

ARTICULATED TOOL-CARRIERS SAFETY OF MOVEMENT IN LATERAL STABILITY AND STANDARD REQUIREMENTS POINT OF VIEW

Agnieszka Kozicka, Marian J. Łopatka, Tomasz Muszyński

*Military University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa
e-mail: a.kozicka@wme.wat.edu.pl, m.lopotka@wme.wat.edu.pl
t.muszynski @ wme.wat.edu.pl*

Abstract

The primary purpose of this paper was to analyse the methods and lateral stability assignment criterions of articulated wheeled tool-carriers like loaders or handlers. The lateral stability is a very important factor from moving through rough terrain point of view. Nowadays the most popular methods of stability verification are those with rollover tilting table. These tests are pretty simple and cheap, but they don't take into consideration the influence of suspension dynamics on vehicle stability. Moreover, both the requirements as well as research procedures don't take account of articulated constructions character. In case of articulated vehicles this problem is quite complicate, because manoeuvring and turning are relevant to the lateral stability. The conclusion drawn from these analyses is that applied tests are not usually performed in the most unfavourably position of the machine and the results of various tests are not entirely comparable. Moreover, based on these analyses the authors present a new proposition for high terrain mobility classification from the lateral stability point of view.

Low stability issues used solutions, where transverse stability is not a priority, and accepted mass distribution, due with obtainment of the highest lifting capacity at which the machine realizes formal requirements of the safety.

Keywords: lateral stability, articulated machine, test, assignment criterion

BEZPIECZEŃSTWO RUCHU PRZEGUBOWYCH NOŚNIKÓW OSPRZĘTU W KONTEKŚCIE ICH STATECZNOŚCI POPRZECZNEJ I WYMAGAŃ NORMATYWNYCH

Streszczenie

W artykule przedstawiono przegląd metod i kryteriów oceny stateczności poprzecznej, która jest jednym z podstawowych czynników ograniczających możliwości poruszania się pojazdów po bezdrożach oraz pokonywania przeszkód i nierówności terenowych. Obecnie w badaniach stateczności dominują testy na płycie wychylnej. Pomijają one jednak zdolność do pracy w warunkach pochyleń oraz wpływ dynamiki zawieszenia na stateczność pojazdu. Przeprowadzona analiza pokazuje, że stosowane testy nie zawsze są wykonywane w najbardziej niekorzystnym położeniu maszyny, a wyniki różnych testów nie są w pełni porównywalne. Ponadto zarówno wymagania, jak i procedury badań nie uwzględniają specyfiki stateczności poprzecznej w konstrukcjach przegubowych. W wypadku maszyn przegubowych problem stateczności jest bowiem bardziej złożony, ponieważ podczas skrętu następuje wzajemne przemieszczanie się zarówno krawędzi wywrotu jak i wypadkowego środka ciężkości. W efekcie wykonywanie skrętów i manewrowanie może istotnie zmieniać stateczność maszyny. Istnieje zatem konieczność doprecyzowania metod badania stateczności poprzecznej w stosunku do przegubowych nośników osprzętu. W pracy wskazano również alternatywne propozycje kryteriów oceny stateczności. Niska stateczność jest wynikiem zastosowanych rozwiązań, gdzie stateczność poprzeczna nie jest priorytetem, oraz przyjętego rozkładu mas, spowodowanego uzyskaniem jak najwyższego udźwigu, przy którym maszyna spełnia formalne wymogi bezpieczeństwa.

Słowa kluczowe: stateczność poprzeczna, maszyny przegubowe, testy, kryteria oceny

1. Wprowadzenie

Stateczność poprzeczna wywiera wieloaspektowy wpływ na bezpieczeństwo ruchu maszyn i pojazdów. Wysoka stateczność umożliwia:

- poruszanie się na pochyleniach poprzecznych;
- pokonywanie nierówności terenowych (głazy, kłody, rowy, koleiny);
- wykonywanie gwałtownych manewrów na drodze;
- pokonywanie łuków z dużą prędkością;
- zachowanie kierowności.

Z tych względów rozwinięto wiele metod jej testowania i oceny.

2. Metody oceny stateczności poprzecznej pojazdów drogowych

Początkowo do oceny stateczności poprzecznej wykorzystywano wskaźnik stateczności statycznej W_{ss} ujęty zależnością:

$$W_{ss} = \frac{h_{sc}}{0,5 \cdot b} = tg\alpha_{ss}, \quad (1)$$

gdzie:

h_{sc} - wysokość środka ciężkości,

b - rozstaw kół pojazdu,

α_{ss} - teoretyczny statyczny kąt wywrotu.

Na jego podstawie można oszacować maksymalne teoretyczne przyspieszenie poprzeczne występujące podczas manewrów drogowych, przy którym pojazd nie powinien utracić stateczności zgodnie z zależnością:

$$a_y = \frac{F_b}{m} = W_{ss} \cdot g, \quad (2)$$

gdzie:

a_y - przyspieszenie poprzeczne występujące pod wpływem siły odśrodkowej,

F_b - odśrodkowa siła bezwładności,

m - masa pojazdu,

g - przyspieszenie ziemskie,

ponieważ:

$$\frac{F_b}{G} = \frac{m \cdot a_y}{m \cdot g} = \frac{a_y}{g} = tg\alpha_{ss} = W_{ss}, \quad (3)$$

gdzie:

G - siła ciężkości pojazdu.

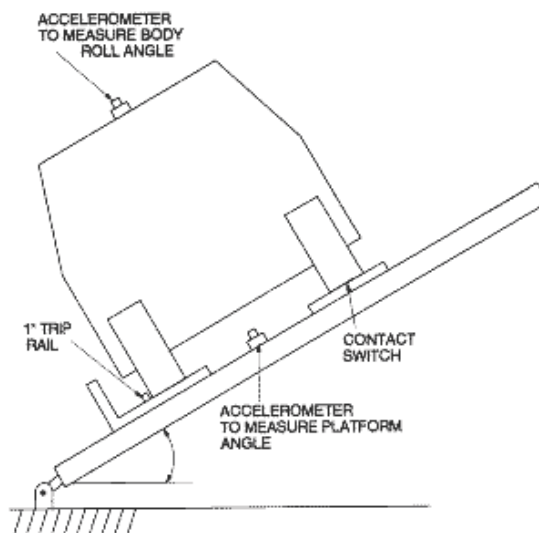
Wskaźnik ten nie ujmuje jednak wpływu konstrukcji i elastyczności zawieszenia oraz podatności ogumienia, które pozwalają na poprzeczne przemieszczanie środka ciężkości, a tym samym istotnie zmieniają warunki stateczności. Stąd dążąc do uzyskania precyzyjniejszej i bardziej wiarygodnej miary, wprowadzono wskaźnik kąta wywrotu pojazdu wyznaczany na wychylnej płycie pomiarowej (rys.1) zgodnie z zależnością:

$$W_{pp} = tg\alpha_{pp}, \quad (4)$$

gdzie:

α_{pp} - kąt wywrotu pojazdu wyznaczony na płycie pomiarowej.

Metodyka wyznaczania α_{pp} wymaga ustawienia pojazdu równolegle do osi wywrotu (odchylenie nie powinno przekraczać 25 mm) i podnoszenia płyty z prędkością nieprzekraczającą 0,25 °/s, aż do oderwania wszystkich kół jednej ze stron pojazdu od podłoża.



Rys. 1. Wyznaczanie kąta wywrotu pojazdu na wychylnej płycie pomiarowej
 Fig. 1. Rollover angle verification with tilting table

Dokładność pomiaru nie powinna być mniejsza niż 0,3°. Próbę należy powtórzyć 3-krotnie dla obydwu stron pojazdu, każdorazowo zjeżdżając i wjeżdżając na płytę w celu wyeliminowania wpływu nieliniowości i histerezy zawieszenia oraz uśrednienia jego ustawień i parametrów pracy. Ciśnienie w ogumieniu należy wyregulować z dokładnością do 2%, zbiorniki powinny być napełnione w 70-100%, a pojazd zabezpieczony przed zsuwaniem bocznym [1].

W przypadku pojazdów samochodowych wskaźnik W_{pp} jest około 10-15% niższy od wskaźnika W_{ss} . Test cechuje się dobrą powtarzalnością oraz jest łatwy do przeprowadzenia, jednak podczas testu występuje skrajnie duże odkształcenie zawieszenia (które nie występuje podczas wykonywania manewrów drogowych) i istotna zmiana jego parametrów pracy – w efekcie jego wiarygodność do oceny odporności konstrukcji pojazdu na przyspieszenia poprzeczne i zachowania pojazdu na drodze jest ograniczona.

W celu ich wyeliminowania, jako alternatywę opracowano test dynamiczny – stałej prędkości pojazdu poruszającego się po torze kołowym o promieniu 30 m (100 fts). Stopniowe zwiększanie prędkości jazdy pozwala na wywołanie przyspieszeń odśrodkowych o wymaganej wartości zgodnie z zależnością:

$$a_y = \frac{F_b}{m} = \frac{m \cdot v^2}{m \cdot R}, \quad (5)$$

gdzie:

R - promień toru,

v - prędkość postępową pojazdu.

Stąd wskaźnik stateczności kołowego testu stałej prędkości wynosi:

$$W_{kv} = \frac{a_y}{g}. \quad (6)$$

Ponieważ podczas testu istnieje zagrożenie przewróceniem pojazdu, zastosowanie testu jest ograniczone do sprawdzenia zdolności osiągnięcia minimalnego poziomu bezpieczeństwa ruchu pojazdu wymaganego przepisami. Z tych względów nie można go stosować do wyznaczania wartości granicznych – w wyniku testu nie są więc one określone i nieznanym jest rzeczywisty poziom bezpieczeństwa. Innym problemem uniemożliwiającym określenie rzeczywistego poziomu

bezpieczeństwa występującym podczas testu, jest możliwość utracenia przyczepności poprzecznej pod wpływem siły odśrodkowej przy przyspieszeniach poprzecznych niższych od wymaganych. Z tych względów zalecane jest dysponowanie zapasem stateczności określanym jako:

$$W_{zs} = W_{sp} - W_{kv} . \quad (7)$$

Zwykle poziom przyspieszeń poprzecznych, niezbędny dla bezpiecznego wykonywania manewrów drogowych i sprawdzany w teście kołowym stałej prędkości definiowany jest na poziomie 0,4 g [3,7,13,14,15,24,25], natomiast zalecany poziom zapasu stateczności dla samochodów osobowych wynosi 0,2 g [24].

W przypadku ciężkich pojazdów drogowych dopuszcza się zastąpienie testu kołowego stałej prędkości, testem statycznym na płycie wychylnej, jednak pojazd powinien wówczas posiadać ładunek o nominalnych wymiarach i gęstości, a wymagany minimalny kąt wywrotu definiowany jest na poziomie 23-27°, co odpowiada granicznym minimalnym wartościom wskaźnika kąta wywrotu równym 0,425-0,51 [1,8,24]. Ponadto, zwykle ograniczane jest również maksymalne odchylenie pojazdu w wyniku ugięcia ogumienia oraz zawieszenia.

Testy statyczne oraz zapewnienie niezbędnego zapasu stateczności nie pozwalają na jednoznaczne określenie zachowania pojazdu w warunkach drogowych. W celu wyeliminowania niewiadomych oraz precyzyjnego określenia właściwości pojazdu wciąż są opracowywane nowe testy i procedury badawcze, jak np. test slalomu czy test podwójnej zmiany pasa ruchu [16,17,24] – ukierunkowane są one jednak na pojazdy poruszające się z wysokimi prędkościami przejazdowymi i nie mają zasadniczego znaczenia dla maszyn samobieżnych.

3. Testy stateczności szybkobieżnych pojazdów terenowych

Stateczność poprzeczna jest jednym z podstawowych czynników ograniczających możliwości poruszania się pojazdu po bezdrożach oraz pokonywania przeszkód i nierówności terenowych. Ponieważ warunki terenowe są w szczególnym zainteresowaniu armii znalazło to odbicie w pracowaniu szeregu specyficznych wojskowych wymagań i testów. Przykładowo armia brytyjska z uwagi na mobilność terenową podzieliła pojazdy transportowe na 5 kategorii przypisując im zróżnicowane wymagania [4]. Dotyczą one również stateczności poprzecznej – tab.1. Zdefiniowano je jako kąt wywrotu wyznaczany na płycie pomiarowej, przy którym koła dwóch osi tracą kontakt z podłożem. Podczas testu niedopuszczalne są jakiegokolwiek wycieki z układów: paliwowego, smarowania, chłodzenia itp.

Tab. 1. Brytyjskie wojskowe wymagania w zakresie stateczności pojazdów [4]
Tab. 1. British army requirements in range of vehicle stability [4]

Poziom mobilności	Ładowność pojazdu do 4 t	Ładowność pojazdu 4-8 t	Ładowność pojazdu powyżej 8t
Pojazdy niskiej mobilności - LMLC (Low Mobility Load Carriers)	28°	26°	26°
Pojazdy niskiej mobilności –ulepszone - ILMLC (Improved Low Mobility Load Carriers)	28°	26°	26°
Pojazdy średniej mobilności - MMLC (Medium Mobility Load Carriers)	30°	28°	28°
Pojazdy średniej mobilności – ulepszone - IMMLC (Improved Medium Mobility Load Carriers)	33°	30°	30°
Pojazdy wysokiej mobilności - HMLC (High Mobility Load Carriers)	35°	33°	33°

W przypadku ciężkich pojazdów (ładowność powyżej 8 t) najniższe wymagania dotyczą pojazdów niskiej mobilności (adaptowanych samochodów komercyjnych) – wymagany poziom stateczności odpowiada $W_{pp} = 0,488$. Ciężkie pojazdy wysokiej mobilności powinny osiągać $W_{pp} = 0,65$. Oznacza to, że w stosunku do minimalnych wymagań drogowych (0,4g) dysponują one zapasem stateczności rzędu $W_{zs} = 0,1-0,25$.

Armia amerykańska postawiła na testy dynamiczne, w których nie są wyznaczane graniczne wskaźniki stateczności, lecz sprawdzana jest zdolność poruszania się pojazdu w ściśle sprecyzowanych warunkach. W przypadku terenowych pojazdów samochodowych stateczność poprzeczna weryfikowana jest podczas 2 testów [7]:

- standardowy test kołowy stałej prędkości, w którym wymagana jest zdolność do stabilnego ruchu przy przyspieszeniach poprzecznych sięgających 0,4g – zarówno pojazdu nie załadowanego jak i obciążonego ładunkiem nominalnym lub zabudową specjalną;
- test zbrocza – wymaga wykonania przejazdu (z prędkością określoną z wymaganiami taktyczno-technicznymi) wzdłuż zbrocza po utwardzonym torze o nachyleniu 40% (dla niektórych aplikacji dopuszcza się pochylenie 30%) wykonując przy tym skręty w górę i w dół, a następnie wykonanie nawrotu i ponowne pokonanie zbrocza torem sinusoidalnym – niedopuszczalna jest przy tym utrata kontaktu z podłożem przez którekolwiek z kół – przejazd wykonywany jest z nominalnym obciążeniem.

Dla konstrukcji specjalnych, mogą być opracowywane dodatkowe testy dostosowane do specyfiki ich przeznaczenia.

W przypadku szybkobieżnych inżynierskich nośników osprzętu (podstawowe osprzęty to osprzęt koparkowy oraz ładowarkowy) zestaw testów przewiduje [3]:

- wykonanie przejazdu wzdłuż zbrocza o nachyleniu obniżonym do 30%, wykonując skręty w górę i w dół połączone z hamowaniem pojazdu do pełnego zatrzymania, wykonanie nawrotu i ponowne wykonanie przejazdu w przeciwnym kierunku wykonując skręty i hamowania – podczas testu pojazd ma poruszać się w trybie roboczym, łyżka powinna posiadać znamionowe obciążenie i znajdować się 30 cm nad podłożem – test nie narzuca prędkości jazdy jednak niedopuszczalna jest utrata kontaktu z podłożem przez którekolwiek z kół;
- wykonanie przejazdów przez wybój w jezdni o głębokości 10 cm i długości odpowiadającej cięciwie koła, z prędkością 5,6-8,0 km/h – łyżka powinna posiadać znamionowe obciążenie i znajdować się podczas pierwszej próby 30 cm nad podłożem, natomiast podczas drugiej próby – powinna być maksymalnie uniesiona – podobnie jak w poprzednim teście niedopuszczalna jest utrata kontaktu z podłożem przez którekolwiek z kół;
- wykonanie przejazdu przez własną koleinę o głębokości 20 cm z prędkością 5,6-8,0 km/h pod kątem nieprzekraczającym 30° – łyżka powinna być obciążona ładunkiem o masie 25% obciążenia znamionowego i znajdować się 30 cm nad podłożem – podczas testu niedopuszczalna jest utrata kontaktu z podłożem przez którekolwiek z kół.

Ponadto przewidziane są testy zachowania stateczności podczas pracy poszczególnymi dodatkowymi osprzętami wymiennymi, istotnie wpływającymi na stateczność maszyny takimi jak osprzęt koparkowy czy dźwigowy.

Porównując minimalne brytyjskie wymagania statyczne (pochylenie płyty 51%) z minimalnymi pochyleniami podłoża w teście dynamicznym (30%) można oszacować, że bezpieczne wykonanie testu dynamicznego i poruszanie się w terenie wymaga dysponowania zapasem stateczności rzędu 0,2g.

4. Testy stateczności poprzecznej maszyn wolnobieżnych

Z uwagi na bezpieczeństwo pracy, stateczność poprzeczna odgrywa bardzo istotną rolę w kształtowaniu konstrukcji szeregu wolnobieżnych maszyn i pojazdów terenowych. Wymagania

są jednak silnie zróżnicowane w zależności od ich przeznaczenia – tab. 2 [25]. W odróżnieniu od aplikacji drogowych i wojskowych, testy weryfikujące mają zawsze charakter statyczny i przeprowadzane są na stanowiskach z wychylną płytą.

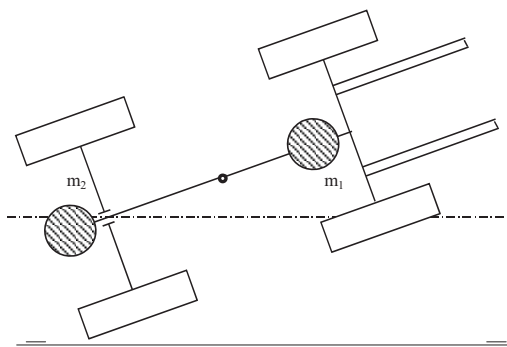
W przypadku maszyn wolnobieżnych, szczególnie trudne obowiązkowe testy stateczności poprzecznej dotyczą wózków widłowych [2,9,10,11,12], ponieważ podstawową troską konstruktorów jest maksymalizacja parametrów użytkowych takich jak udźwig, wysokość podnoszenia i zwrotność – co jest przeciwstawne z wymogami stateczności, którą poprawia zmniejszenie obciążenia osprzętu, obniżenie środka ciężkości oraz odsunięcie środka ciężkości od osi wywrotu (wydłużenie maszyny). Dodatkową trudność podczas testu stanowi konieczność podnoszenia ładunku nominalnego w całym polu pracy. W efekcie stawiane wymagania, mimo że są relatywnie niskie, są bardzo trudne do spełnienia. Z tych względów wózki widłowe nie są budowane na bazie maszyn przegubowych.

Tab. 2. Wymagane pochylenia terenu dla wybranych pojazdów wolnobieżnych [25]
Tab. 2. Terrain slope requirements for selected slow-speed vehicles [25]

Rodzaj pojazdu	Pochylenie wzdłużne	Pochylenie poprzeczne
pojazdy śnieżne	35° (70%)	35° (70%)
wózki golfowe	25° (47%)	20° (36%)
maszyny leśne	45° (100%)	25° (47%)
terenowe wózki widłowe	14° (25%)	15° (27%)

W przypadku najpopularniejszych przegubowych maszyn inżynieryjno-budowlanych pracujących często w warunkach terenowych – ładowarek kołowych – nie sprecyzowano wymogów normatywnych w zakresie stateczności poprzecznej. Sprecyzowano natomiast wymogi dotyczące stateczności wzdłużnej. Wpływają one jednak na stateczność poprzeczną w sposób pośredni, ponieważ udźwig nominalny łyżki maszyny zdefiniowano jako 50% obciążenia wywracającego maszynę przy pełnym skręceniu ramy przegubowej. Podobnie w przypadku pracy osprzętem widłowym – udźwig jest definiowany jako 80% obciążenia wywracającego podczas pracy na poziomym i twardym podłożu – oraz 60% obciążenia wywracającego podczas pracy na podłożu o niskiej nośności [22,23]. Z tego względu wszystkie rozwiązania poprawiające stateczność poprzeczną, ale pogarszające udźwig maszyny są odrzucane.

Na szczególną uwagę zasługują wymagania formalne [21] stawiane terenowym teleskopowym nośnikom osprzętu (tab. 3) zwanym również ładowarkami teleskopowymi, w których dość szeroko stosowane są podwozia przegubowe.



Rys. 2. Wymagane położenie przegubowej ładowarki teleskopowej podczas testów stateczności poprzecznej na płycie wychylnej

Fig. 2. Required position of articulated telescopic loader during lateral stability verification with rollover tilting table

Podczas testu stateczności poprzecznej narzucone jest położenie maszyny. Powinna ona posiadać wyprostowaną ramę i być skierowana w górę zbocza w taki sposób, aby oś

przechodząca przez łożysko wahliwe tylnego mostu oraz przednie koło znajdujące się bliżej osi wywrotu płyty, była do tej osi równoległa. Test obejmuje 3 próby [21]:

- badanie stateczności maszyny w położeniu transportowym bez ładunku,
- badanie stateczności maszyny podczas pracy osprzętem bez ładunku,
- badanie stateczności maszyny podczas pracy osprzętu z ładunkiem.

Z punktu widzenia możliwości poruszania się w terenie, najistotniejsza jest próba z osprzętem w położeniu transportowym. Zawarte w normie wymagania są relatywnie wysokie i sięgają 50% pochylenia w przypadku maszyny bez obciążenia, jednak podjęcie ładunku obniża wymagania do zaledwie 12%. Spełnienie wymagań normatywnych nie gwarantuje zatem wysokiej stateczności poprzecznej i zdolności do poruszania się po zboczach.

Tab. 3. Wymagane pochylenia terenu dla teleskopowych ładowarek terenowych [21]

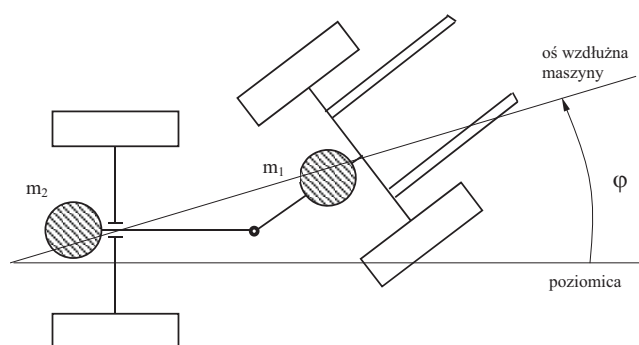
Tab. 3. Terrain slope requirements for articulated telescopic loaders [21]

Warunki stateczności	Pochylenie wzdłużne	Pochylenie poprzeczne
bez ładunku - wysięg minimalny – osprzęt 500 mm nad gruntem	-	50%
ładunek nominalny 500 mm nad gruntem - wysięg minimalny	22 %	12 %
bez ładunku – całe pole pracy	-	10 %
ładunek nominalny – całe pole pracy	7 %	-

Ponadto zarówno wymagania jak i procedura badań nie uwzględniają specyfiki stateczności poprzecznej w konstrukcjach przegubowych. W przypadku maszyn przegubowych, problem stateczności jest bowiem bardziej złożony, ponieważ podczas skrętu następuje wzajemne przemieszczanie się zarówno krawędzi wywrotu jak i wypadkowego środka ciężkości – nieruchome względem mostów są tylko lokalne środki ciężkości przedniej i tylnej części maszyny [6]. W efekcie wykonywanie skrętów i manewrowanie może istotnie zmieniać stateczność maszyny.

5. Uwarunkowania stateczności poprzecznej maszyn przegubowych

Ponieważ w czasie skrętu środek ciężkości maszyny przegubowej przemieszcza się poprzecznie, miarą stateczności maszyn przegubowych są dwa kąty wywrotu: zewnętrzny α_z i wewnętrzny α_w . Wartości obu tych kątów zmieniają się wraz ze zmianą położenia środków ciężkości mas m_1 i m_2 przedniej i tylnej części maszyny. Kąty te zależą również od położenia osi wzdłużnej maszyny w stosunku do pochylenia terenu. Położenie to można zdefiniować za pomocą skierowanego kąta φ zawartego między odcinkiem łączącym środki mostów (osią wzdłużną maszyny) a poziomnicami (rys. 3) zwanego kątem ustawienia.



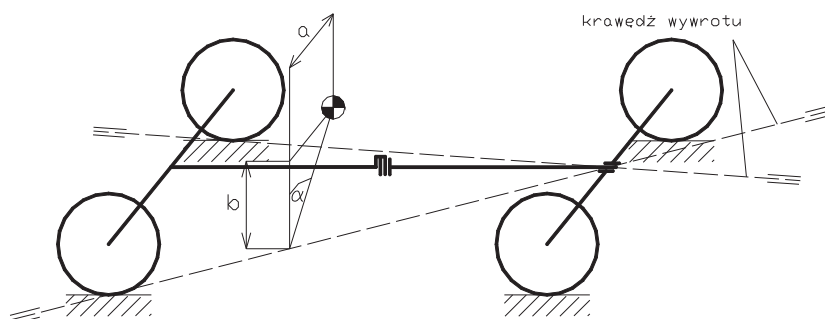
Rys. 3. Schemat określania kąta ustawienia maszyny φ względem pochylenia terenu

Fig. 3. Scheme of defining the machine position angle φ

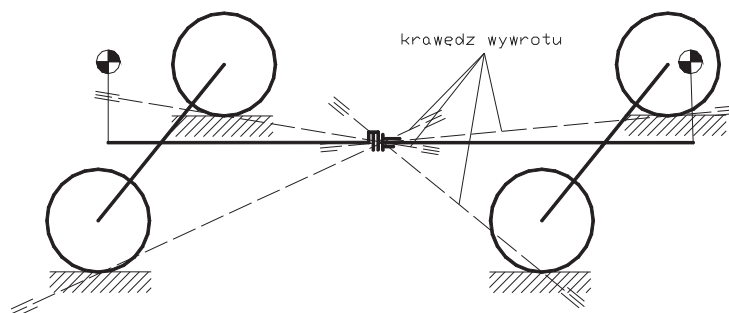
Innym czynnikiem mającym istotny wpływ na stateczność poprzeczną maszyn przegubowych jest konstrukcja ich układu jezdnego, którego jednym z podstawowych zadań jest zapewnienie kołom ciągłego kontaktu z gruntem (możliwość kopiowania terenu) mimo występujących nierówności.

W ładowarkach kołowych, w których przedni most jest sztywno połączony z ramą maszyny wymagane to standardowo spełniane jest dzięki wahliwemu połączeniu tylnego mostu z ramą maszyny. Rozwiązanie takie jednoznacznie definiuje położenie tzw. krawędzi wywrotu – linii, których przekroczenie przez środek ciężkości maszyny powoduje utratę stateczności poprzecznej, a której przebieg zależy od umiejscowienia wahliwego połączenia. Dla standardowych ładowarek, krawędziami wywrotu są zatem proste łączące punkty podparcia kół przedniego mostu ze środkami łożyska podparcia mostu tylnego – rys. 4.

Alternatywne rozwiązanie przedstawia rys. 5. Krawędzie wywrotu w tym przypadku to proste łączące środki podparcia kół z łożyskiem wahliwym. Stosowane jest ono głównie w wozidłach przegubowych oraz przegubowych maszynach leśnych, ale znajduje również zastosowania w lekkich ładowarkach i koparko ładowarkach.



Rys. 4. Położenie krawędzi wywrotu w maszynach z wahliwym mostem tylnym
Fig. 4. Rollover edge location in machines with swinging rear axle



Rys. 5. Położenie krawędzi wywrotu w maszynach z łożyskiem wahliwym przy przegubie
Fig. 5. Rollover edge location in machines with swinging bearing by articulation

6. Możliwości poruszania się w terenie ładowarek przegubowych

Biorąc pod uwagę podobieństwo rozwiązań technicznych stosowanych w budowie ładowarek kołowych można stwierdzić, że stateczność wzdłużna nie stanowi zwykle problemu dla inżynierskich maszyn przegubowych i maksymalne pochylenie terenu, na jakim mogą operować ograniczone jest zwykle poprzez ich kąty wjazdu i zjazdu. Wielkość maksymalnej dyspozycyjnej siły napędowej, standardowo z uwagi na konieczność rozwijania wysokich sił uciągu przekraczająca 60% siły ciężkości, umożliwia bezproblemowe pokonywanie wymaganych wzniesień. Z tych względów testy stateczności wzdłużnej ograniczają się do określenia dyspozycyjnej siły uciągu oraz obciążenia wywracającego.

Analiza parametrów ładowarek o masie 17-19 t (tab. 4) wykazuje na wyrównany poziom obciążeń wywracających (decydujących o wartości dopuszczalnego udźwigu), a co za tym idzie podobny rozkład mas i porównywalny zapas stateczności. Różnice w wartościach podstawowych parametrów maszyn tej samej klasy nie przekraczają zwykle 5% [26]. Jest to efektem silnej konkurencji wśród producentów maszyn i celowego dążenia do osiągnięcia porównywalnych parametrów. Z tych względów ich rozkład mas, a w konsekwencji stateczność poprzeczna również znajduje się na porównywalnym poziomie. Dokumentacja techniczno-ruchowa najpopularniejszej w Polsce ładowarki Ł-34 [18] podaje, że stateczność maszyny z pustą łyżką w położeniu transportowym wynosi podczas skrętu 40-48%, w zależności od kierunku skrętu, a nowocześniejszej maszyny Ł-35 – jest nieco wyższa i wynosi 40-57% [19] – tab. 5. Położenie maszyny podczas testu stateczności nie jest jednak w DTR jednoznacznie określone. Z punktu widzenia wcześniej zdefiniowanych wymagań i zdolności poruszania się w terenie, są to wartości zadawalające. Jednak określone na ich podstawie warunki bezpieczeństwa pracy i jazdy (tab. 6) znacznie odbiegają od oczekiwań.

Według producenta, jazda maszyną Ł-34 bez ładunku (osprzęt w położeniu transportowym), z manewrowaniem (wykonywaniem skrętów) jest dopuszczalna na pochyleniach poprzecznych nieprzekraczających 10%, a podjęcie ładunku ogranicza dopuszczalne pochylenie do zaledwie 5%. Zdecydowanie odmiennie warunki bezpieczeństwa zdefiniował ten sam producent dla drugiego modelu maszyny. Bez obciążenia w łyżce, ładowarka Ł-35 może poruszać się i manewrować z osprzętem w położeniu transportowym na zbieżni o pochyleniu 25%, natomiast podjęcie ładunku zwiększa dopuszczalne nachylenie poprzeczne do 35%. Rozpiętość ograniczeń jest zatem istotna i nie wynika z różnicy stateczności poprzecznej analizowanych maszyn.

Tab. 4. Podstawowe parametry ładowarek kołowych klasy 17-19 t [26]

Tab. 4. Primary parameters of wheeled loaders (category 17-19t) [26]

Typ ładowarki	Masa, [kg]	Obc. wywr. w skręcie, [kN]	Rozstaw osi, [m]	Rozstaw kół, [m]	Kąt skrętu ramy	Zewn. promień skrętu, [m]
HSW Ł34	18 470	120	3,14	2,09	40°	7,3
Komatsu WA380	17 830	124	3,2	2,16	40°	6,37
Hyundai HL 760	17 900	100	3,3	2,16	40°	6,83
O&K L35B	18 265	129	3,34	1,984	41°	6,35
CAT 950G	17 899	104	3,35	2,14	40°	6,85
CAT 962G	18 704	110	3,35	2,14	40°	6,85
Furkawa 355-II	18 800	128	3,35	2,2	40°	6,59
Volvo L120D	18 790	123	3,2	2,06	40°	6,85
Case 821C	17 192	110	3,2	2,08	40°	6,38
Fiat-H W190	17 195	122	3,2	2,16	40°	6,5
Liebherr L554	17 300	123	3,15	2,05	40°	6,36

Tab. 5. Stateczność poprzeczna wybranych przegubowych ładowarek kołowych produkcji krajowej [18,19]

Tab. 5. Lateral stability of selected articulated wheeled loaders made in Poland [18,19]

Położenie maszyny	Ł-34	Ł-35
Maszyna z ramą wyprostowaną	52%	57%
Maszyna w pełnym skręcie – stateczność „na zewnątrz”	48%	57%
Maszyna w pełnym skręcie – stateczność „do wewnątrz”	40%	40%

Tab. 6. Dopuszczalne maksymalne pochylenie terenu podczas eksploatacji wybranych przegubowych ładowarek kołowych produkcji krajowej [18,19]

Tab. 6. Maximum acceptable terrain slope during operating for selected articulated wheeled loaders made in Poland [18,19]

Warunki użycia	Ł-34	Ł-35
Praca maszyny z dopuszczalnym pełnym skretem ramy i unoszeniem łyżki na pełną wysokość z nominalnym obciążeniem Q_n	0%	16%
Praca maszyny z dopuszczalnym pełnym skretem ramy i unoszeniem łyżki na pełną wysokość z obciążeniem $0,5 Q_n$	5%	
Jazda transportowa z nominalnym obciążeniem (ładunek 0,5m nad podłożem) i dopuszczalnym pełnym skretem ramy / bez obciążenia	5% / 10%	36% / 25%
Jazda transportowa z nominalnym obciążeniem (ładunek 0,5m nad podłożem) bez wykonywania skrętów	10%	
Jazda transportowa z nominalnym obciążeniem (ładunek 0,5m nad podłożem) bez wykonywania skrętów / podjazd czołowy bez obciążenia	1 6% / 57%	

Z uwagi na fakt, że Volvo definiuje dopuszczalne poprzeczne nachylenie terenu na porównywalnym ze statecznością Ł-35 poziomie – 30% [5] (nie rozróżniając przy tym stanu obciążenia maszyny) – można uznać tę wielkość za wiarygodną i reprezentatywną dla standardowych przegubowych ładowarek kołowych. Jest to jednak wartość graniczna, ponieważ towarzyszą jej zalecenia minimalizacji prędkości jazdy, ograniczenia gwałtowności manewrów oraz w miarę możliwości utrzymywania ładunku skierowanego w kierunku wzniesienia, niezależnie od kierunku jazdy (przy znacznych pochyleniach zalecany jest zjazd tyłem).

Jeszcze ostrzejsze ograniczenia eksploatacyjne narzucają producenci ładowarek teleskopowych. Przykładem może być produkowany w kraju przegubowy teleskopowy terenowy nośnik osprzętu TH-280. Jego dokumentacja techniczno-ruchowa [20] zaleca pracę tylko na poziomym i płaskim podłożu o wystarczającej nośności oraz wskazuje na konieczność ograniczenia podczas pracy w terenie prędkości maksymalnej do zaledwie 8 km/h (jazda tylko na 1 lub 2 biegu). Ładunek podczas jazdy powinien znajdować się 0,2-0,3 m nad podłożem i nie powinien być podnoszony przy skreconej ramie przegubowej. Pochylenia terenu powinny być pokonywane prostopadle do zbocza, z osprzętem skierowanym w górę wzniesienia niezależnie od kierunku jazdy (zjazd tyłem). Wskazuje to na bardzo niską stateczność ładowarek teleskopowych i zdecydowanie ograniczone możliwości poruszania się w terenie.

7. Wnioski

W badaniach stateczności poprzecznej dominują testy prowadzone na płycie wychylnej. Są one tańsze i łatwiejsze do przeprowadzenia – jednak w czasie testów dynamicznych, oprócz stateczności poprzecznej sprawdzana jest zdolność do pracy w warunkach pochyłeń wszystkich podstawowych układów i systemów np. układu smarowania silnika, układu zasilania silnika, układu chłodzenia, układu napędowego, układu hamulcowego itd. oraz określany jest wpływ dynamiki pracy zawieszenia na stateczność pojazdu (kumulacja oddziaływań dynamicznych). W efekcie niosą one pełniejszą informację o jakości testowanego wyrobu. Rezultaty testów nie są w pełni porównywalne. Chcąc zapewnić dobrą stateczność w testach dynamicznych należy uzyskać zapas stateczności, który nie powinien być niższy od 0,1g, a pożądane jest osiągnięcie 0,2g.

Pojazdy terenowe o wysokiej mobilności powinny pokonywać w teście dynamicznym zbocza o nachyleniu 40%, co w połączeniu z odpowiednim zapasem stateczności wskazuje na konieczność osiągnięcia podczas testu statycznego na płycie wychylnej nachylenia min. 60%. Ponieważ minimalny akceptowalny poziom stateczności poprzecznej dla wojskowych maszyn

inżynieryjnych w testach dynamicznych wymaga zdolności poruszania się na zboczach o nachyleniu 30%, można uznać, że w testach statycznych na płycie wychylnej minimalny poziom stateczności maszyn przeznaczonych do pracy w terenie powinien wynosić nie mniej niż 40% – wówczas zapas stateczności wyniesie 0,1g (wskazane jest jednak dysponowanie wyższym zapasem stateczności na poziomie 0,2g). Powinien być on osiągnięty w najniekorzystniejszym położeniu maszyny zarówno podczas przewożenia ładunków jak i z nieobciążonym osprzętem.

Przeprowadzone analizy wskazują, że położenie charakterystyczne określone w normie dotyczącej ładowarek teleskopowych (rama wyprostowana, maszyna skierowana ukośnie w górę), nie pozwala na określenie minimalnej stateczności maszyny przegubowej, lecz wręcz przeciwnie – jest bardzo korzystne dla jej stateczności. Nie jest to jednak wymaganie przypadkowe, ponieważ jego spełnienie wymaga przesunięcia własnego środka ciężkości maszyny (próba jest prowadzona bez obciążenia) w kierunku przedniego mostu. Zapobiega zatem dążeniom producentów maszyn do maksymalizacji udźwigu poprzez odsuwanie środka ciężkości od przedniego mostu i zapewnia minimalny poziom stateczności i bezpieczeństwa.

Niska stateczność jest głównie efektem zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych, w których stateczność poprzeczna nie jest priorytetem oraz przyjętego rozkładu mas, wynikającego z dążenia do uzyskania jak najwyższego udźwigu, przy którym maszyna spełnia formalne wymogi bezpieczeństwa.

Pełniejsze poznanie problemów stateczności poprzecznej maszyn przegubowych i zaproponowanie wiarygodnych metod jej testowania, wymaga przeprowadzenia dalszych analiz zarówno stateczności statycznej, jak i dynamicznej ze szczególnym uwzględnieniem wpływu obciążenia osprzętu oraz kąta ustawienia maszyny.

Literatura

- [1] AIS-093/F: *Working stability of vehicles*.
- [2] ANSI/ASME B56.1-2004: *Safety Standard for Low Lift and High Lift Trucks*, American Society of Mechanical Engineers.
- [3] ATPD-2301: *Purchase description tractor, wheeled, all wheel drive, with attachments (High Mobility Engineer Excavator)*.
- [4] Defence Standard 23-6: *Technology Guidance for Military Logistics Vehicles*, UK Ministry of Defence.
- [5] *Dokumentacja Techniczno-ruchowa. Podręcznik operatora L90D / L120D*, Ref. 4816696695 Volvo CE, Warszawa 2000.
- [6] Dudziński, P., *Theorie der Lenksysteme für industrielle Radfahrzeuge*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2004.
- [7] *Future Tactical Truck System – Maneuver Sustainment Vehicle*, Tacom 2003.
- [8] ISO 16333 – *Heavy commercial vehicle and buses – steady-state rollover tilt table test method*.
- [9] ISO 5766 – *Pallet stackers and high lift-platform truck – stability test*.
- [10] ISO 1074 – *Counterbalanced fork-lift trucks – stability test*.
- [11] ISO 8379 – *Rough terrain truck – stability test*.
- [12] ISO 3184 – *Reach and straddle fork-lift trucks – stability test*.
- [13] ISO 7975 – *Braking in a turn – open loop test procedure*.
- [14] ISO 9816 – *Power-off reactions of vehicle in a turn- Open-loop test procedure*.
- [15] ISO 9815 – *Passenger car-trailer combination – lateral stability test procedure*.
- [16] ISO 3888 Part 1 – *Test procedure for a severe lane change*.
- [17] ISO 3888 Part 2 – *Elk Test*.
- [18] *Ładowarka hydrauliczna Ł-34. Instrukcja obsługi*, Kombinat Przemysłowy Huta Stalowa Wola 1987.
- [19] *Operational Instruction. Hydraulic Loader L-35*, Kombinat Przemysłowy HSW 1990.

- [20] *Operational Instruction. Telescopic Handler TH-280*, Technocentrum, Stalowa Wola 2004.
- [21] PN-EN 1459 – *Safety of industrial trucks – Self propelled variable reach truck (Wózki jezdniowe, bezpieczeństwo. Wózki jezdniowe napędzane ze zmiennym zasięgiem)*.
- [22] PN-EN 474-3 – *Maszyny do robót ziemnych. Bezpieczeństwo. Wymagania dotyczące ładowarek*.
- [23] PN-ISO 5998 – *Maszyny do robót ziemnych. Nominalne obciążenie robocze ładowarek gąsienicowych i kołowych*.
- [24] *Rollover Prevention Docket No. NHTSA-2000-6859 RIN 2127-AC64*.
- [25] *The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space: Surface Vehicle Standards*. SAE Handbook 2003.
- [26] *Sprawozdanie z Projektu Badawczego Grant: Optymalizacja parametrów konstrukcyjnych przegubowego ciągnika kołowego ze względu na stateczność jazdy*. WAT, Warszawa 2000.