

## RESEARCH AND SHAPING LATERAL STABILITY OF ARTICULATED WHEELED TOOL-CARRIERS – MODEL INVESTIGATIONS

Agnieszka Kozicka, Marian J. Łopatka, Tomasz Muszyński

Military University of Technology  
Faculty of Mechanical Engineering  
Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw, Poland  
a.kozicka@wme.wat.edu.pl, m.lopatka@wme.wat.edu.pl,  
t.muszynski@wme.wat.edu.pl

### Abstract

*This work investigates the lateral stability of articulated wheeled equipment like loaders or handlers. Operating and moving in a rough terrain require a high stability. In case of articulated vehicles this problem is quite complicated, because the lateral stability depends not only on high of centre of gravity and axle base, but on size of loading and vehicle position on the slope as well. However the standard requirements don't put producers under an obligation to specify the minimal lateral stability of the machines they produce and when this minimum occurs. Therefore the primary purpose of our studies with articulated machine demonstrator was to find the worst position for typical construction solutions from the lateral stability point of view. Based on acquired results we worked out our propositions for testing terrain capabilities of articulated tool-carriers and specify the possibilities of increasing the lateral stability without changing the high of centre of gravity.*

*In spite of charging of research results with the relatively high error, they permit on the qualitative estimation of stability jointed machines in alternative configurations. They also permit to state the low transverse stability of loaders of the standard-design and the high sensibility of their design on modifications.*

**Keywords:** transport, stability, working machines, articulated machine, model investigations

## BADANIE I KSZTAŁTOWANIE STATECZNOŚCI POPRZECZNEJ KOŁOWYCH MASZYN PRZEGUBOWYCH – BADANIA MODELowe

### Streszczenie

*Praca i przemieszczanie się maszyn w terenie wymaga wysokiej stateczności poprzecznej. W przypadku maszyn przegubowych problem ten jest złożony, ponieważ ich stateczność poprzeczna zależy nie tylko od wysokości środka ciężkości oraz rozstawu kół, ale również od wielkości przenoszonego ładunku oraz położenia osi wzdłużnej maszyny w stosunku do pochylenia terenu. Wymagania normatywne nie narzucają jednak producentom konieczności określenia minimalnej stateczności maszyny oraz położenia, przy którym ona występuje, co utrudnia określenie przydatności maszyny do prac terenowych. Dlatego celem podjętych badań było poznanie obszarów minimalnej stateczności poprzecznej maszyn przegubowych, warunków jej występowania dla reprezentatywnych maszyn, określenie możliwości jej poprawy oraz wskazanie jednoznacznych metod jej testowania. W celu przeprowadzenia badań zbudowano dwa uniwersalne modele-demonstratory maszyny przegubowej z wychylnym tylnym mostem, które umożliwiają odwzorowanie geometrii i rozkładu mas rzeczywistej maszyny. Na podstawie uzyskanych wyników opracowano zalecenia do testowania stateczności poprzecznej terenowych maszyn przegubowych oraz określono możliwości zwiększenia ich stateczności przy zachowaniu dotychczasowej wysokości środka ciężkości. Mimo obarczenia rezultatów badań relatywnie wysokim błędem, one pozwalają na jakościową ocenę stateczności maszyn przegubowych w alternatywnych konfiguracjach. One także pozwalają stwierdzić niski poziom stateczności poprzecznej ładowarek o standardowej konstrukcji i wysoką wrażliwość ich konstrukcji na modyfikacje.*

**Słowa kluczowe:** transport, maszyny robocze, maszyny przegubowe, stateczność, badania modelowe

### 1. Wprowadzenie

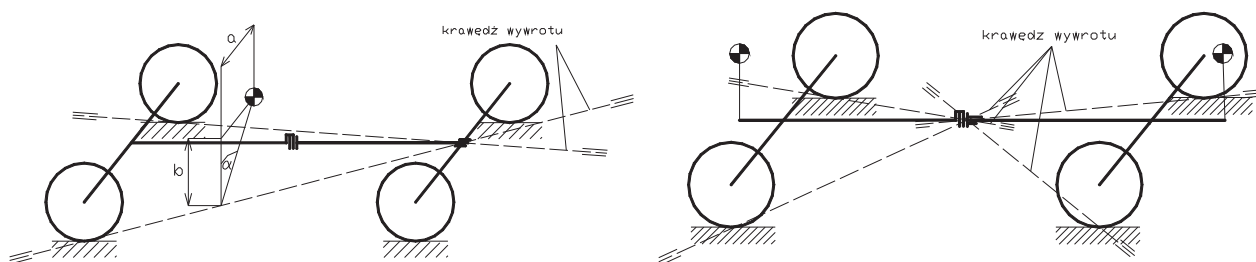
Przyjmując za standardowymi wymaganiami wojskowymi [1], że efektywne poruszanie się w terenie wymaga zdolności do poruszania się po zboczach o nachyleniu min. 30%, a wskazana jest zdolność do manewrowania na pochyleniach 40% oraz że z uwagi na bezpieczeństwo minimalny zapas stateczności powinien wynosić 0,1g, a pożądane jest dysponowanie zapasem

stateczności rzędu 0,2g – stateczność maszyn terenowych, wyznaczana na płycie wychylnej powinna być określona kątem wywrotu na poziomie min. 40%, a wskazane jest by wynosił on powyżej 60%. W przypadku maszyn przegubowych problem jest złożony – ich stateczność poprzeczna zależy nie tylko od wysokości środka ciężkości oraz rozstawu kół, ponieważ [2]:

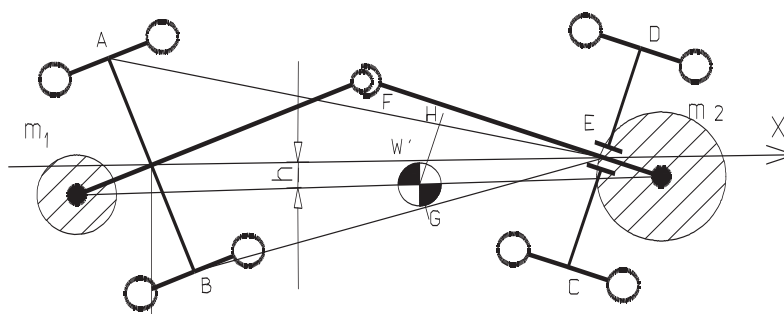
- krawędź wywrotu nie przebiega przez punkty styku kół przedniej i tylnej osi z podłożem lecz przez łożysko wzdłużne (rys.1) zapewniające kołom kontakt z podłożem w warunkach nierówności terenowych – w efekcie przemieszczając wzdłużnie środek ciężkości (np. poprzez podjęcie ładunku) można istotnie zmienić jego położenie w stosunku do krawędzi wywrotu, a tym samym stateczność poprzeczną;
- podczas skrętu występuje wzajemne przemieszczanie się zarówno krawędzi wywrotu jak i wypadkowego środka ciężkości ponieważ lokalne środki ciężkości przedniej i tylnej części maszyny ulegają przemieszczeniom w stosunku do osi wzdłużnej maszyny (rys.2).

W konsekwencji, kąt wywrotu zależy również od wielkości podnoszonego ładunku oraz położenia osi wzdłużnej maszyny w stosunku do pochylenia terenu. Położenie to można zdefiniować za pomocą skierowanego kąta  $\varphi$  zawartego między odcinkiem łączącym środki mostów (osią wzdłużną maszyny), a poziomnicami (rys.3) zwanego kątem ustawienia. Wymagania normatywne [5,6,7] nie narzucają jednak producentom konieczności określenia minimalnej stateczności maszyny oraz położenia, przy którym ona występuje. W tych okolicznościach praktycznie niemożliwe jest określenie przydatności maszyn przegubowych do prac terenowych.

Celem podjętych badań było poznanie obszarów minimalnej stateczności poprzecznej maszyn przegubowych, warunków jej występowania dla reprezentatywnych maszyn, określenie możliwości jej poprawy oraz wskazanie jednoznacznych metod jej testowania.



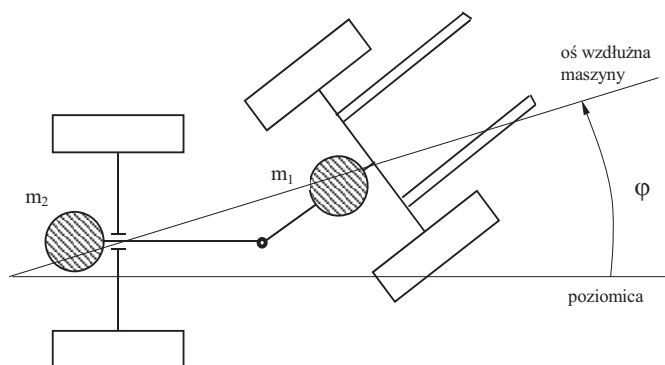
Rys. 1. Położenie krawędzi wywrotu w maszynach przegubowych  
Fig. 1. Rollover edge location in articulated machines



Rys.2. Przemieszczenie poprzeczne krawędzi wywrotu oraz lokalnych środków ciężkości podczas skrętu  
Fig. 2. Lateral shift of rollover edge and local centers of gravity in a turn

Standardową metodą określania stateczności poprzecznej maszyn są badania na płycie wychylnej. Z uwagi na złożone oddziaływania między poszczególnymi członami maszyny, podczas badań stanowiskowych bardzo trudne jest jednoznaczne określenie momentu oderwania

od podłoża pierwszego koła, ponieważ w niektórych położeniach, mimo braku nacisku na podłoże jednego z kół, maszyna nadal zachowuje stateczność w szerokim zakresie pochyłeń. Z tych względów za utratę stateczności podczas badań stanowiskowych przyjęto uważać oderwanie od podłoża kół przynajmniej 2 osi. Należy jednak uznać, że podczas pracy w terenie, granicą bezpieczeństwa jest utrata kontaktu z podłożem, chociaż przez jedno z kół. Brak jest jednak wyczerpujących badań pozwalających odnieść wyniki badań stanowiskowych do warunków terenowych.



Rys.3. Schemat określania kąta ustawienia maszyny  $\varphi$  względem pochylenia terenu  
 Fig. 3. Scheme of defining the machine position angle  $\varphi$

Z tych przyczyn analityczne określenie stateczności maszyn przegubowych mimo zastosowania złożonych modeli matematycznych może być obciążone znacznym błędem. W celu ich wyeliminowania zdecydowano się na wykonanie badań modelowych z wykorzystaniem demonstratora. Pozwolą one na zbudowanie wiarygodnych modeli symulacyjnych, wskażą obszary minimalnej stateczności oraz zobrazują różnicę stateczności w zależności od jej definicji.

## 2. Modele i metodyka badań modelowych

W celu przeprowadzenia badań zbudowano dwa uniwersalne modele-demonstratory maszyny przegubowej: 1 – z wychylnym tylnym mostem; 2 – z zintegrowanym łożyskiem wahliwym w przegubie – zgodnie ze schematem kinematycznym z rys.1, które umożliwiają odwzorowanie geometrii i rozkładu mas w zakresie:

- wysokości położenia łożyska wahliwego;
- położenia przegubu w stosunku do przedniego i tylnego mostu;
- rozkładu mas emulując zmiany położenia lokalnych środków ciężkości przedniej i tylnej części maszyny;
- rozkładu mas emulując podjęcie ładunku nominalnego osprzętem roboczym.

Badania stateczności przeprowadzono na płycie wychylnej o wysokiej chropowatości, zmieniając kąt ustawienia maszyny co  $22,5^\circ$ .

Tab. 1. Stateczność poprzeczna wybranych przegubowych ładowarek kołowych [4,8,9]  
 Tab. 1. Lateral stability of selected articulated wheeled loaders [4,8,9]

Położenie maszyny	Ł-34 bez ładunku	SŁ-34B z ładunkiem	TT-3000 bez ładunku
Maszyna z ramą wyprostowaną	52 %	55%	51 %
Maszyna w pełnym skręcie – stateczność „na zewnątrz”	48 %	55%	51 %
Maszyna w pełnym skręcie – stateczność „do wewnątrz”	40 %	35%	28 %

Jako maszyny reprezentatywne i poziom odniesienia, wykorzystano ładowarkę Ł-34 (odwzorowanie w skali 1 : 6,28), jej zmodyfikowaną wersję wojskową – SŁ-34B o zwiększonym udźwigu wyposażoną w osprzęt widłowy oraz prototyp ładowarki teleskopowej TT-3000 (skala 1 : 5,82). W celu odwzorowania ich stateczności poprzecznej wykorzystano wyniki badań stanowiskowych w 3 charakterystycznych położeniach dla każdej maszyny (tab.1). Wyników tych nie można jednak bezpośrednio porównywać, ponieważ maszyny podczas prób różniło obciążenie oraz kąt ustawienia. W przypadku ładowarki Ł-34, oś wzdłużna maszyny (łączyca środki mostów) podczas każdej z 3 prób była równoległa do osi obrotu płyty. Podczas prób ładowarki SŁ-34B wymagano inne charakterystyczne położenia:

- maszyna posiada wyprostowaną ramę, a oś wzdłużna maszyny jest równoległa do osi płyty wychylnej;
- maszyna posiada w pełni skreconą ramę w górę płyty, a oś przechodząca przez łożysko wahliwe tylnego mostu i koło przednie znajdujące się bliżej osi płyty jest do niej równoległa;
- maszyna posiada w pełni skreconą ramę w dół płyty, a oś przechodząca przez łożysko wahliwe tylnego mostu i koło przednie znajdujące się dalej od osi płyty jest do niej równoległa;

W trakcie prób ładowarki teleskopowej przyjęto następujące położenia:

- maszyna z wyprostowaną ramą, skierowana w górę w taki sposób, że oś przechodząca przez łożysko wahliwe tylnego mostu i przednie koło bliższe osi obrotu płyty jest równoległa do tej osi;
- maszyna w pełnym skręcie w dół pochylenia, a oś przechodząca przez łożysko wahliwe tylnego mostu i przednie koło bliższe osi obrotu płyty jest do niej równoległa;
- maszyna w pełnym skręcie w górę pochylenia, a oś przechodząca przez łożysko wahliwe tylnego mostu i przednie koło bliższe osi obrotu płyty jest do niej równoległa.

Uzyskanie podobieństwa w zakresie stateczności wybranych modeli maszyn wymagało odpowiedniego usytuowania lokalnych środków ciężkości poprzez regulację położenia obciążników przedniego i tylnego mostu. W tym celu opracowano specjalne procedury regulacyjne. Przykładowo w przypadku maszyny SŁ-34B, w pierwszym kroku wyznaczono właściwą wysokość obciążników. Osiągnięto to poprzez ustawienie modelu w położeniu jazdy na wprost i zamocowanie obciążenia odwzorowującego obciążenie osprzętu oraz mas regulacyjnych nad mostami przednim i tylnym na wysokości powodującej utratę stateczności przy pochyleniu terenu 55%. Założono, że lokalne środki ciężkości przedniej i tylnej części maszyny znajdują się na tej samej wysokości. Następnie w położeniu skrętu w górę przemieszczano przednią masę regulacyjną (przemieszczenie przód-tył bez zmiany wysokości), aż do uzyskania kąta wywrotu 29° (55%). W ostatnim kroku skorygowano położenie tylnej masy regulacyjnej – przemieszczano ją do tyłu, aż do utraty stateczności przy nachyleniu 35% podczas skrętu w dół.

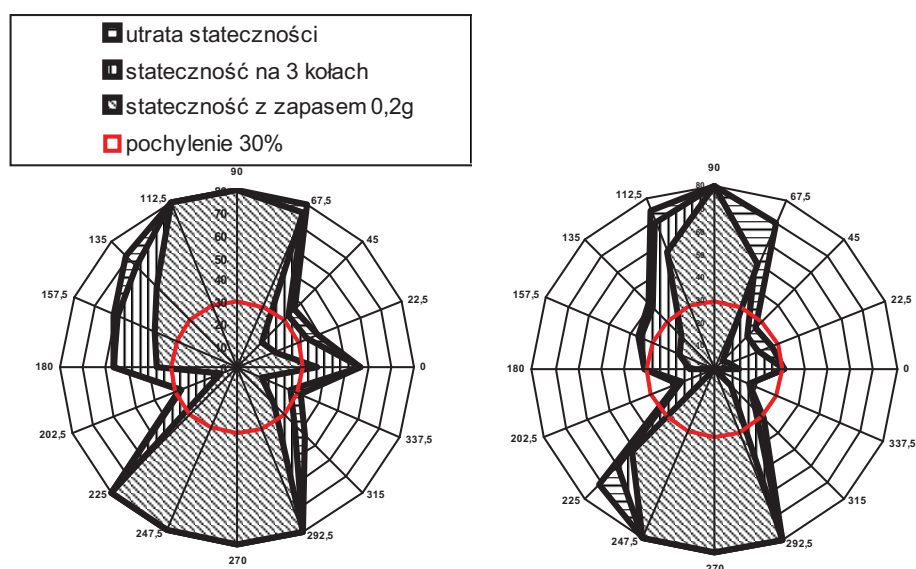
W trakcie badań stateczności określano stateczność zgodnie z wymaganiami normatywnymi tzn. za utratę stateczności uważano oderwanie kół obydwu osi od podłoża, jednak dodatkowo określano moment utraty kontaktu z podłożem pierwszego z kół. Próby przeprowadzono dla modeli w pełnym skręcie, w celu określenia minimalnej stateczności z ładunkiem i bez obciążenia na osprzęcie. Błąd pomiarów oszacowano na 3%.

### 3. Weryfikacja stateczności ładowarek

#### 3.1. Modelowa weryfikacja stateczności spycharko-ładowarki SŁ-34B

Rezultaty badań modelu ładowarki z obciążeniem (rys.4) wskazują, że najniższą stateczność maszyna osiąga przy skierowaniu jej osi wzdłużnej przechodzącej przez środki mostów – ok. 20° w dół nachylenia – zarówno przy skręcie w lewo jak i w prawo. Przewrócenie maszyny występuje wówczas przy pochyleniu płyty rzędu 28-32%. Uwzględniając zapas stateczności na poziomie 0,2g, dopuszczalne pochylenie terenu nie powinno zatem przekraczać 10% podczas jazdy z obciążeniem na osprzęcie.





Rys. 4. Stateczność modelu ładowarki w skręcie, z obciążeniem i bez obciążenia na widłach w funkcji kąta ustawienia  
 Fig. 4. Stability of loader's model – in a turn, with or without loading – depending on machine position angle

Model ładowarki bez obciążenia na osprzęcie cechuje się jednak znacznie gorszą statecznością. Minimalna stateczność występuje w podobnych położeniach jak w przypadku maszyny z obciążeniem, jednak utrata stateczności występuje już przy pochyleniach rzędu 15-17% – rys.4. Zapewnienie minimalnego poziomu bezpieczeństwa (zapas stateczności 0,1g) wymaga poruszania się po terenie o nachyleniu nie przekraczającym 5% oraz ograniczenia prędkości ruchu. Można zauważyć, że obciążenie osprzętu roboczego wyraźnie podnosi stateczność maszyny. Jednak w obydwu przypadkach (z obciążeniem i bez obciążenia osprzętu) istnieje jeszcze jedno lokalne minimum – przy skierowaniu maszyny w górę pod kątem ok. 40°, które może mieć istotne znaczenie dla stateczności maszyny w przypadku wprowadzania modyfikacji do jej konstrukcji.

Wyniki badań stateczności ładowarki SŁ-34B wyposażonej w osprzęt widłowy, są w wyraźnej sprzeczności z zaleceniami producentów dopuszczających jazdę standardowych ładowarek na pochyleniach sięgających nawet 30% [3]. Nie jest ona jednak maszyną reprezentatywną, ponieważ w celu uzyskania wymaganego udźwigu istotnie zwiększono masę jej tylnej części, zmieniając rozkład mas.

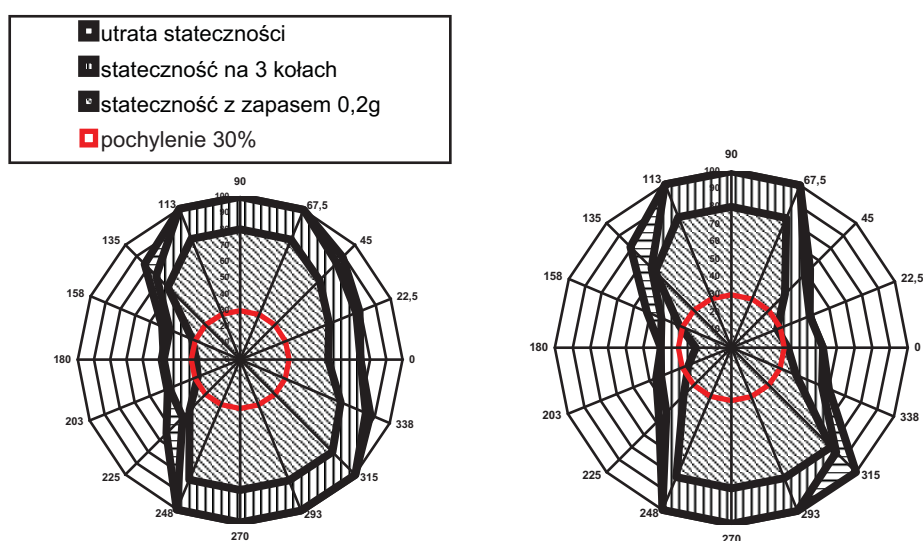
### 3.2. Modelowa weryfikacja stateczności standardowych ładowarek

W celu określenia możliwości poruszania się w terenie standardowych ładowarek, przeprowadzono badania stateczności modelu podstawowej, wyjściowej wersji maszyny Ł-34, porównywalnej z innymi maszynami tego typu. Jej model cechuje się znacznie lepszą statecznością od wersji o zwiększonym udźwigu – rys.5. Minimalna stateczność maszyny z obciążonym osprzętem nie spada poniżej 47% i 40% dla maszyny bez ładunku. Występuje ona podczas wykonywania skrętu w dół, gdy oś wzdłużna maszyny jest równoległa do osi obrotu płyty wychylnej. Podobnie jak w poprzednim przypadku obciążenie osprzętu istotnie poprawia stateczność maszyny. W efekcie, przy zachowaniu zapasu stateczności rzędu 0,2g może ona poruszać się bez obciążenia po terenie o nachyleniu dochodzącym do 20%, a z obciążeniem pokonywać nachylenia nawet 27%. Tak znaczna poprawa stateczności w stosunku do wersji SŁ-34B wynika głównie ze znacznie niższego położonego środka ciężkości. Badania stateczności modelu z zablokowanym łożyskiem wzdłużnym wykazały, że model standardowej maszyny traci stateczność przy pochyleniu 77%, co odpowiada wysokości środka ciężkości rzeczywistej maszyny na poziomie 1,36 m, podczas gdy porównywalne parametry wersji o zwiększonym udźwigu wynoszą odpowiednio 67% i 1,57 m. Obniżenie wysokości środka ciężkości o ok. 13%

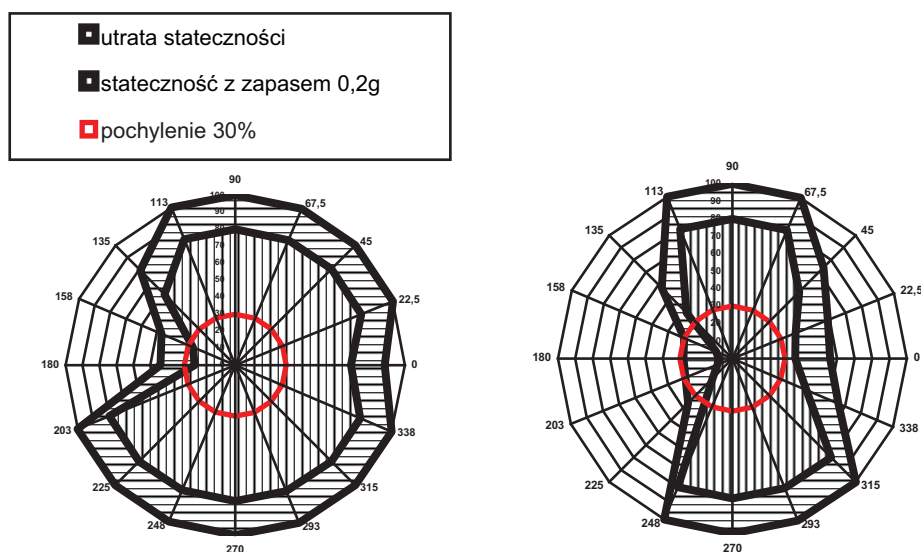
(0,2 m), jest efektem zmniejszenia w SŁ-34B nisko położonej masy narzędzia roboczego (masa łyżki wieloczynnościowej jest o 400 kg mniejsza od masy wideł) oraz dodania znacznych, wysoko położonych (powyżej 1,5 m) mas w tylnej części maszyny (konstrukcja osłony kabiny ROPS, zabudowa silnika, zwiększony balast tylny itp.).

Drugim czynnikiem istotnie pogarszającym stateczność wersji SŁ-34B, jest przesunięcie środka ciężkości tylnej części maszyny znacznie poza tylny most. W efekcie podczas skrętu wypadkowy środek ciężkości ulega znacznym przemieszczeniom poprzecznym, zbliżając się do krawędzi wywrotu, redukując stateczność maszyny. Pod tym względem rozwiązania zastosowane w standardowej ładowarce są korzystniejsze, chociaż widoczna jest znacząca asymetria jej charakterystyki wywołana poprzecznym przemieszczaniem środka ciężkości podczas skrętu.

Na podstawie uzyskanej charakterystyki stateczności ładowarki Ł-34, reprezentatywnej dla standardowych przegubowych ładowarek kołowych można przyjąć, że są one w stanie poruszać się na pochyleniach sięgających 30% – wymaga to jednak drastycznego ograniczenia dopuszczalnych obciążeń dynamicznych (zapas stateczności 0,1g).



Rys. 5. Stateczność modelu standardowej ładowarki SŁ-34 z obciążeniem i bez obciążenia na osprzęcie  
Fig. 5. Stability of standard loader's SŁ-34 model – with or without loading – depending on machine position angle



Rys. 6. Stateczność modelu ładowarki teleskopowej z obciążeniem i bez obciążenia na osprzęcie  
w funkcji kąta ustawienia

Fig. 6. Stability of telescopic loader's model – with or without loading – depending on machine position angle

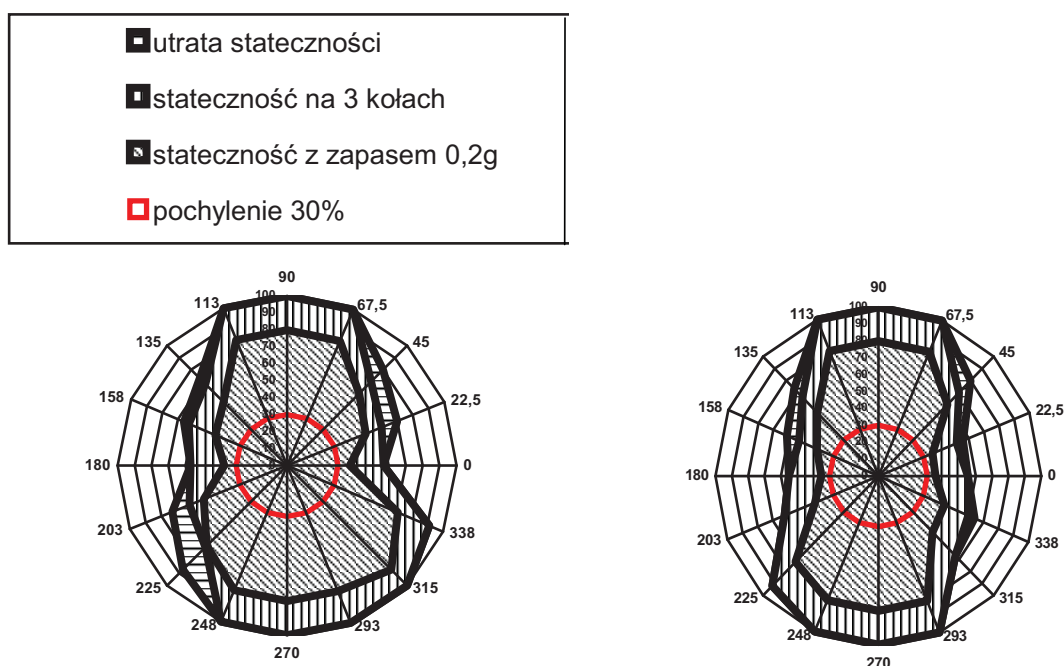
### 3.3. Modelowa weryfikacja stateczności ładowarek teleskopowych

Na charakterystykach stateczności ładowarek teleskopowych (rys.6) widoczny jest silny, korzystny wpływ obciążenia osprzętu. Jego brak ogranicza drastycznie możliwości manewrowania w terenie – skręty z zapasem stateczności 0,2g mogą być wykonywane na zboczach o nachyleniu zaledwie 8%. Określenie tego typu maszyn jako ładowarek terenowych odnosi się zatem tylko do niskich nacisków powierzchniowych układu jezdnego i możliwości pokonywania terenu o niskiej nośności. Podjęcie ładunku poprawia stateczność o ok. 15% – jednak widoczna jest nadal silna asymetria charakterystyki.

Ponieważ maszyna spełnia wymagania normatywne [4,8], należy uznać, że niezbędne jest wprowadzenie dodatkowych testów stateczności dla maszyn przeznaczonych do pracy w warunkach terenowych.

### 4. Badania możliwości poprawy stateczności maszyn przegubowych

W pierwszym etapie testów sprawdzono możliwości poprawy stateczności ładowarki o zwiększonym udźwigu poprzez zastosowanie przegubu zintegrowanego oraz korektę rozkładu mas bez zmiany wysokości lokalnych środków ciężkości. Potwierdzono, że korzystniejsze dla stateczności poprzecznej jest związanie łożyska wahliwego z członem maszyny o mniejszej masie, która wzrasta po podjęciu obciążenia użytecznego. Następnie określono najkorzystniejszy rozkład mas. W tym celu ustawiono model w pełnym skręcie, równoległe do osi obrotu wychylnej płyty i modyfikowano położenie lokalnych środków ciężkości, aż do uzyskania jednakowej stateczności obydwu członów maszyny.

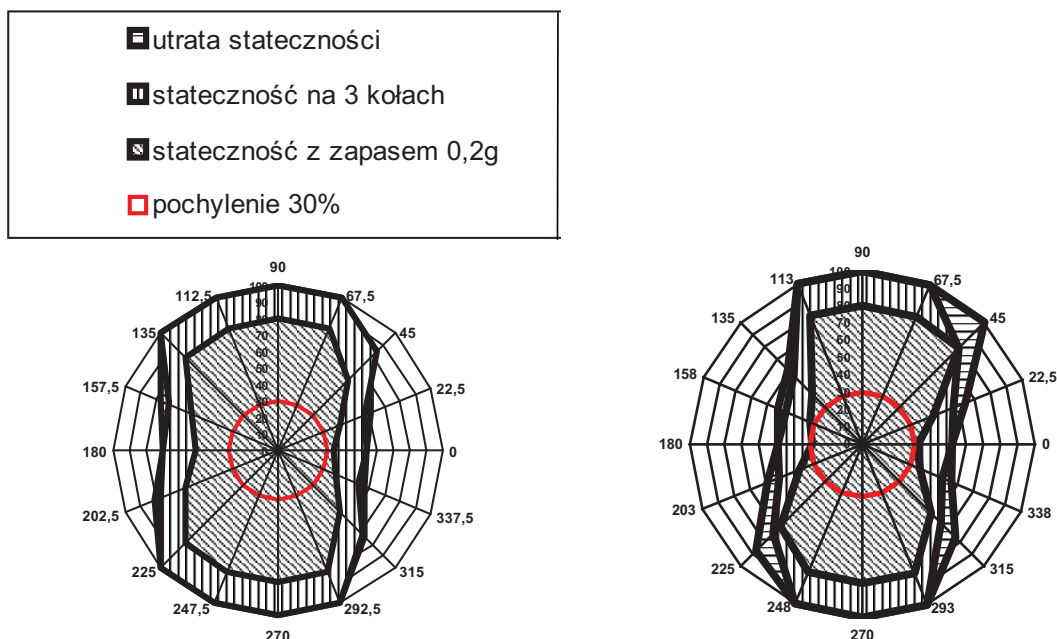


Rys. 7. Stateczność modelu zmodernizowanej maszyny SŁ-34B (z zachowaną wysokością środka ciężkości i zintegrowanym przegubem) w skręcie i obciążonym osprzętem oraz bez obciążenia

Fig. 7. Stability of modernized loader's SŁ-34B model (with unchanged high of centre of gravity and integrated articulation) – in a turn, with or without loading – depending on machine position angle

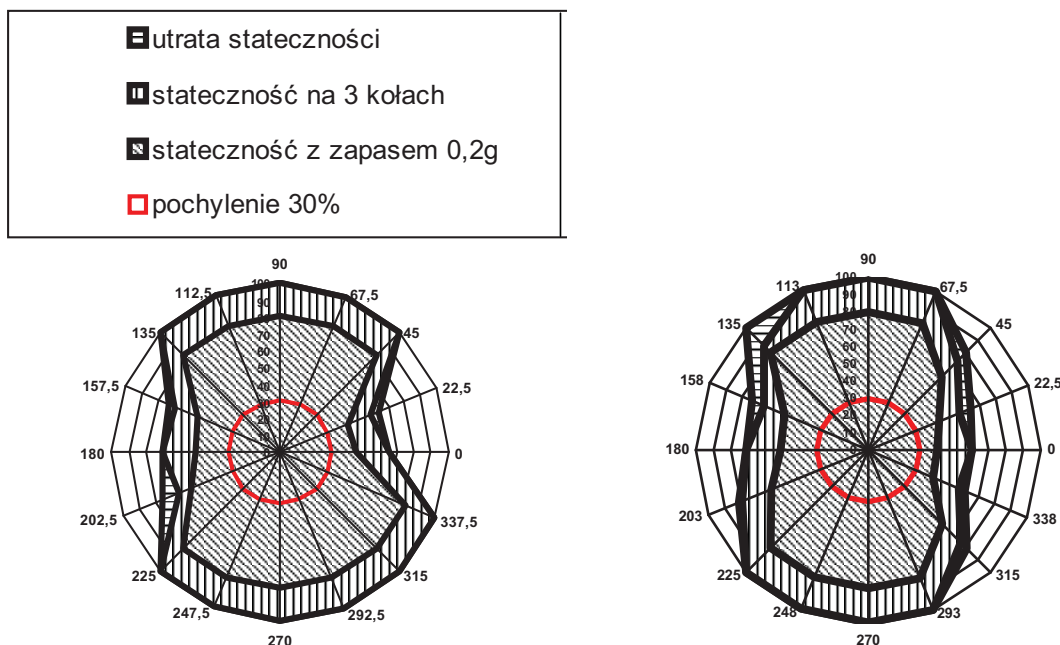
Przeprowadzone testy wykazały (rys.7), że maszyna z zintegrowanym przegubem ma znacznie wyższą stateczność od konstrukcji z wahliwym mostem. Minimalna stateczność nie spadła poniżej 55%, co pozwala maszynie z zapasem stateczności 0,2g, z powodzeniem manewrować na pochyleniach rzędu 30%. Uwzględniając możliwość obniżenia środka ciężkości możliwe jest osiągnięcie stateczności poprzecznej pozwalających na pracę przy pochyleniach sięgających 40%. Podobnie jak w przypadku maszyn z wahliwym mostem, obciążenie osprzętu wyraźnie poprawia

stateczność poprzeczną maszyny. Jednak w przeciwieństwie do modelu SŁ-34B, minimalna stateczność występuje, gdy oś wzdłużna maszyny jest równoległa do osi obrotu płyty wychylnej. W efekcie każde odchylenie maszyny w górę lub w dół zbocza poprawia jej stateczność. Istotnie poprawia stateczność również wyprostowanie ramy maszyny – dopuszczalne nachylenie wynosi wówczas 64-69% w zależności od obciążenia osprzętu.



Rys. 8. Stateczność modelu ładowarki SŁ-34 ze zwiększonym rozstawem osi do 4 m i ładunkiem na osprzęcie oraz bez obciążenia

Fig. 8. Stability of loader's SŁ-34 model with increased axel base to 4m – with or without loading



Rys. 9. Stateczność modelu maszyny z zintegrowanym przegubem oraz zwiększonym rozstawem osi do 4 m i ładunkiem i bez ładunku na osprzęcie (wysokość środka ciężkości jak w SŁ-34)

Fig. 9. Stability of machine's model with integrated articulation and increased axel base to 4m – with or without loading (high of centre of gravity the same as in SŁ-34 loader)

Analizując możliwości poprawy stateczności standardowych konstrukcji należy stwierdzić, że niezbędne jest wyeliminowanie asymetrii charakterystyki. Ograniczając do minimum zmiany



konstrukcyjne, można to osiągnąć zwiększając rozstaw osi, umieszczając je pod lokalnymi środkami ciężkości. W wyniku przemieszczenia tylnego mostu z łożyskiem wahliwym, wypadkowy środek ciężkości odsunie się od łożyska wzdłużnego dodatkowo poprawiając stateczność. W analizowanym przypadku modyfikacji ładowarki SŁ-34, założono pozostawienie przedniego mostu w standardowym położeniu (lokalny środek ciężkości znajduje się ok. 0,2 m przed przednim mostem), natomiast w celu uzyskania symetrycznej charakterystyki stateczności (nie przemieszczania wypadkowego środka ciężkości podczas skrętu) założono przemieszczenie tylnego mostu 0,2 m za lokalny środek ciężkości. W efekcie rozstaw osi w zmodyfikowanym modelu ładowarki SŁ-34 ukształtował się na poziomie 4 m. Taki wzrost rozstawu osi jest korzystny z punktu widzenia ograniczenia zjawiska galopowania poprzez rozprężenie drgań przedniej i tylnej części maszyny [26], jednak jego wadą jest zwiększenie promienia skrętu i pogorszenie zwrotności maszyny.

Przeprowadzone badania zmodyfikowanego modelu wykazały (rys.8), że minimalna stateczności maszyny wzrosła do ok. 50-55% w zależności od obciążenia osprzętu. Należy uznać, że są to graniczne wartości pochyłeń dla standardowych konstrukcji ładowarek, ponieważ wszelkie wprowadzane zmiany modernizacyjne (dodanie osłony kabiny ROPS, zabudowa wyciszająca silnika itp.) zwiększają wysokość położenia środka ciężkości i pogarszają stateczność. W efekcie można uznać, że zmodyfikowane konstrukcje standardowych ładowarek pozwalają na bezpieczne poruszanie się po zboczach o nachyleniu do 30% z zapasem stateczności 0,2g.

Dla tych samych warunków technicznych (rozstaw osi, wysokość środka ciężkości), maszyna posiadająca zintegrowany przegub charakteryzuje się minimalną statecznością na poziomie 60-70% (rys.9). Pozwala zatem operować na zboczach o nachyleniu 40% z zapasem stateczności 0,2g. Dalsza poprawa stateczności poprzecznej wymaga obniżenia środka ciężkości wykorzystując np. koncepcję maszyny z obniżaną na czas przejazdów kabiną.

## **5. Wnioski**

Mimo obarczenia rezultatów badań relatywnie wysokim błędem, pozwalają one na jakościową ocenę stateczności maszyn przegubowych w alternatywnych konfiguracjach. Pozwalają one stwierdzić relatywnie niski poziom stateczności poprzecznej ładowarek o standardowej konstrukcji i wysoką wrażliwość ich konstrukcji (stateczności poprzecznej) na modyfikacje. Wszelkie wprowadzane zmiany modernizacyjne (dodanie osłony kabiny ROPS, zabudowa wyciszająca silnika itp.) Zwiększają wysokość położenia środka ciężkości i istotnie pogarszają stateczność.

Wersja ładowarki SŁ-34 o zwiększonym udźwigu (SŁ-34B) nie powinna być eksploatowana w warunkach terenowych. Jej stateczność poprzeczna w niekorzystnym ustawieniu może spadać do zaledwie 15-17% w przypadku jazdy bez obciążenia. Jest to efektem przesunięcia środka ciężkości maszyny w kierunku tylnego mostu w celu maksymalizacji udźwigu.

Podobną niską minimalną statecznością cechują się ładowarki teleskopowe – ich minimalna stateczność poprzeczna podczas jazdy bez ładunku nie przekracza 28%. Z tego względu, uwzględniając zapas stateczności rzędu 0,1g (ograniczona dynamika ruchów), nie powinny one manewrować na zboczach o pochyleniach przekraczających 18%. Ładunek na osprzęcie widłowym wyraźnie poprawia stateczność poprzeczną, jednak nie powinien być on podnoszony – wskazane jest utrzymywanie jak najniższej wysokości jego położenia.

Przeprowadzone badania modelowe wykazały, że dla maszyn terenowych niezbędne jest wprowadzenie dodatkowych testów, pozwalających określić minimalną stateczność maszyny. Najniekorzystniejszym położeniem dla maszyn o zwiększonym udźwigu, posiadających wahliwy most, jest skierowanie jej w dół nachylenia pod kątem ok. 20° z jednoczesnym wykonaniem pełnego skrętu. Natomiast dla pozostałych maszyn, najniekorzystniejsze jest położenie pełnego skrętu przy zachowaniu równoległości osi wzdłużnej do osi obrotu płyty. Z tego względu statyczne testy stateczności maszyn terenowych wykonywane na płytach wychylnych powinny obejmować:

- ustawienie równoległe do osi płyty, w pozycji do jazdy na wprost oraz wykonanie pełnych skrętów w obydwu kierunkach;
- ustawienie skierowane pod kątem około  $20^\circ$  w dół płyty, w pozycji do jazdy na wprost oraz wykonanie pełnych skrętów w obydwu kierunkach.

Wskazane jest ponadto przeprowadzenie testu z ustawieniem pod kątem około  $40^\circ$  w górę. Testy powinny być wykonane z nominalnym obciążeniem przewidzianym do jazdy terenowej oraz bez niego, dla obydwu stron maszyny, z uwagi na możliwość niesymetrycznego rozkładu mas w płaszczyźnie poprzecznej.

Przeprowadzone testy wykazały ponadto, że w położeniach zbliżonych do najniekorzystniejszych z punktu widzenia stateczności poprzecznej, różnice między pochyleniem utraty kontaktu z podłożem jednego z kół, a utraty stateczności całej maszyny, są nieznaczne i nie przekraczają 2-3%. Można zatem uznać je za porównywalne i używać zamiennie w pracach analitycznych nad kształtowaniem struktury maszyn przegubowych.

## Literatura

- [1] ATPD-230, *Purchase description tractor, wheeled, all wheel drive, with attachments (High Mobility Engineer Excavator)*.
- [2] Dudziński, P., *Theorie der Lenksysteme für industrielle Radfahrzeuge*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2004.
- [3] *Dokumentacja Techniczno-ruchowa. Podręcznik operatora L90D / L120D*. Ref. 4816696695 Volvo CE, Warszawa, 2000.
- [4] *Ładowarka hydrauliczna Ł-34. Instrukcja obsługi*, Kombinat Przemysłowy Huta Stalowa Wola 1987.
- [5] PN-EN 1459, *Safety of industrial trucks. Self propelled variable reach truck. (Wózki jezdniowe, bezpieczeństwo. Wózki jezdniowe napędzane ze zmiennym zasięgiem)*.
- [6] PN-EN 474-3, *Maszyny do robót ziemnych. Bezpieczeństwo. Wymagania dotyczące ładowarek*.
- [7] PN-ISO 5998, *Maszyny do robót ziemnych. Nominalne obciążenie robocze ładowarek gąsienicowych i kołowych*.
- [8] *Sprawozdanie z badań kwalifikacyjnych spycharko-ładowarki SŁ-34B*. HSW S.A. OBR-NM/2417/4/2000.
- [9] *Sprawozdanie z badań: Stateczność handlera TT 3000 HB*, HSW S.A. OBR-NM/1354. Stalowa Wola 2001.