

DĄBROWSKA Agnieszka
ŁOPATKA Marian Janusz
RUBIEC Arkadiusz¹

PROBLEMY OCENY EFEKTYWNOŚCI ZAWIESZEŃ BEZZAŁOGOWYCH PLATFORM LĄDOWYCH

Mobilność terenowa Bezzałogowych Platform Lądowych (BPL) w istotny sposób wpływa na ich możliwości robocze. Zaprojektowanie efektywnie działającego układu zawieszenia, zwiększającego zdolność pokonywania przez BPL przeszkód terenowych spowoduje zwiększenie ich możliwości roboczych. Obecnie stosowane metody służące do oceny skuteczności działania zawieszek terenowych pojazdów i maszyn załogowych nie mogą być w efektywny sposób wykorzystane w przypadku BPL. W referacie opisano ograniczenia wynikające z wykorzystania istniejących sposobów oceny układów zawieszek oraz wskazano kierunki badań, umożliwiających opracowanie nowych, skuteczniejszych w przypadku BPL metod.

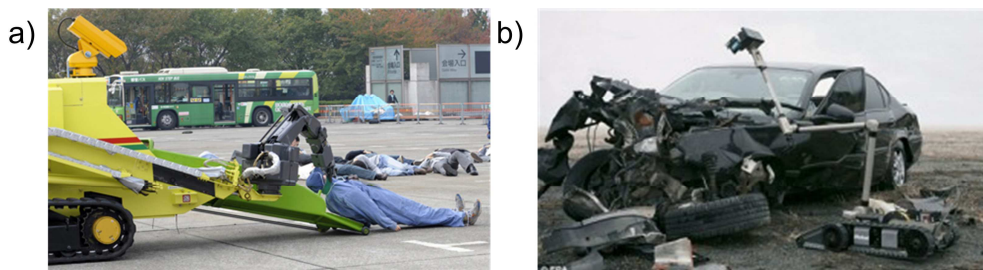
EVALUATION PROBLEMS OF UNMANNED GROUND VEHICLES SUSPENSION SYSTEMS EFFICIENCY

Mobility of Unmanned Ground Vehicles (UGV) is crucial for their working abilities. Highly effective suspension system increasing abilities of UGV to overcome terrain obstacles is able to increase its working efficiency as well. Currently used methods for evaluation the effectiveness of suspension systems designed for off-road vehicles and machines can not be applied directly in case of UGV. In this paper limitations resulting from using existing methods for suspension systems evaluation as well as research direction to develop new and more effective for UGV methods are presented.

1. WPROWADZENIE

Powszechne wykorzystywanie mobilnych Bezzałogowych Platform Lądowych (BPL) w strefach bezpośredniego zagrożenia dla zdrowia i życia człowieka stało się dziś standardem. Towarzyszą one ludziom nie tylko w czasie działań ratowniczych (rys.1a), lecz również podczas klęsk żywiołowych, czy skażeń środowiska naturalnego (rys.1b). Niejednokrotnie zadania te wykonywane są w trudnodostępnym terenie oraz niesprzyjających warunkach.

¹Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, 00 - 908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2,
tel. +48 22 683-71-07, e-mail: adabrowska@wat.edu.pl, mlopatka@wat.edu.pl, arubiec@wat.edu.pl



Rys.1. Mobilne BPL podczas: a) próby ewakuacji ранego, b) pomiaru poziomu skażenia wokół elektrowni FUKUSHIMA

Podstawowym kryterium przydatności BPL jest możliwość samodzielnego dotarcia w miejsce potencjalnego zagrożenia (dla zdrowia i życia człowieka). Zatem możliwości robocze platform bezzałogowych ściśle związane są z ich mobilnością.

W większości przypadków BPL wyposażone są w różnego rodzaju manipulatory oraz głowice obserwacyjne, co w znaczący sposób poszerza spektrum ich wykorzystania i jednocześnie zwiększa wymagania stawiane wobec ich układów zawiesznień.

W odróżnieniu od pojazdów samochodowych, których zadaniem jest głównie transport (przeważnie po drogach publicznych) ludzi i towarów, zawieszenie Bezzałogowej Platformy Lądowej powinno zapewnić jej:

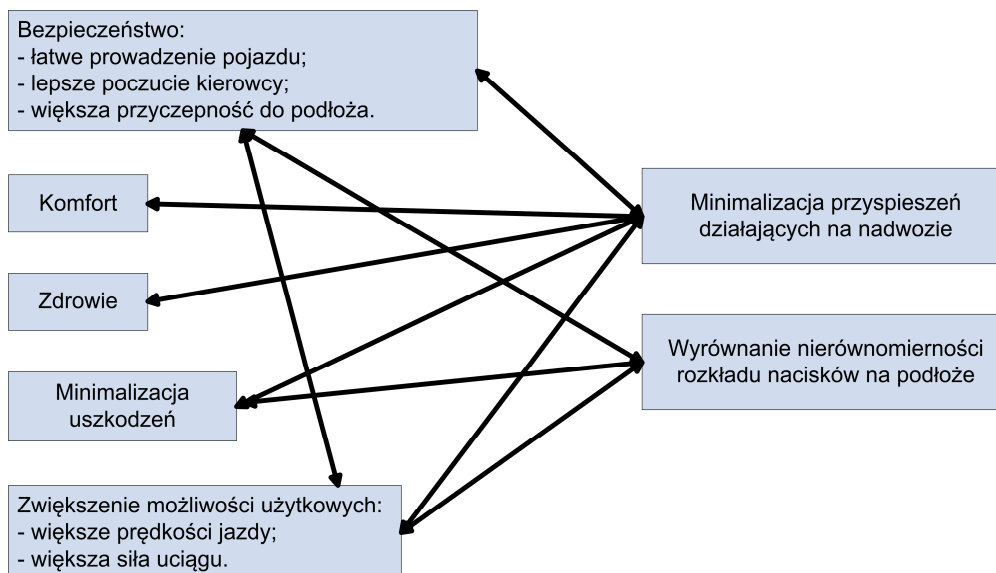
- możliwie jak najszybsze dotarcie (w trudnodostępnym terenie) w miejsce potencjalnego zagrożenia – wymagana zdolność rozwijania wysokich sił przyczepności, prędkości jazdy itp.;
- efektywną pracę osprzętem roboczym poprzez zapewnienie zapasu stateczności wzdłużnej i poprzecznej.

Wymagania te (w przypadku jazdy – zawieszenie podatne, praca osprzętem – zawieszenie sztywne) postawione wobec klasycznego układu z mechanicznymi elementami sprężysto-tłumiącymi są sprzeczne.

Zapewnienie określonego poziomu mobilności wymaga opracowania, zaprojektowania i oceny efektywności działania specjalnych układów zawiesznień BPL. Aby tego dokonać należy dysponować adekwatnymi narzędziami, dzięki którym możliwa będzie obiektywna ocena efektywności działania nowych typów układów zawiesznień.

2. ISTNIEJĄCE WYMAGANIA

Szeroko opisywane w literaturze [1, 3, 4, 5, 6] wytyczne do projektowania oraz metody oceny jakości i efektywności działania układów zawiesznień dotyczą maszyn i pojazdów załogowych (terenowych oraz szosowych). Podstawową funkcją realizowaną przez nie jest minimalizacja skutków oddziaływania nierówności pochodzących od podłoża i przenoszonych na ludzi znajdujących się w ich wnętrzu. Istotne jest również zapewnienie równomiernego rozłożenia nacisków na podłoże zapewniającego rozwijanie wysokich sił przyczepności.



Rys.2. Podstawowe funkcje i wymagania stawiane wobec układów zawieszeń pojazdów samochodowych

Charakterystyka elementów sprężysto-tłumiących układów zawieszenia (sposób resorowania) mają (poza komfortem odczuwanym przez użytkowników pojazdów) wpływ na:

- kierowność i stateczność ruchu;
- przechyły poprzeczne i wzdłużne bryły nadwozia.

Istotne jest aby nadwozie pojazdu lub maszyny podczas pokonywania poprzecznych nierówności nie wykonywało przechyłów wzdłużnych (kołysań), tylko drgania pionowe, zachowując tym samym równoległe ustawienie nadwozia do powierzchni [6].

Pasażerowie odczuwają komfort jazdy na podstawie oddziaływujących na nich przyspieszeń oraz drgań mechanicznych. Przy szczególnie niskich częstotliwościach (około 0,5 Hz) człowiek odczuwa przemieszczenia i prędkości drgań o 80 % słabiej, niż w przypadku zawieszenia twardego o częstotliwości drgań własnych równej około 1,7 Hz. Dlatego zalecane jest aby częstotliwość drgań własnych nadwozia była zbliżona do 1 Hz [5]. W celu oceny spełniania wymagań opracowano wiele metod badawczych.

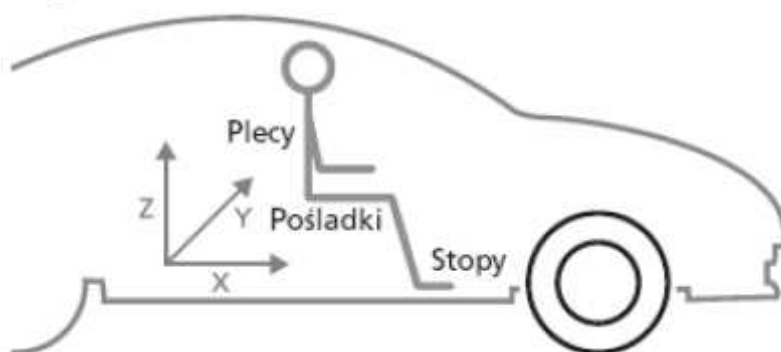
3. METODY OCENY ZAWIESZEŃ

Istniejące metody oceny jakości i efektywności działania zawieszeń kołowych układów jazdy związane są głównie z oddziaływaniem wymuszeń zewnętrznych na kierowców (operatorów) i pasażerów znajdujących się we wnętrzach pojazdów. Opracowane zostały one dla terenowych platform i maszyn załogowych.

3.1 Ocena wartości przyspieszeń

Wieloletnie badania układów zawiesznień pozwoliły ściśle określić ich wpływ na minimalizację oddziaływania drgań na ludzi jak i bezpieczeństwo ruchu. Umożliwiło to opracowanie szeregu metod (normy ISO 5008, ISO 2631-1, czy VDI 2057) oraz wytycznych (dopuszczalne wartości przyspieszeń, częstotliwości drgań), które są powszechnie stosowane przy projektowaniu układów zawiesznień.

Najczęstszym ocenianym parametrem decydującym o efektywności działania zawieszienia jest wartość przyspieszeń, jakim poddawany jest kierowca (operator). Ich wartość i charakter ściśle związane są z odczuwalnym przez ludzi komfortem (rys.3).



Rys.3. Oznaczenia kierunków oddziaływania drgań na człowieka w pojeździe [1]

Zgodnie z normą ISO 2631-1 ocenie ulegają zarówno wartości przyspieszeń liniowe $a_{v,t}$ jak i kątowych $a_{v,r}$. Przy czym, przy obliczaniu przyspieszeń całkowitych, wartościom na poszczególnych kierunkach przypisana jest odpowiednia waga i na tej podstawie wyliczana jest wartość RMS przyspieszeń zgodnie z zależnościami:

$$a_{v,t} = \sqrt{(ka_{w,x})^2 + (ka_{w,y})^2 + (ka_{w,z})^2} \quad (1)$$

oraz

$$a_{v,r} = \sqrt{(k_x a_{w,rx})^2 + (k_y a_{w,ry})^2 + (k_z a_{w,rz})^2} \quad (2)$$

gdzie: a_w – wartość przyspieszenia w określonym kierunku;

$$k = 1;$$

$$k_x = 0,63;$$

$$k_y = 0,4;$$

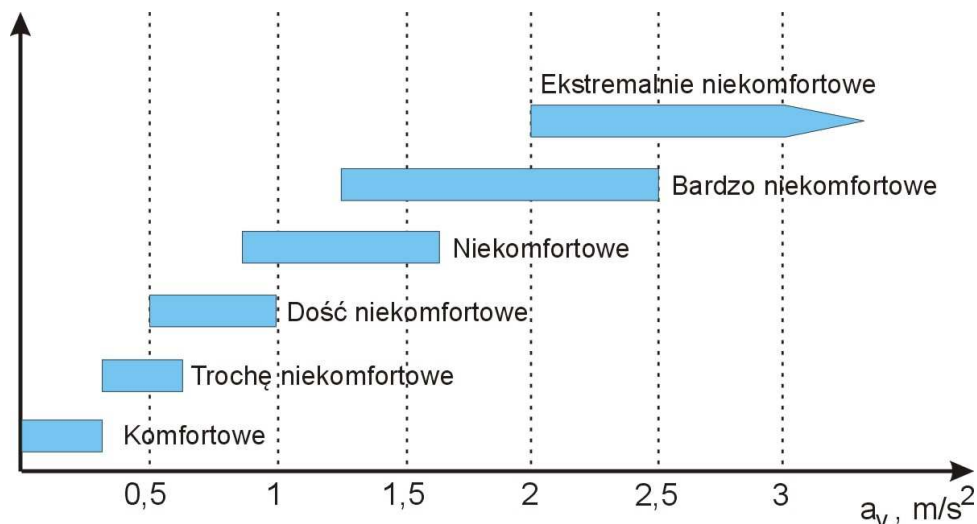
$$k_z = 0,2$$

są wagami dla przyspieszeń działających na i wokół poszczególnych kierunków (rys.3).

Przyspieszenia wypadkowe obliczane są zgodnie z zależnością:

$$a_v = \sqrt{a_{v,t}^2 + a_{v,r}^2} \quad (3)$$

Zawieszenie jest oceniane na podstawie wartości (3) i klasyfikowane pod kątem komfortu (rys.4).



Rys.4. Podział efektywności działania zawieszenia na podstawie kryterium komfortu w zależności od wartości przyspieszeń kierowcy zgodnie z normą ISO 2631-1

Istotne jest również wzajemne dopasowanie charakterystyki zawieszenia poszczególnych osi pojazdu oraz właściwości sprężysto-tłumiących foteli (których w przypadku BPL nie ma). Częstotliwość drgań własnych tylnej części pojazdu (maszyny) powinna być o 10 – 20 % większa niż przedniej. Dzięki temu wywołane nierównościami podłoża drgania przedniej części są "doganiane" przez szybsze drgania tylnej [6]. W ten sposób można wyeliminować niekorzystne ze względu na komfort jazdy kołysania wzdłużne (przyspieszenia kątowe) nadwozia. Dominujący charakter mają wówczas drgania pionowe bryły nadwozia.

Dodatkowo zalecane jest w celu zapewnienia komfortu, aby zawieszenie przednie było mniej sztywne od tylnego.

3.2 Ocena częstotliwości drgań

Wartość przyspieszeń nie jest jedynym brany pod uwagę wskaźnikiem odpowiadającym za skuteczność działania układów zawieszonych. Poza ich wartością analizowane są również częstotliwości drgań, jakie oddziałują na człowieka i porównywane są one z częstotliwościami drgań własnych ludzkich narządów wewnętrznych (tab.1).

Tab.1. Pasma częstotliwości drgań własnych niektórych narządów człowieka [1]

	Nazwa organu	Częstotliwość, Hz
1.	Człowiek stojąc	4 - 6
2.	Człowiek siedząc	5 - 12
3.	Głowa	4 - 5, 17 - 25
4.	Klatka piersiowa	5 - 9
5.	Żołądek (zależnie od stopnia wypełnienia)	2 - 7
6.	Oczy	20 - 25
7.	Układ ręka - przedramię (zależnie od ustawienia)	10 - 30
8.	Receptory dotyku	200 - 300
9.	Szczeka	6 - 8
10.	Krtąń, tchawica, oskrzela	12 - 16
11.	Wątroba	3 - 4
12.	Kręgosłup	8
13.	Miednica	5 - 9
14.	Kończyny górne	3
15.	Kończyny dolne	5

Największe zagrożenie dla człowieka stanowią drgania, których częstotliwość wymuszeń będzie zbliżona do częstości drgań własnych narządów wewnętrznych człowieka. Dla częstotliwości drgań poniżej 2 Hz ciało człowieka zachowuje się jak jednolita masa. Pierwsza częstotliwość rezonansowa dla człowieka przebywającego w pozycji siedzącej wynosi 4 Hz lub 6 Hz.

Analogiczne podejście do oceny jakości układów zawieszonych przedstawione jest w niemieckiej normie VDI 2057.

3.3 Ocena bezpieczeństwa jazdy

Istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa poruszania się pojazdów i maszyn załogowych (zwłaszcza przy dużych prędkościach) jest zapewnienie jak najlepszego styku każdego koła z podłożem. Szczególnie ważne jest to w przypadku kół kierowanych i napędzanych.

Oceny bezpieczeństwa dokonuje się za pomocą tzw. współczynnika wariancji [3]. Współczynnik ten określany jest przez poziom odchylenia standardowego siły nacisku od wartości statycznej siły nacisku pojazdu, zgodnie z zależnościami:

$$\bar{F}_z = \frac{1}{T} \int_0^T F_z(t) dt \quad (4)$$

$$\sigma_{F_z} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (F_z(t) - \bar{F}_z)^2 dt} \quad (5)$$

$$W = \frac{\sigma_{F_z}}{F_{Z_stat}} \quad (6)$$

gdzie: F_{Z_stat} – siła obciążenia statycznego pojedynczego koła, N ;
 σ_{F_z} – odchylenie standardowe wartości siły nacisku, N ;
 T – okres czasu, s ;
 $F_z(t)$ – wartość chwilowa siły nacisku koła, N ;
 W – współczynnik wariancji.

Współczynnik W powinien być możliwie jak najmniejszy. Zbyt duże odchylenia wartości siły $F_z(t)$ mogą spowodować utratę kontaktu koła z podłożem i w efekcie brak kierowalności.

4. PROBLEM OCENY ZAWIESZENIA BPL

W większości przypadków sterowanie BPL (w odróżnieniu od pojazdów i maszyn załogowych) odbywa się w sposób zdalny w systemie teleoperacji. Ocena efektywności działania zawieszenia BPL pod kątem tłumienia drgań i przyspieszeń do wartości akceptowalnych przez człowieka wprowadza zbędne ograniczenia. Wyposażenie BPL w układ zawieszenia spełniający wymagania oparte, m.in. na normach ISO 2631-1, VDI 2057 czy ISO 5008 powoduje, że może ona nie wykorzystać w pełni potencjału wynikającego z możliwości jej osprzętów roboczych (np. brak możliwości dojechania w trudnodostępnym terenie w miejsce bezpośredniego działania).

Zmniejszenie wymagań związanych z drganiami przenoszonymi na nadwozie platformy (brak człowieka) stwarza nowe możliwości przy projektowaniu zawiesznień BPL. W odróżnieniu od platform załogowych konieczne jest również zapewnienie stabilności przekazywanego zdalnie do operatora obrazu.

Człowiek kierujący pojazdem, znajdując się bezpośrednio w jego wnętrzu, dostosowuje prędkość jazdy do warunków terenowych (odczuwając jego przechyły). Dokonując odpowiednich korekt przeciwdziała utracie stateczności pojazdu (szczególnie poprzecznej). Zdalne sterowanie platformą w pewnym zakresie ogranicza percepcję teleoperatora. Dlatego oceniając zawieszenie pod kątem jego zdolności do zapewnienia zapasu stateczności (zwłaszcza dynamicznej) należy zwiększyć wymagania w stosunku do platform załogowych.

Brak możliwości bezpośredniego wykorzystania istniejących metod badania efektywności układów zawiesznień w przypadku BPL powoduje konieczność opracowania nowych wskaźników ich oceny. W tym celu należy przeprowadzić szereg badań, zarówno symulacyjnych jak i eksperymentalnych. Umożliwi to w efekcie budowę układów zawiesznień w istotny sposób zwiększających możliwości robocze BPL.

Analizy przeprowadzone w Katedrze Budowy Maszyn Wojskowej Akademii Technicznej pozwoliły wytypować istotne aspekty, na które należy zwrócić szczególną uwagę podczas badań, m.in.:

- równomierność rozkładu nacisków na podłoże;
- wartość rozwijanych sił przyczepności;

- uzyskiwanie wysokiej siły uciągu;
- stabilność podczas jazdy (stateczność wzdłużna oraz poprzeczna);
- stabilność podczas pracy z wykorzystaniem narzędzi roboczych, czy systemów pomiarowych;
- minimalizację wpływu ukształtowania podłoża na system wizyjny układu teleoperacji;
- zdolność pokonywania przeszkód terenowych;
- percepcję operatora pracującego w systemie teleoperacji.

Przeprowadzone wstępne badania symulacyjne [2] pokazały, że jednym z najbardziej wpływających na efektywność pracy teleoperatora parametrem jest wielkość przyspieszeń kątowych oddziaływujących na kamery systemu teleoperacji.

5. WNIOSKI

Zdolność pokonywania przeszkód terenowych przez BPL jest jednym z dominujących czynników wpływających na ich możliwości robocze. Niezbędne jest opracowanie struktury zawieszenia umożliwiającej zwiększenie ich możliwości roboczych.

Ponieważ istniejących metod oceny jakości zawieszenia nie można w bezpośredni sposób wykorzystać do oceny zawieszonych BPL, konieczne jest przeprowadzenie badań w celu opracowania nowych wskaźników oceny, jak również zdefiniowania ich wartości dopuszczalnych.

Przeważnie sterowanie BPL odbywa się w sposób zdalny, dlatego kierowanie się przy projektowaniu wartościami określonymi dla pojazdów i maszyn załogowych, powoduje wprowadzenie niepotrzebnych ograniczeń, w wyniku których nie można w pełni wykorzystać ich potencjalnych możliwości roboczych.

Należy przy tym pamiętać, że przy prowadzeniu badań i opracowywaniu nowych kryteriów nie można stosować dostępnych widm wymuszeń stosowanych dla pojazdów samochodowych, gdyż w przypadku BPL będą one niemiernodajne.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Burdzik R., *Badania drgań płyty podwoziowej pojazdu samochodowego*, Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Transport 2010.
- [2] Dąbrowska A., Łopatka M. J., Rubiec A., *Koncepcja hydropneumatycznego zawieszenie robota wsparcia inżynierskiego*, XIII Międzynarodowa Konferencja nt. Komputerowe systemy wspomagania nauki, przemysłu i transportu TRANSCOMP, Zakopane 2009.
- [3] Mitschke M., *Dynamika samochodu - drgania*, WKiŁ 1989.
- [4] Normy ISO 2631-1, ISO 5008, VDI 2057.
- [5] Prochowski L., *Mechanika ruchu*, WKiŁ, Warszawa 2008.
- [6] Reimpell J., Stoll H., Vetzler J., *The Automotive Chassis, Engineering Principles*, Butterworth-Heinemann, Oxford 2001.