

Adam BARTNICKI¹
Marian Janusz ŁOPATKA²
Piotr KROGUL³
Tomasz MUSZYŃSKI⁴

SYMULACYJNE BADANIA STATECZNOŚCI DYNAMICZNEJ NA PRZYKŁADZIE ŁADOWARKI KOŁOWEJ Ł34

W referacie przedstawiono symulacyjne badania stateczności dynamicznej ładowarki Ł34. Symulacje przeprowadzono dla dwóch przeszkód z prędkością biegu pierwszego. Określono również wpływ zmian niektórych parametrów konstrukcyjnych na poprawę stateczności dynamicznej badanej ładowarki.

DYNAMIC STABILITY SIMULATIONS BASIS ON Ł34 WHEEL LOADER

In this article are presented simulation studies of loader Ł34 dynamic stability. Simulations were carried out for two obstacles with first gear velocity. In this paper are also defined effects of parameters modification to improvement loader dynamic stability.

1. WSTĘP

Zjawisko stateczności dynamicznej ładowarek przegubowych jest bardzo ważnym zagadnieniem, ponieważ w dużej mierze zależy od niego bezpieczeństwo oraz zdrowie ludzkie. W Polsce na chwilę obecną dokumentem określającym stateczność ładowarek (z punktu widzenia statyki), poprzez określenie ich udźwigu nominalnego, jest norma PN-EN 474-3:1999 [7]. Z kolei w Stanach Zjednoczonych powstały wymagania wojskowe [4] zawierające sposoby testowania maszyn inżynierskich pod względem zachowania stateczności dynamicznej. Przez zachowanie stateczności dynamicznej rozumie się zdolność do pokonywania określonych nierówności podłoża, zachowując przy tym

¹ Wojskowa Akademia Techniczna, Katedra Budowy Maszyn; 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2.
tel: +48 22 683 93 88, e-mail: abartnicki@wat.edu.pl

² Wojskowa Akademia Techniczna, Katedra Budowy Maszyn; 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2.
tel: +48 22 683 96 16, e-mail: mlopatka@wat.edu.pl

³ Wojskowa Akademia Techniczna, Katedra Budowy Maszyn; 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2.
tel: +48 22 683 74 16, e-mail: pkrogul@wat.edu.pl

⁴ Wojskowa Akademia Techniczna, Katedra Budowy Maszyn; 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2.
tel: +48 22 683 71 07, e-mail: tmuszynski@wat.edu.pl

stateczność ruchu, oraz ograniczone oddziaływania na człowieka. Zgodnie z wymaganiami [4] ładowarki testuje się pokonując przeszkody o wymaganym profilu, ze stałą prędkością jazdy. Pierwszą z przeszkód jest wybój o głębokości ok. 100 mm i szerokości umożliwiającej swobodne wpadnięcie koła w przeszkodę, natomiast drugą jest koleina badanego pojazdu, o głębokości ok. 200 mm, umieszczona pod kątem 30 stopni do kierunku jazdy maszyny. Za utratę stateczności określono moment oderwania któregokolwiek z kół od podłoża przy prędkości przejazdu 1,4-2,8 m/s.

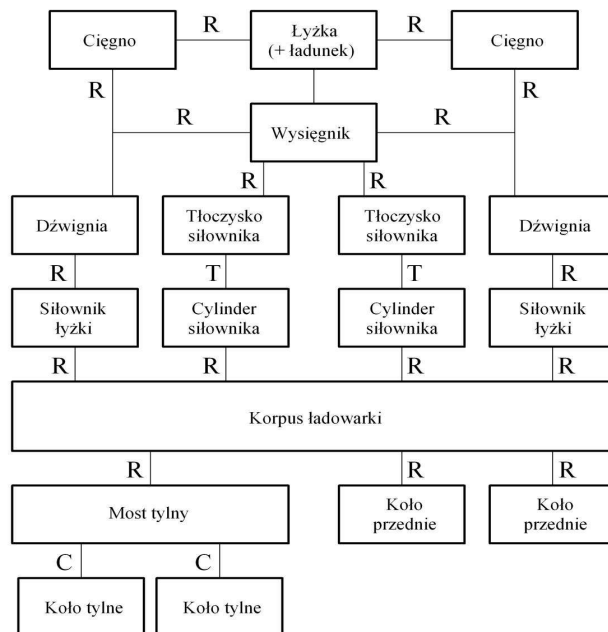
Celem podjętych badań było określenie na drodze symulacyjnej, zdolności pokonywania określonych w [4] przeszkód, przez standardową ładowarkę kołową. Badania przeprowadzono na modelu ładowarki Ł34. Przewidziano, że jej parametry mogą ulec modyfikacji poprzez zmianę sztywności ogumienia oraz zastosowanie przegubu zintegrowanego. Przez przegub zintegrowany rozumie się zastosowanie mechanizmu umożliwiającego obrót przedniego członu względem tylnego w miejscu przegubu skrótu, wokół osi wzdłużnej maszyny. Zwiększenie sztywności zrealizowano przez zastosowaniu opon o mniejszej średnicy i wyższym ciśnieniu, natomiast zmniejszenie sztywności poprzez wykorzystanie opon o większej średnicy i niższym ciśnieniu. Parametry determinujące zachowanie stateczności dynamicznej to:

- a- przyspieszenia pionowe fotela operatora, $a_v < 25 \text{ m/s}^2$ dla pojedynczych przeszkód [1],
- b- przyspieszenia poziome fotela operatora (poprzeczne lub podłużne), $a_h < 4,5 \text{ m/s}^2$ jest to wartość, przy której przeciętne osoby zostaną wyrzucone z fotela [5],
- c- kąt przechyłu wzdłużnego pojazdu, $< 6^\circ$ [1],
- d- ugięcie opony, min. to 25% jej ugięcia statycznego.

2. MODEL NUMERYCZNY ŁADOWARKI Ł34

Model numeryczny ładowarki Ł34 opracowano za pomocą programu Catia oraz MSC Adams. Model ten jest układem przestrzennym, wielomasowym (o 16 stopniach swobody) składającym się z członów sztywnych, połączonych odpowiednimi więzami idealnymi (rys.1), o liniowym kontakcie kół z podłożem.

W celu jak najdokładniejszego odwzorowania właściwości masowych maszyny, jej model opracowano w oparciu o podejście geometryczne (odwzorowuje się kształty poszczególnych elementów) oraz masowe (masy poszczególnych elementów wprowadza się na podstawie danych katalogowych) [3]. Biorąc to pod uwagę całkowita masa eksploatacyjna ładowarki wynosi 18,5 ton, co jest zgodne z danymi katalogowymi [6].



Rys. 1. Schemat połączeń elementów w modelu numerycznym ładowarki Ł34: R- połączenie obrotowe, T- połączenie przesuwne, C- połączenie cylindryczne (obrót+przesuw)

3. PARAMETRY MODELU NUMERYCZNEGO

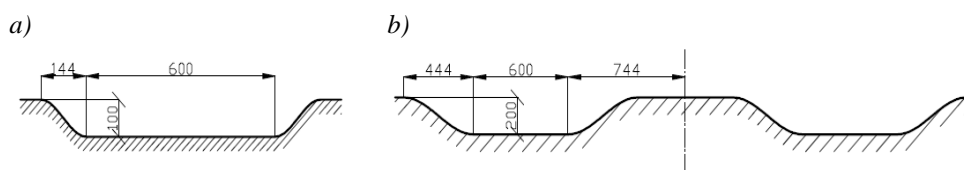
Model ładowarki zawiera elementy sprężysto-tłumiące ogumienia oraz siłowników wysięgnika. Sztywność promieniowa ogumienia o rozmiarze 23,5-25, ciśnieniu 0,18 MPa (tył) i 0,35 MPa (przód) została przyjęta w oparciu o dane literaturowe [2]. Wartość tłumienia dobrano w oparciu o wyznaczony przebieg czasowy przyspieszeń wzdłużnych działających na fotel operatora ładowarki Ł34 podczas gwałtownego zatrzymania osprzętu roboczego z ładunkiem podczas swobodnego opuszczania [2]. Podatność układu hydraulicznego w siłownikach wysięgnika dobrano w analogiczny sposób jak dobór wartości tłumienia ogumienia. Wartości omówionych elementów sprężysto-tłumiących zawiera tabela 1.

Tabela 1. Wartości elementów sprężysto-tłumiących modelu numerycznego

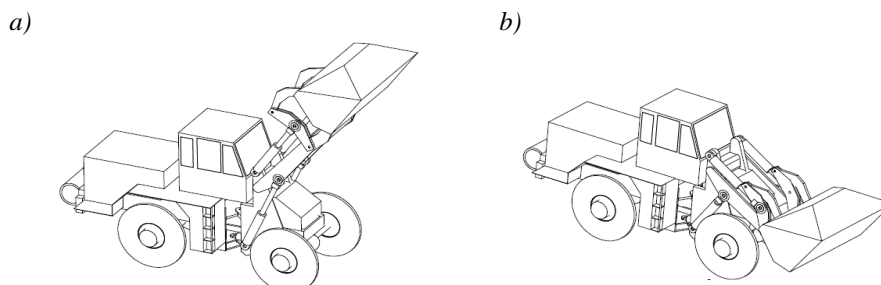
	Sztywność, kN/m	Tłumienie, kNs/m
Element sprężysto-tłumiący koła przedniego	800	40
Element sprężysto-tłumiący koła tylnego	600	40
Element sprężysto-tłumiący siłownika wysięgnika	30000	100

4. PRZEBIEG SYMULACJI

Symulacje przeprowadzono na twardym, nieodkształcalnym podłożu. Symulacja polegała na przejeździe przez przeszkody terenowe ze stałą prędkością jazdy oraz rejestracji pożądanych wskaźników. Rozpatrzono dwa warianty przeszkody terenowej: w postaci wyboju oraz koleiny zgodnie z [4]. W rzeczywistych warunkach współpraca opony z podłożem ma charakter odkształcalny (a nie sztywny jak w badanym modelu), w związku z czym przyjęto sinusoidalny kształt przeszkód (rys. 2a i b). Wymagania wojskowe USA przewidują, że przejazdy powinny odbywać się z prędkościami między 1,4, a 2,8 m/s, tj prędkościami biegu pierwszego. Biorąc to pod uwagę, symulacje badanej ładowarki przeprowadzono dla prędkości 1,4–2 m/s (co jest zgodne z prędkościami biegu pierwszego badanej ładowarki Ł34 [6]). Przejazdy przez obydwie przeszkody wykonano dla ładowarki z ładunkiem nominalnym 5000 kg, oraz bez niego. Zgodnie z wymaganiami wojskowymi [4] przejazd przez wybój przeprowadzono dla maszyny w konfiguracji transportowej (dolna krawędź łyżki powinna znajdować się ok. 300 mm nad podłożem) (rys.3b), oraz w pozycji maksymalnego uniesienia łyżki (rys.3a). Natomiast przejazd przez koleinę przeprowadzono dla konfiguracji transportowej.



Rys. 2. Przeszkody: a- wybój, b- koleina



Rys. 3. Model ładowarki Ł34 wykonany w programie Catia: a- pozycja z maksymalnym podniesieniem łyżki, b- pozycja transportowa

W następnej kolejności przeprowadzono przejazdy dla ładowarki z zastosowanym przegubem zintegrowanym, oraz z ogumieniem sztywniejszym (przód 1100 kN/m, tył 800 kN/m) i bardziej podatnym (przód 500 kN/m, tył 400 kN/m). Przedstawione zmiany zostały zbadane dla najbardziej niekorzystnej prędkości wyznaczonej podczas przejazdu przez obydwie przeszkody dla sztywności wyjściowej opon.

5. WYNIKI SYMULACJI

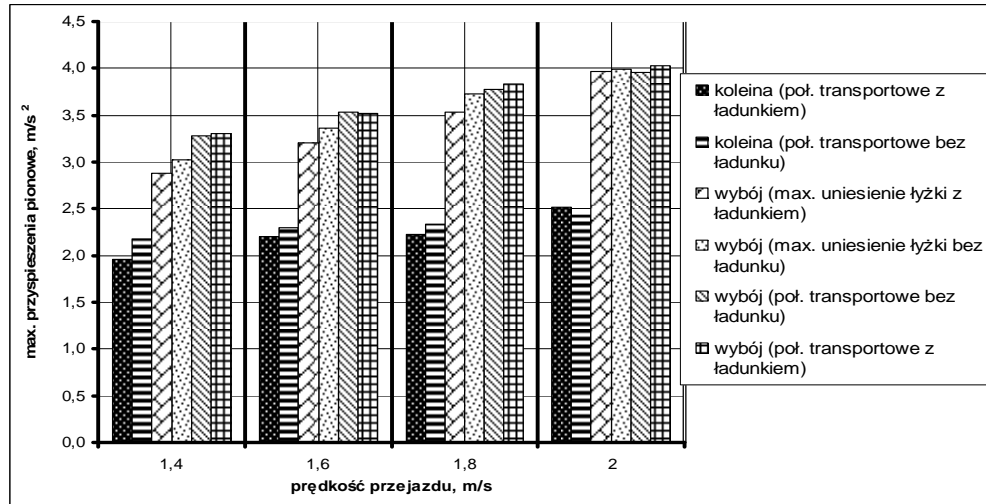
W pierwszej fazie badań symulacyjnych wyznaczono najbardziej niekorzystną prędkość przejazdu przez przeszkody w oparciu o przyjęte kryteria oceny. Zestawienia maksymalnych przyspieszeń dla czterech prędkości przejazdu przedstawiają wykresy na rys. 5, 6 i 7. Należy zauważyć, że wartości przyspieszeń pionowych (rys.5) w żadnej z rozpatrywanych konfiguracji nie osiągają założonych (patrz podpunkt a we wstępie) wartości granicznych. Natomiast przyspieszenia poziome (rys.6, 7) prawie dla wszystkich rozpatrywanych konfiguracji przewyższają założoną (patrz podpunkt b we wstępie) ich granicę, oraz rosną wraz ze wzrostem prędkości przejazdu. Na uwagę zasługuje także fakt, że badana ładowarka spełnia założone kryteria przyspieszeń poziomych jedynie dla przejazdu przez wybój w pozycji maksymalnego uniesienia łyżki, bez ładunku do prędkości 1,8 m/s, oraz dla tej samej pozycji z ładunkiem do prędkości 1,4 m/s.

Analiza wartości ugięcia poszczególnych opon w funkcji czterech prędkości przejazdu (rys. 8, 9 i 10) wskazuje, że model traci kontakt podczas przejazdu przez koleinę, bez ładunku z prędkością, 2 m/s. Na uwagę zasługuje także fakt, że podczas przejazdu przez wybój, w pozycji maksymalnego uniesienia łyżki, bez ładunku, wartość ugięcia przyjmuje wartości bliskie zeru prawie w całym zakresie badanej prędkości, dlatego za najbardziej niekorzystną prędkość przyjęto 2 m/s.

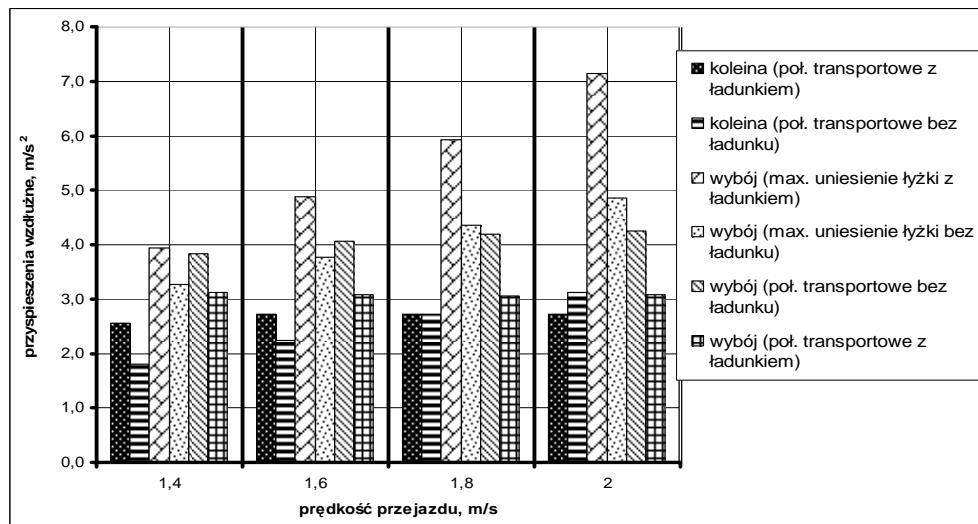
W następnej kolejności przeprowadzono symulacje określające wpływ zmiany sztywności ogumienia oraz zastosowanie przegubu zintegrowanego, na poprawę stateczności dynamicznej ładowarki. Badania przeprowadzono dla prędkości 2 m/s, a zestawienie ich wyników prezentują tabele 2 i 3.

Opierając się o dane z tabeli 2 można stwierdzić, że zwiększanie sztywności opon powoduje zwiększanie przyspieszeń działających na operatora, oraz praktycznie utratę kontaktu opony z podłożem podczas przejazdu przez koleinę. Z drugiej zaś strony (dla przejazdu przez koleinę) zastosowanie bardziej podatnego ogumienia powoduje zmniejszenie przyspieszeń działających na operatora, oraz utrzymanie kontaktu opon z podłożem. Podobną zależność można zauważyć jeżeli chodzi o zmniejszanie ugięcia opony wraz ze wzrostem jej sztywności podczas pokonywania wyboju. Biorąc pod uwagę zmiany przyspieszeń, zastosowanie sztywniejszego ogumienia powoduje zmniejszenie przyspieszeń wzdłużnych dla wyboju, w pozycji maksymalnego uniesienia łyżki z ładunkiem, natomiast w pozostałych przypadkach zachowuje się w analogiczny sposób jak dla przykładu koleiny, bądź oscyluje w okolicy wartości dla standardowego ogumienia.

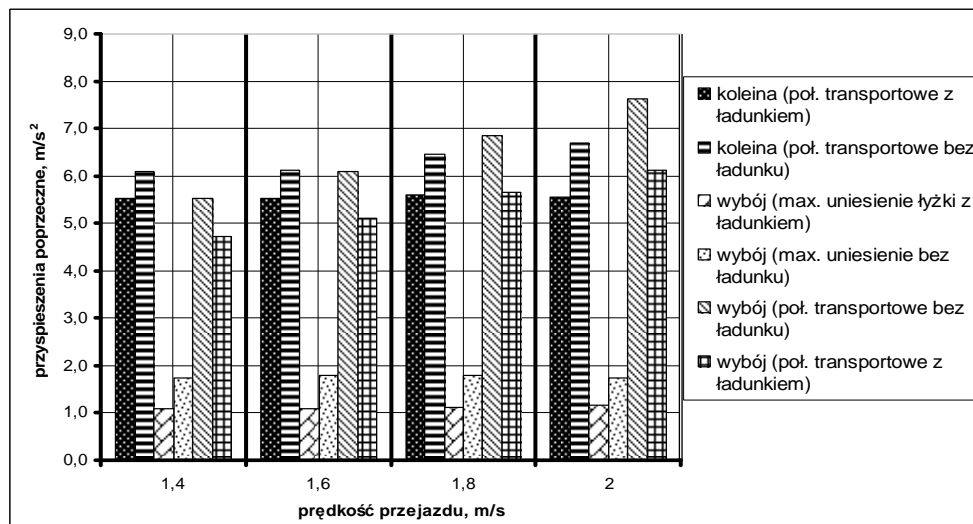
Zastosowanie zintegrowanego przegubu, powoduje znaczne zwiększenie przyspieszeń poprzecznych działających na operatora (tabela 3). Powodem tego jest zmniejszenie bezwładności układu działającego na operatora, poprzez ograniczenie wzajemnego oddziaływania przedniego członu ładowarki z tylnym (powiązany z operatorem). W celu ograniczenia tego zjawiska proponuje się zastosowanie tłumienia między tymi członami ładowarki, spełniającego rolę systemu stabilizacji przechyłu poprzecznego.



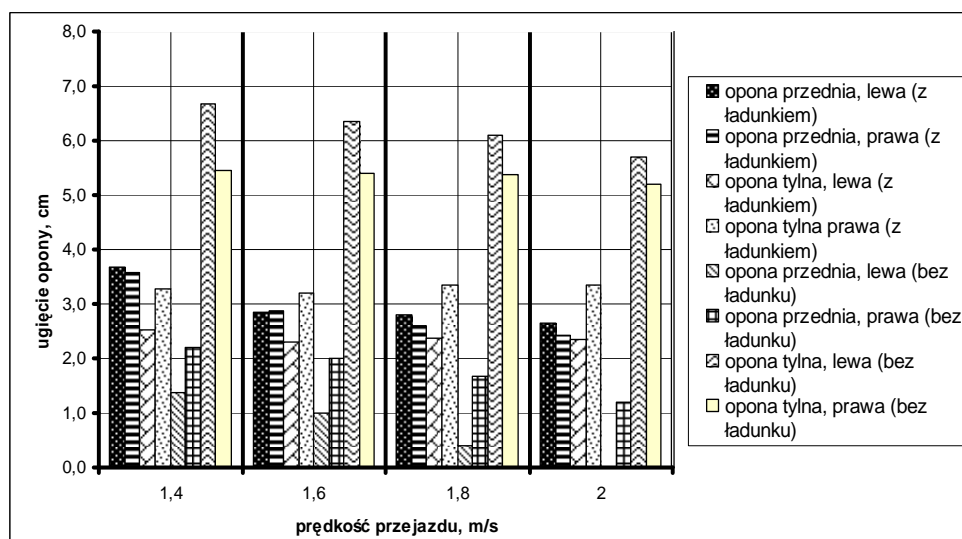
Rys. 5. Przyspieszenia pionowe działające na operatora dla wybranych prędkości przejazdowych



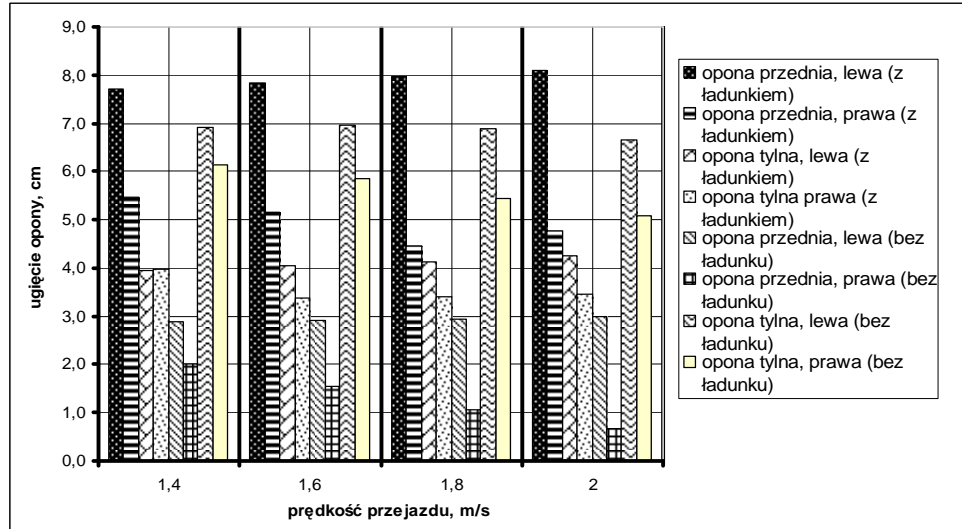
Rys. 6. Przyspieszenia wzdłużne działające na operatora dla wybranych prędkości przejazdowych



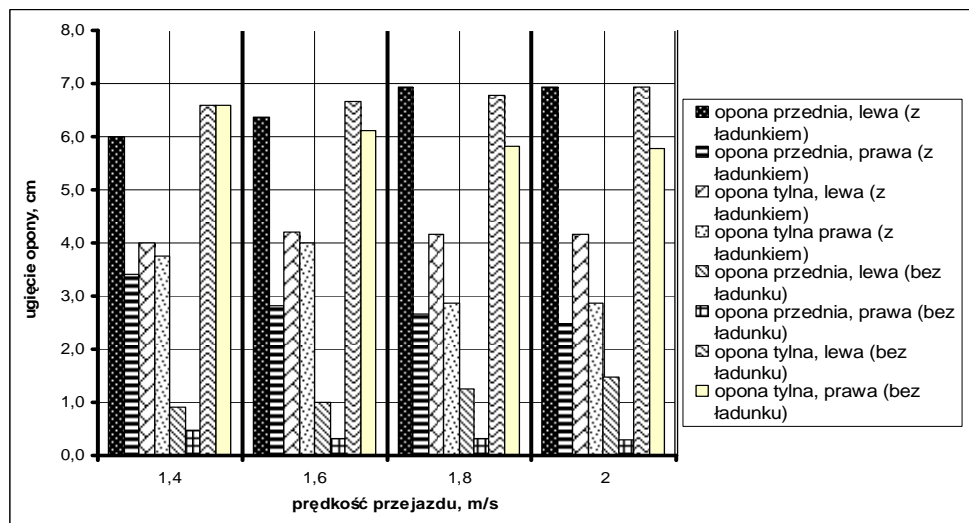
Rys. 7. Przyspieszenia poprzeczne działające na operatora dla wybranych prędkości przejazdowych



Rys. 8. Ugięcie opony w funkcji prędkości przejazdu przez koleinę (poł. transportowe)



Rys. 9. Ugięcie opony w funkcji prędkości przejazdu przez wybój (poł. transportowe)



Rys. 10. Ugięcie opony w funkcji prędkości jazdy przez wybój (max. uniesienie łyżki)

Tabela 2. Wpływ sztywności ogumienia na stateczność ładowarki Ł34

		Koleina						Wybój (maksymalne uniesienie łyżki)						Wybój (pozycja transportowa)						
		z ładunkiem			bez ładunku			z ładunkiem			bez ładunku			z ładunkiem			bez ładunku			
		standa rdowe	miekk ie	twarde	standa rdowe	miekk ie	twarde	standa rdowe	miekk ie	twarde	standa rdowe	miekk ie	twarde	standa rdowe	miekk ie	twarde	standa rdowe	miekk ie	twarde	
Przyspieszenie działające na operatora, m/s ²	pionowe	2,5	2,0	3,2	2,4	2,2	2,9	2,9	3,3	4,3	4,0	3,6	4,5	4,0	3,3	4,7	4,0	3,2	4,7	
	poziome	wzdłużne	2,7	2,2	3,6	3,1	2,8	3,4	3,9	5,6	6,7	4,9	4,7	4,4	3,1	3,5	3,3	4,3	3,8	4,9
		poprzeczne	5,6	4,6	8,3	6,7	5,1	8,0	1,1	1,1	1,2	1,8	1,6	1,9	6,1	5,3	7,4	7,6	6,5	9,1
Ugięcie opony, cm	prawy	przód	2,4	7,2	0,2	1,2	3,7	0,4	3,4	7,8	0,8	0,3	1,8	0,0	4,8	9,4	2,0	0,7	2,8	0,3
		tył	3,4	5,1	1,7	5,2	8,7	3,7	3,8	6,6	1,5	5,8	9,4	3,8	3,5	5,5	1,8	5,1	9,2	3,8
	lewy	przód	2,6	7,5	0,4	0,0	1,6	0,0	6,0	12,5	4,5	1,5	4,7	0,2	8,1	14,1	5,3	3,0	6,1	1,7
		tył	2,4	4,9	1,0	5,7	9,6	4,0	4,0	8,4	2,6	6,9	11,4	4,5	4,3	7,1	2,4	6,7	11,0	4,7

Tabela 3. Wpływ zastosowania zintegrowanego przegubu na stateczność dynamiczną

		Koleina				Wybój (maksymalne uniesienie łyżki)				Wybój (pozycja transportowa)				
		z ładunkiem		bez ładunku		z ładunkiem		bez ładunku		z ładunkiem		bez ładunku		
		most wahliwy	przegub zintegrowany	most wahliwy	przegub zintegrowany	most wahliwy	przegub zintegrowany	most wahliwy	przegub zintegrowany	most wahliwy	przegub zintegrowany	most wahliwy	przegub zintegrowany	
Przyspieszenie działające na operatora m/s ²	pionowe	2,5	2,9	2,4	2,7	4,0	3,8	4,0	4,0	4,0	4,2	4,0	4,1	
	poziome	wzdłużne	2,7	2,5	3,1	3,2	7,1	5,5	4,9	4,7	3,1	3,3	4,3	4,0
		poprzeczne	5,6	13,5	6,7	13,9	1,2	10,9	1,8	9,8	6,1	11,4	7,6	10,6
Ugięcie opony, cm	prawy	przód	2,4	2,3	1,2	0,9	2,5	2,9	0,3	0,4	4,8	4,6	0,7	1,2
		tył	3,4	2,1	5,2	4,0	2,9	2,0	5,8	4,3	3,5	2,1	5,1	3,9
	lewy	przód	2,6	2,8	0,0	0,8	6,9	7,1	1,5	1,7	8,1	8,3	3,0	3,4
		tył	2,4	0,2	5,7	3,9	4,2	4,6	6,9	6,9	4,3	4,0	6,7	7,0

6. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych symulacji można stwierdzić, że ładowarka Ł34 nie spełnia jednocześnie wszystkich założonych kryteriów, dla zaproponowanych testów, w zakresie badanej prędkości. Jazda z ładunkiem pomaga w utrzymaniu kontaktu kół z podłożem podczas przejazdu przez założone przeszkody. Zwiększanie sztywności

ogumienia powoduje zmniejszanie ugięcia opony, czego konsekwencją jest utrata kontaktu koła z podłożem podczas przejazdu z ładunkiem przez wybój dla obydwu położań łyżki. Z kolei zastosowanie zintegrowanego przegubu intensyfikuje przyspieszenia poprzeczne działające na operatora, podczas pokonywania wyboju i koleiny, w związku z czym należy połączyć człony pojazdu. Reasumując, przedstawione testy można wykorzystać jako dodatkowe wymagania, dopuszczające maszyny przegubowe typu ładowarki, do pracy w terenie.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Höllinger M., Glauch U.: Mobility Analysis of a Heavy Off-Road Vehicle Rusing a Controlled Suspension. Konferencja: Aspects of Flexible Aircraft Control, Ottawa, 18-20 październik 1999.
- [2] Łopatka M. J. i inni.: Optymalizacja parametrów konstrukcyjnych przegubowego ciągnika kołowego ze względu na stateczność jazdy. Sprawozdanie z projektu badawczego Grant nr OT00A01614. WAT. Warszawa 2000.
- [3] Siwulski T.: Modelowanie stateczności dynamicznej pojazdów przemysłowych z podatnymi elementami jezdnyimi. Rozprawa doktorska. Politechnika Wrocławska. Wrocław 2004.
- [4] ATPD-2301: Tractor, Wheeled, All Wheel Driver; With Attachments (High Mobility Engineer Excavator). 2002.
- [5] ITTC Recommended Procedures 7.5-02-05-04.1 : Testing and Extrapolation Method High Speed Marine Vehicles – Eexcerpt of ISO 2631, Seasickness and Fatigue. International Towing Tank Conference 1999.
- [6] Ładowarka hydrauliczna Ł34, instrukcja obsługi. Huta Stalowa Wola,
- [7] PN-EN 474-3:1999: Maszyny do robót ziemnych – Bezpieczeństwo – Wymagania dotyczące ładowarek.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach **2008-2010** jako projekt rozwojowy Nr OR 00 0012 05