

KUPICZ Włodzimierz¹
GRZESIAK Jerzy¹
SIMIŃSKI Przemysław¹

MOŻLIWOŚĆ POPRAWY SKUTECZNOŚCI UKŁADU HAMULCOWEGO W POJAZDACH SPECJALNYCH POZBAWIONYCH ABS

W przypadku modernizowania pojazdów starszej generacji zachodzi potrzeba modyfikacji układu hamulcowego by zapewnić jego skuteczności w nowym układzie konstrukcyjnym i dla innej charakterystyki technicznej pojazdu. W artykule przedstawiono wyniki analiz poprawy stateczności wojskowego pojazdu specjalnego podczas hamowania. Opisano analityczne obliczenia służące optymalizacji rozdziału sił hamowania na osie pojazdu oraz wyniki badań trakcyjnych skuteczności układu hamulca roboczego w funkcji przeprowadzonych modyfikacji.

THE POSSIBILITY OF IMPROVING THE EFFECTIVENESS OF THE BRAKING SYSTEM IN SPECIAL VEHICLES WITHOUT ABS

In the case of retrofitting older generation need to change the braking system to ensure its effectiveness in the new layout design and other technical characteristics of the vehicle. The article presents the results of the analysis to improve the stability of special military vehicle during braking. Describes the analytical calculations for optimizing the distribution of braking forces on the axles of the vehicle and the results of traction performance brake system as a function of current modifications.

1. WSTĘP

Wojskowe pojazdy specjalne nie podlegają obowiązkowym badaniom homologacyjnym w tym badaniom układów hamulcowych. Podczas badań prototypu dopuszczających pojazd do eksploatacji w WP sprawdzana jest skuteczność układu hamulca roboczego w próbie typu 0 i I. Istotną cechą podlegającą ocenie jest także stateczność ruchu podczas hamowania. Wersje specjalne pojazdów wojskowych powstają na podwoziach wcześniej wdrożonych do eksploatacji. Zabudowa specjalistycznych urządzeń o dużych gabarytach i masie prowadzi do znacznego zwiększenia wysokości położenia środka masy. Powoduje to problemy podczas intensywnego hamowania. Zwiększają się dynamiczne obciążenia poszczególnych osi, co sprawia trudności w rozdziale sił hamowania na poszczególne osie.

¹ Wojskowy Instytut Techniki Panczernej i Samochodowej, 05-070 Sulejówek, ul. Okuniewska 1, tel. 22 783 19 28 fax. 681 10 73, e-mail: sekretariat@witpis.eu

Odciążane osie tylne podczas hamowania łatwo ulegają zablokowaniu, co powoduje zarzucenie pojazdu. Przy wysoko położonym środku masy i dużym momencie bezwładności bryły kończy się to niekiedy jego wywróceniem.

Biorąc pod uwagę, że pojazdy wojskowe w tym specjalne biorą udział w działaniach wojennych i ich kierowcy prowadzą pojazd w warunkach silnego stresu, stateczność pojazdu, jego przewidywalne zachowanie powinny mieć absolutny priorytet nawet kosztem nieznacznego ograniczenia skuteczności, wyrażonej długością drogi hamowania i średnim w pełni rozwiniętym opóźnieniem.

2. OPIS OBIEKTU BADAŃ

Obiektem badań był opancerzony pojazd czteroosiowy ze specjalistyczną zabudową. Układ hamulca roboczego pozbawiony był systemu ABS, rozdział sił hamowania realizowany był jedynie statycznie poprzez różne średnice tłoczków w zaciskach kół poszczególnych osi. Należy nadmienić, że układ ten spełniał wymagania stateczności ruchu i skuteczności hamowania dla podwozia będącego bazą przeprowadzonej modernizacji.

Wymiary:

odległość pomiędzy I i II oraz III i IV osią	– $a = 1,3$ m,
odległość pomiędzy II i III osią	– $b = 2,14$ m,
odległość środka masy od przedniej osi	– $d = 2,144$ m,
wysokość środka masy (od jezdni)	– $h = 1,715$ m,
średnica cylinderków przednich hamulców	– $\phi_p = 60$ mm,
średnica cylinderków tylnych hamulców	– $\phi_t = 56$ mm,

dla uproszczenia przekształceń przyjęto wielkości :

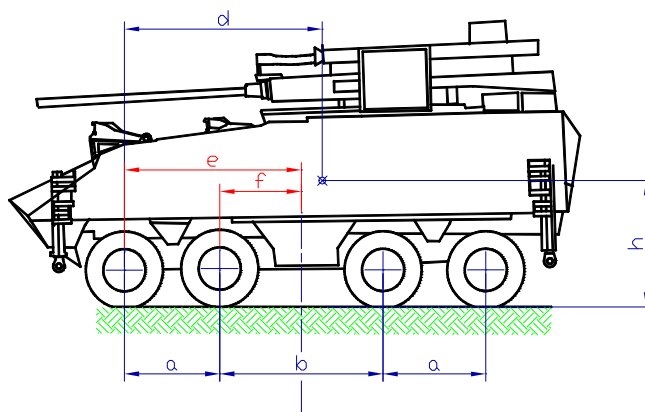
$$e = a + \frac{b}{2} \quad (1)$$

$$f = \frac{b}{2}. \quad (2)$$

Schemat wymiarów przedstawiono na rysunku 1.

Masa całkowita i naciski przypadające na osie:

masa całkowita	– $mc = 23743$ kg
oś I	– $N1s = 5665$ kg,
oś II	– $N2s = 5723$ kg,
oś III	– $N3s = 6070$ kg,
oś IV	– $N4s = 6825$ kg.



Rys. 1 Schemat wymiarów pojazdu

Dla wyznaczenia optymalnego rozkładu sił hamowania niezbędne jest obliczenie nacisków na osie w funkcji opóźnienia. Pojazd podparty na czterech osiach, stanowi układ dwukrotnie statycznie niewyznaczalny. W związku tym, że samochód resorowany jest na sprężynach o jednakowej sztywności oraz rozmieszczenie osi pojazdu jest symetryczne, to rozkład przyrostów obciążeń wywołanych hamowaniem na poszczególne osie jest liniowy i symetryczny, co do wartości, przeciwny co do znaku względem punktu leżącego w środku odległości pomiędzy osiami II i III. To spostrzeżenie upraszcza w znaczący sposób obliczenia dynamicznych zmian obciążeń na poszczególnych osiach. Model hamującego pojazdu można przedstawić jako sztywną belkę, podpartą na czterech elastycznych (o charakterystykach liniowych) podporach, obciążoną momentem M . Na reakcje w podporach składają się siły statyczne, wynikające z masy pojazdu i dynamiczne, równoważące moment M pochodzący od sił bezwładności. Schemat obciążeń przedstawiono na rysunku 2, gdzie:

- $dN1, dN2, dN3, dN4$ – obciążenia dynamiczne kolejnych osi (zależne od opóźnienia), zachodzi zależność $dN1 = dN4$ oraz $dN2 = dN3$
- a_h – opóźnienie hamowania,
- F_p – siła hamowania osi przednich,
- F_t – siła hamowania osi tylnych,
- $k1, k2, k3, k4$ – sztywność zawieszenia osi ($k1 = k2 = k3 = k4$),
- $M = a_h \times mc \times h$ – moment wywołany siłami bezwładności.

Rzeczywisty rozkład obciążeń osi jest zbliżony do liniowego.

3. WYNIKI OBLICZEŃ

3.1 Przebieg współczynników przyczepności w funkcji intensywności hamowania

Współczynnik przyczepności zdefiniowano jako stosunek siły hamowania osi do nacisku osi na jezdnię. W analizowanym przypadku współczynniki przyczepności kolejno dla osi: I, II, III, IV są następujące:

$$\mu 1(\gamma) = \frac{N1(\gamma)}{Fp(\gamma)} = \frac{N1s + dN1(\gamma)}{Fp(\gamma)}; \quad (3)$$

$$\mu 2(\gamma) = \frac{N2(\gamma)}{Fp(\gamma)} = \frac{N2s + dN2(\gamma)}{Fp(\gamma)}; \quad (4)$$

$$\mu 3(\gamma) = \frac{N3(\gamma)}{Ft(\gamma)} = \frac{N3s - dN2(\gamma)}{Ft(\gamma)}; \quad (5)$$

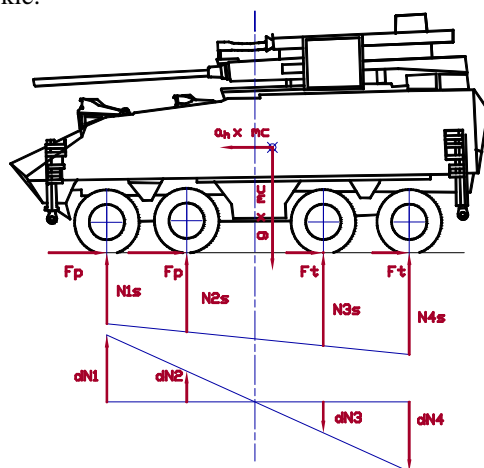
$$\mu 4(\gamma) = \frac{N4(\gamma)}{Ft(\gamma)} = \frac{N4s - dN1(\gamma)}{Ft(\gamma)}; \quad (6)$$

gdzie :

$N1(\gamma)$, $N2(\gamma)$, $N3(\gamma)$, $N4(\gamma)$ – naciski na osie;

$\gamma = \frac{a_h}{g}$ – wskaźnik hamowania (intensywność hamowania);

g – przyspieszenie ziemskie.



Rys. 2 Schemat obciążeń osi podczas hamowania

Po przekształceniach zależności na współczynniki przyczepności przyjmują postać:

$$\mu 1(\gamma) = Cp \times \frac{\gamma}{N1s + A \times \gamma}; \quad (7)$$

$$\mu 2(\gamma) = Cp \times \frac{\gamma}{N2s + B \times \gamma}; \quad (8)$$

$$\mu 3(\gamma) = Ct \times \frac{\gamma}{N3s - B \times \gamma}; \quad (9)$$

$$\mu 4(\gamma) = Cp \times \frac{\gamma}{N4s - A \times \gamma}; \quad (10)$$

gdzie:

$$A = mc \times h \times \frac{e}{2(e^2 + f^2)}; \quad (11)$$

$$B = mc \times h \times \frac{f}{2(e^2 + f^2)}; \quad (12)$$

$$Cp = \frac{K}{K+1} \times \frac{mc}{2}; \quad (13)$$

$$Ct = \frac{1}{K+1} \times \frac{mc}{2}. \quad (14)$$

K – stosunek sił hamowania przedniej osi do tylnej, który jest stały w przypadku braku korektora hamowania (jest cechą konstrukcyjną).

Wykres współczynników intensywności hamownia możliwego do wykorzystania bez zablokowania kół żadnej osi, od współczynnika przyczepności przylgowej μ_m (między kołem a jezdnią). Jeżeli do wzorów na współczynniki przyczepności w miejsce $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ podstawimy współczynnik przyczepności przylgowej μ_m , to po przekształceniach otrzymamy graniczne opóźnienia hamowania dla $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$, dla osi, przy których nie występuje ich blokowanie.

$$\gamma_1(\mu_m) = \frac{N1s \times \mu_m}{Cp - A \times \mu_m}; \quad (15)$$

$$\gamma_2(\mu_m) = \frac{N2s \times \mu_m}{Cp - B \times \mu_m}; \quad (16)$$

$$\gamma_3(\mu_m) = \frac{N3s \times \mu_m}{Ct + B \times \mu_m}; \quad (17)$$

$$\gamma_4(\mu_m) = \frac{N4s \times \mu_m}{Ct + A \times \mu_m}. \quad (18)$$

Graniczną intensywność hamowania pojazdu γ_s wyznacza najmniejsza z tych wartości, która nie może być większa od μ_m .

Współczynniki wykorzystania przyczepności ζ pozwalają ocenić jakość hamowania. Wyznacza się je jako stosunek γ do μ_m . Dla omawianego pojazdu:

$$\zeta_1 = \frac{\gamma_1(\mu_m)}{\mu_m}; \quad (19)$$

$$\zeta_2 = \frac{\gamma_2(\mu_m)}{\mu_m}; \quad (20)$$

$$\zeta_3 = \frac{\gamma_3(\mu_m)}{\mu_m}; \quad (21)$$

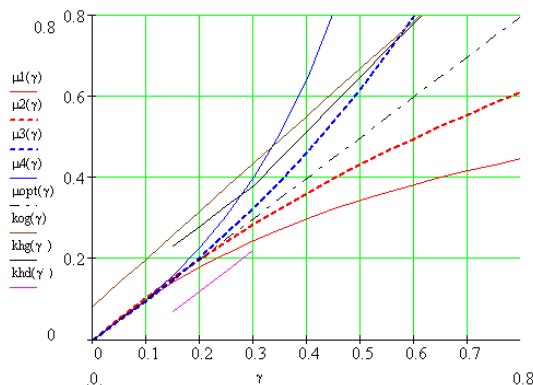
$$\zeta_4 = \frac{\gamma_4(\mu_m)}{\mu_m}. \quad (22)$$

Dla pojazdu współczynnik wykorzystania przyczepności ζ_s wyznacza najmniejszy z współczynników poszczególnych osi, dla danego μ_m .

3.2 Obliczenia dla pojazdu z hamulcami przed modernizacją

Stosunek sił hamownia przednich hamulców do tylnych jest równy stosunkowi kwadratów średnic cylinderków hamulców przednich do tylnych i wynosi $K = 1,148$

Wykres współczynników przyczepności μ dla osi pojazdu dla $K=1,148$ pokazano na rysunku 3.



Rys.3 Wykres współczynników przyczepności μ poszczególnych osi w funkcji intensywności hamowania γ

$\mu_1(\gamma)$, $\mu_2(\gamma)$, $\mu_3(\gamma)$, $\mu_4(\gamma)$ – współczynniki przyczepności osi I, II, III, IV;

$\mu_{opt}(\gamma) = \gamma$ – idealne wykorzystanie przyczepności;

$kog(\gamma)$ – określa granicę, której wg regulaminu 13 EKG nie mogą przekroczyć współczynniki przyczepności:

$$\mu(\gamma) \leq \frac{\gamma + 0,07}{0,85} \text{ dla } \gamma \text{ z zakresu } 0,2 \div 0,8.$$

$khg(\gamma)$ – określa alternatywną granicę, której wg regulaminu 13 EKG nie mogą przekroczyć współczynniki przyczepności osi tylnych:

$$\mu(\gamma) \leq \gamma + 0,08 \text{ dla } \gamma \text{ z zakresu } 0,15 \div 0,3;$$

$$\mu(\gamma) \leq \frac{\gamma - 0,02}{0,74} \text{ dla } \gamma \text{ z zakresu } 0,3 \div 0,8.$$

$khd(\gamma)$ – określa granicę, której wg regulaminu 13 EKG nie mogą przekroczyć współczynniki przyczepności osi przednich;

$$\mu(\gamma) \geq \gamma - 0,08 \text{ dla } \gamma \text{ z zakresu } 0,15 \div 0,3.$$

Podstawowy warunek, który muszą spełniać hamulce pojazdów wieloosiowych grupy N3 (do takiej grupy zalicza się opancerzony pojazd czteroosiowy) jest taki, że dla γ z zakresu $0,15 \div 0,3$ przynajmniej jedna z krzywych współczynników przedniej osi musi się znajdować powyżej jakiegokolwiek krzywej współczynników przyczepności osi tylnej, lub krzywe przyczepności osi tylnej muszą spełnić warunek opisany funkcją $Khg(\gamma)$. Oznacza to, że w zakresie opóźnień $0,15 \div 0,3g$, niezależnie od stanu nawierzchni drogi, przynajmniej koła jednej osi przedniej zostaną zablokowane wcześniej niż koła osi tylnej. Warunek ten jest niezbędny dla zachowania stateczności hamowania.

Dla $K=1,148$, krzywe współczynników przyczepności osi:

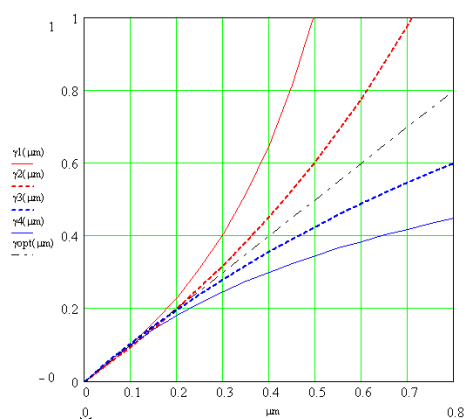
- I i IV przecinają się dla $\gamma = 0,1$,
- II i III przecinają się dla $\gamma = 0,18$.

To oznacza, że krzywe przyczepności osi I znajdują się nad krzywymi przyczepności osi IV, dla intensywności hamowania do $\gamma = 0,1$, a osi II nad osią III, dla $\gamma = 0,18$. Układ hamulcowy nie spełnia żadnego z wyżej wymienionych kryteriów regulaminu 13 EKG. Potwierdzają to próby hamowania, podczas których pojazd był bardzo niestateczny.

Z przebiegu krzywych przyczepności wynika, że nie powinno się stosować korektora hamowania, natomiast należy zwiększyć stosunek siły hamowania przednich osi w stosunku do tylnych (zwiększyć wartość K)

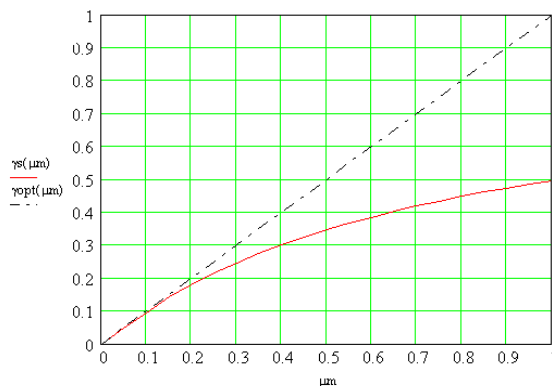
Współczynniki intensywności hamowania, możliwe do wykorzystania bez zablokowania kół żadnej osi, od współczynnika przyczepności przyłgowej μ_m ($K=1,148$).

Wykres granicznych współczynników intensywności hamowania przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4 Graniczne współczynniki intensywności hamowania γ osi w funkcji przyczepności przyłgowej μ_m ($K=1,148$). $\gamma_1(\mu_m)$, $\gamma_2(\mu_m)$, $\gamma_3(\mu_m)$, $\gamma_4(\mu_m)$ – graniczne współczynniki intensywności hamowania dla poszczególnych osi

Gdy rozpatrujemy cały pojazd, to graniczny współczynnik intensywności hamowania określa najniższy ze współczynników intensywności hamowania osi dla danego μ_m . Wykres γ_s w funkcji przyczepności przyłgowej przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5 Graniczny współczynniki intensywności hamowania dla γ_s (cały pojazd) w funkcji przyczepności przylgowej μ_m

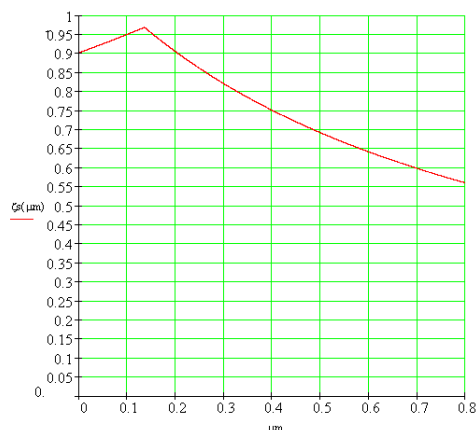
Podczas hamowania na lotnisku zaobserwowano blokowanie kół osi III i VI. Pojazd zachowywał się niestabilnie, występowało bardzo silne, trudne do opanowania zarzucanie tyłu. Hamowanie prowadzone na granicy blokowania kół wykazało niedostateczną skuteczność układu hamulca roboczego, co jest zbieżne z obliczeniami, gdzie dla współczynnika przyczepności przylgowej $\mu_m=0,8$, graniczna intensywność hamowania γ wynosi 0,448. Wyniki pomiarów przy hamulcach zimnych (próba typu 0) zawarto w tablicy 1.

Tablica 1.

Badania typu 0 hamulca roboczego z silnikiem odłączonym							
Lp	Początkowa prędkość hamowania[km/h]		Wynik pomiaru drogi hamowania z niepewnością [m]	Średnie w pełni rozwinięte opóźnienie [m/s ²]		Wartość dopuszczalna drogi hamowania w/g Reg. nr 13 [m]	
	wymag. w/g Reg. nr 13	zmierzona		zmierzone	wymag. w/g Reg. nr 13	dla prędkości wymag.	dla prędkości zmierz.
1	2	3	4	5	6	7	8
1	60	60,2	39,7± 0,8	4,4± 0,4	5,0	36,69	36,91

Współczynniki wykorzystania przyczepności.

Poniżej, na rysunku 6 przedstawiono wykres współczynników ζ_s wykorzystania przyczepności w funkcji przyczepności przylgowej μ_m . W przypadku idealnego hamowania na granicy przyczepności w całym zakresie μ_m wartość ζ_s miałyby wartość 1. Na wykresie widać, że w zakresie dużych wartości przyczepności przylgowej bardzo spada stopień wykorzystania hamulców. Dla $\mu_m = 1$ wynosi zaledwie 56%.



Rys.6 Wykres współczynników ζ_s wykorzystania przyczepności w funkcji przyczepności przylgowej μ_m

3.3. Obliczenia dla pojazdu z hamulcami po modernizacji

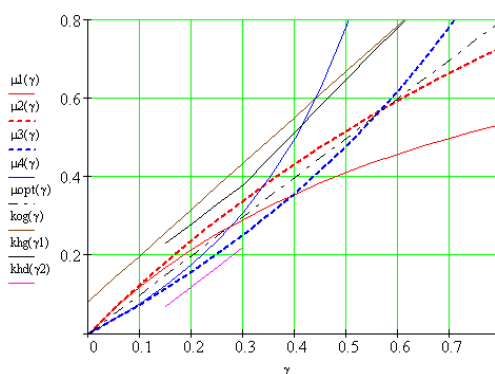
W trakcie testów drogowych, ustalono maksymalne ciśnienia części pneumatycznej systemu sterowania hamulców, dla osiągnięcia maksymalnej wydajności hamulców, bez zrywania przyczepności osi. Ciśnienia te ustawiono na poziomie 8,5 bara dla przednich hamulców i 5,5 bara dla tylnych. W związku tym stosunek siły hamowania kół przednich do tylnych dla tych ciśnień wynosi $K=1,77$.

Wykres współczynników przyczepności dla $K=1,77$ pokazano na rysunku 7.

Dla $K=1,77$ krzywe współczynników przyczepności osi :

- I i IV przecinają się dla $\gamma = 0,277$;
- II i III przecinają się dla $\gamma = 0,565$.

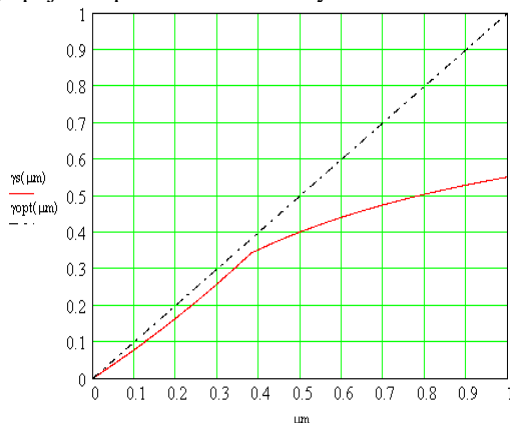
Dla $K=1,77$, przebieg krzywych współczynników przyczepności spełnia wymagania regulaminu 13 EKG, w wymaganym zakresie $\gamma = 0,15 \div 0,3$.



Rys.7 Wykres współczynników przyczepności μ poszczególnych osi w funkcji intensywności hamowania ($K=1,77$)

Zależność współczynników intensywności hamownia możliwego do wykorzystania bez zablokowania kół żadnej osi, od współczynnika przyczepności przyłgowej μ ($K=1,77$).

Wykres γ_s dla całego pojazdu przedstawiono na rys.9.



Rys. 9 Graniczny współczynnik intensywności hamowania γ_s (cały pojazd) w funkcji przyczepności przyłgowej μ , $K=1,77$

Maksymalna intensywność hamowania γ , jaką można osiągnąć na suchej betonowej nawierzchni wynosi od 0,503 do 0,55.

W celu weryfikacji analiz przeprowadzono badania skuteczności układu hamulca roboczego Wyniki pomiarów przy hamulcach zimnych (próba typu 0) zawarto w tablicy 2.

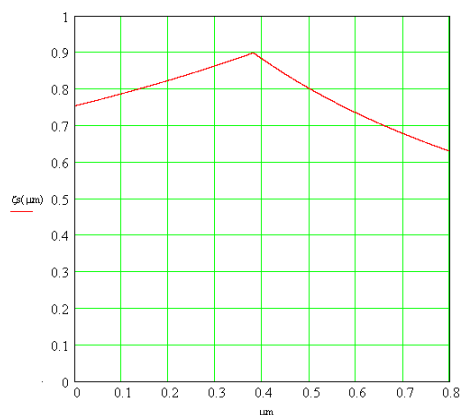
Tablica 2.

Badania typu 0 hamulca roboczego z silnikiem odłączonym po wprowadzeniu zmian w układzie sterowania hamulca roboczego							
Lp	Początkowa prędkość hamowania[km/h]		Wynik pomiaru drogi hamowania z niepewnością [m]	Średnie w pełni rozwinięte opóźnienie [m/s ²]		Wartość dopuszczalna drogi hamowania w/g Reg. nr 13 [m]	
	wymag. w/g Reg. nr 13	zmierzona		zmierzone	wymag. w/g Reg. nr 13	dla prędkości wymag.	dla prędkości zmierz.
1	2	3	4	5	6	7	8
1	60	60,3	28,5± 0,3	5,9± 0,1	5,0	36,7	37

Podczas badania nie zaobserwowano blokowania kół osi tylnych pojazdu, pojazd zachowywał prostoliniowy kierunek jazdy. Nie występowało zarzucanie pojazdu.

Współczynniki wykorzystania przyczepności.

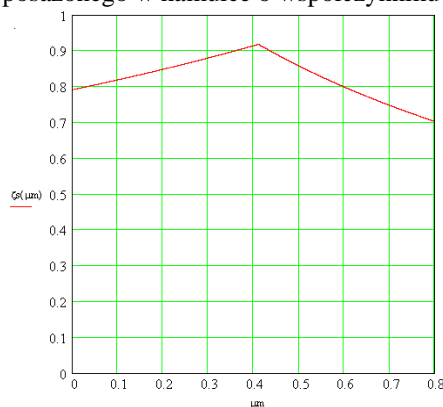
Na rysunku 10 przedstawiono wykres współczynników wykorzystania przyczepności ζ_s w funkcji przyczepności przyłgowej μ ($K=1,77$).



Rys.10 Wykres współczynników wykorzystania przyczepności w funkcji przyczepności przylgowej μ_m ($K=1.77$)

Porównując wykresy współczynników wykorzystania przyczepności ζ_s na rysunkach 6 i 10, nie widać znaczącej poprawy jakości hamowania. Natomiast zauważa się wzrost wykorzystania przyczepności, w zakresie nawierzchni o dużej wartości przyczepności i spadek na nawierzchniach śliskich. Jest to pożądany dla tego pojazdu kierunek zmian. Dalsze zwiększanie współczynnika K poprawi jakość hamowania, niestety nieznacznie. Poza tym, współczynnik ten można podnieść tylko przez obniżenie wydajności tylnych hamulców, ponieważ przednie już osiągnęły swoje maksimum. Spowodowałoby to obniżenie skuteczności układu hamulcowego.

Radykalną poprawę jakości hamowania można osiągnąć głównie przez obniżenie środka masy. Na rys. 11 przedstawiono wykres współczynników wykorzystania przyczepności ζ_s dla pojazdu o wysokości środka masy obniżonym o ponad 300 mm (jak dla pojazdu bazowego, wyposażonego w hamulce o współczynniku $K=1,77$).



Rys.11 Wykres współczynników wykorzystania przyczepności ζ_s dla pojazdu o wysokości środka masy obniżonym o ponad 300 mm

Na wykresie (rys. 11), można zauważyć wzrost współczynników wykorzystania przyczepności w całym zakresie przyczepności przyłgowej μ_m .

4. PODSUMOWANIE

Hamulce o współczynniku rozdziału sił hamowania $K=1,148$ dla badanego pojazdu bez systemu ABS, nie są w stanie zapewnić wymaganej skuteczności hamowania (opóźnienie 5 m/s^2), ze względu na blokowanie kół osi tylnych przy opóźnieniu $4,4 \text{ m/s}^2$ (utrata stateczności).

Maksymalny możliwy do zastosowania współczynnik K wynosi od 1,77 do 1,95 (stała korekcja w układach sterowania hamulców od $\gamma=0$ do maksimum).

Dla $K=1,77$, graniczna wyznaczona intensywność hamowania γ na szorstkiej nawierzchni (bez zrywania przyczepności) wynosi 0,55. W badaniach uzyskano rzeczywiste opóźnienie $\gamma = 0,56$ do 0,59.

Istnieje możliwość uzyskania wymaganej skuteczności układu hamulcowego przy zachowaniu stateczności pojazdu, poprzez wyznaczenie optymalnego rozdziału sił hamowania na drodze analitycznej jednak jest to rozwiązanie techniczne o znacznie gorszych własnościach niż stosowanie układów ABS.

5. LITERATURA

- [1] Reński A., *Budowa samochodów*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1997.
- [2] *Regulamin 13 EKG ONZ*.
- [3] Sprawozdanie WITPiS 89/ZPS/2009, Sulejówek 2009.