. 1983
2. Miller L.R, Nobles C.M. The Design and Development of a Semi-Active Suspension for a Military Tank, SAE Technical Paper Series Paper no. 881133. 1988.
3. Simiński P. Zwrotność pojazdów. Wydawnictwo Bel-Studio Warszawa 2012.
4. Simiński P., Metodyka określania wpływu wybranych zmian konstrukcyjnych na bezpieczeństwo ruchu wojskowych pojazdów kołowych, Rozprawy nr 152, Wydawnictwo Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz 2011.
5. Wicher J. Bezpieczeństwo samochodów i ruchu drogowego. WKiŁ Warszawa 2004.

INFLUENCE FAILURE IN BRAKING SYSTEM FOR BEHAVIOUR SPECIAL VEHICLE DURING EMERGENCY BRAKING IN CURVILINEAR MOTILITY

Summary: Construction of modern land-based platforms is one of the main priorities of the Armed Forces. The article concerns the implementation of modeling and simulation of behavior special vehicles during braking. With the help of the constructed model of the braking system, which incorporates ABS and EBS systems simulation tests were performed. Studies related to the effect of the brake system failure on the behavior of the armored personnel carrier.

Keywords: armored personnel carrier, modeling, simulation, road safety