

DĄBROWSKA Agnieszka¹
 ŁOPATKA Marian Janusz²
 MUSZYŃSKI Tomasz³
 RUBIEC Arkadiusz⁴

Badania układu skrętu przegubowej bezzałogowej platformy lądowej

*Bezzałogowa Platforma Lądowa,
 hydrostatyczny układ napędowy,
 podwozie gąsienicowe, wysoka mobilność*

Streszczenie

W referacie przedstawiona została nowatorska konstrukcja zdalnie sterowanej gąsienicowej platformy testowej oraz wyniki badań poligonowych przeprowadzonych w oparciu o tor doświadczalny, znajdujący się na terenie Katedry Budowy Maszyn Wojskowej Akademii Technicznej, mających na celu zweryfikowanie możliwości wykorzystania istniejących analitycznych metod wyznaczania oporów skrętu pojazdów przegubowych do projektowania lekkich przegubowych pojazdów gąsienicowych. Ponadto, przedstawione zostały również dwie autorskie metody szacowania oporów skrętu.

RESEARCH OF STEERING SYSTEM OF UNMANNED ARTICULATED GROUND VEHICLE

Abstract

This paper presents innovative remotely-controlled light unmanned tracked ground vehicle and results of its research. The main purpose of experiments conducted on specially designed test field was to verify application of existing methods estimating steering resistance of articulated vehicles for designing light tracked articulated vehicles. Moreover, in this paper two original methods of estimating steering resistance are described.

1. WSTĘP

Jednym z dominujących kierunków rozwoju uzbrojenia i sprzętu wojskowego jest robotyzacja – wprowadzenie systemów bezzałogowych zdolnych do realizacji różnorodnych zadań operacyjnych bez bezpośredniego zaangażowania ludzi. W przypadku Bezzałogowych Platform Lądowych (BPL) ich podstawowym zadaniem jest zwiększenie dystansu dzielącego żołnierza od zagrożenia.

Wśród rozwijanych koncepcji znajdują się lekkie bezzałogowe platformy lądowe wspierające człowieka w terenie niedostępnym dla klasycznych pojazdów. Specyfika zadań przewidywanych do realizacji przez te platformy stawia bardzo wysokie wymagania zarówno ich układom napędowym jak również układom jezdny.

Z uwagi na postępujący rozwój elementów hydraulicznych, ich niezawodność oraz podatność na sterowanie, coraz częściej we współczesnych maszynach i pojazdach stosowane są hydrostatyczne układy napędowe.

Analizując natomiast układy bieżne pojazdów o wysokiej mobilności terenowej można zauważyć, że znaczna część z nich wyposażona jest w podwozia gąsienicowe, pozwalające na uzyskanie mniejszych nacisków jednostkowych, a tym samym możliwości poruszania się w terenie o mniejszej nośności. Jednakże nadmierna maksymalizacja pola gąsienicy skutkuje większymi oporami skrętu i redukcją przestrzeni wykorzystywanej do umieszczenia elementów układu napędowego oraz ładunkowej. Alternatywą może być konstrukcja składająca się z dwóch członów połączonych sprzęgiem hydraulicznym, którego głównym zadaniem jest wykonanie manewru skrętu za pomocą dwóch siłowników połączonych krzyżowo oraz zapewnienie możliwie maksymalnego dopasowania pojazdu do podłoża.

Jednoczesne spełnienie wymagań trakcyjnych pojazdu dotyczących pokonywania przeszkód terenowych i poruszania się w terenie o niskiej nośności wymaga efektywnie działającego układu przeniesienia napędu. W Katedrze Budowy Maszyn Wojskowej Akademii Technicznej zaproponowano tego typu rozwiązanie, łącząc cechy trakcyjne dwuczłonowego pojazdu ze sprzęgiem hydraulicznym, hydrostatycznego układu napędowego i podwozia wyposażonego w elastomerowe gąsienice w zdalnie sterowanej platformie testowej (tab.1 i rys.1) [1].

¹Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny; 00-908 Warszawa; ul. Gen. S. Kaliskiego 2.
 Tel: + 48 22 683-72-19, Fax: + 48 22 683-72-11, E-mail: adabrowska@wat.edu.pl

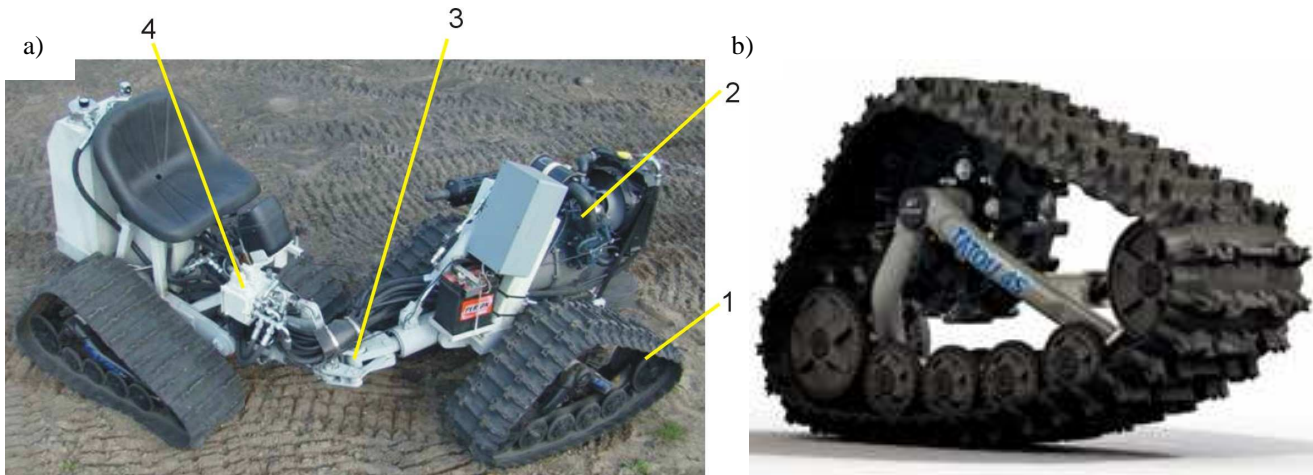
²Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny; 00-908 Warszawa; ul. Gen. S. Kaliskiego 2.
 Tel: + 48 22 683-96-16, Fax: + 48 22 683-72-11, E-mail: mlopatka@wat.edu.pl

³Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny; 00-908 Warszawa; ul. Gen. S. Kaliskiego 2.
 Tel: + 48 22 683-71-07, Fax: + 48 22 683-72-11, E-mail: tmszynski@wat.edu.pl

⁴Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny; 00-908 Warszawa; ul. Gen. S. Kaliskiego 2.
 Tel: + 48 22 683-71-07, Fax: + 48 22 683-72-11, E-mail: arubiec@wat.edu.pl

Tab.1. Podstawowe parametry techniczne gąsienicowej platformy przegubowej [2]

Masa własna	720 kg
Szerokość	1 m
Naciski jednostkowe	50 kPa
Układ bieżny	4 gąsienice
Silnik spalinowy	Wysokoprężny o mocy 9,9 kW
Układ napędowy	Hydrostatyczny
Układ skreću	Przegubowy - hydrauliczny



Rys.1. Gąsienicowa platforma testowa: a) widok poglądowy: 1-gąsienica Comoplast Tatou4S, 2-spalinowy silnik napędowy, 3-sprzęg platformy, 4-dwusekcyjny rozdzielacz hydrauliczny, b) szczegółowy widok zastosowanej gąsienicy

Poprawny dobór elementów układu skreću wymaga znajomości wartości momentu oporów skreću gąsienicowej platformy przegubowej na zróżnicowanych podłożach (przewidywanych w obszarach wykorzystania). Wstępnie założone wartości wymagają weryfikacji na drodze badań eksperymentalnych. Ponadto, na podstawie wyników określono możliwość wykorzystania dostępnych w literaturze metod wyznaczania oporów skreću pojazdów przegubowych.

2. ANALITYCZNA METODA WYZNACZANIA OPORÓW SKREĆU POJAZDÓW PRZEGUBOWYCH

Typowym przykładem pojazdów przegubowych, jakie rozpatruje się w literaturze są ładowarki kołowe. Ponieważ były one przedmiotem szeregu badań wiedza o różnych aspektach ich ruchu jest powszechnie dostępna i w wielu przypadkach opisana zależnościami analitycznymi [3,4,5]. Dotyczy to także wyznaczania wartości oporów występujących w procesie skreću. Nie znaleziono natomiast informacji o sposobie ich szacowania w przypadku zastosowania gąsienicowego układu bieżnego.

W ładowarkach kołowych do szacowania momentu oporów skreću M_{os} stosuje się zależność [3,5]:

$$M_{os} = M_{os1} \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha} + M_{os2} \cdot \frac{\alpha_2}{\alpha} \quad (1)$$

gdzie: M_{os1} – moment oporów skreću przedniej części,
 M_{os2} – moment oporów skreću tylnej części,
 α – kąt pomiędzy osiami części przedniej i tylnej,
 α_1 – kąt odchyłu przedniej części od kierunku jazdy,
 α_2 – kąt odchyłu tylnej części od kierunku jazdy.

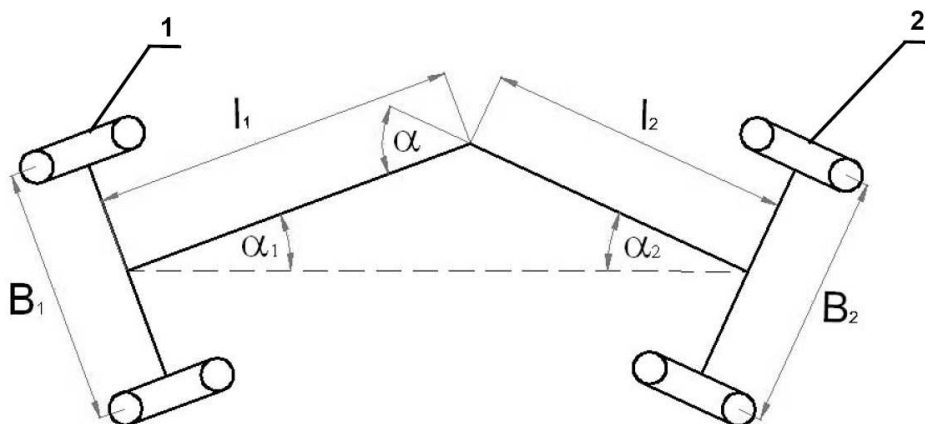
Występujące w niej kąty α_1 i α_2 wyznacza się ze wzorów [3]:

$$\alpha_1 = \arctg\left(\frac{l_2 \cdot \sin \alpha}{l_1 + l_2 \cdot \cos \alpha}\right) \quad (2)$$

$$\alpha_2 = \arctg\left(\frac{l_1 \cdot \sin \alpha}{l_2 + l_1 \cdot \cos \alpha}\right) \quad (3)$$

gdzie: l_1 – odległość osi kół przednich od osi obrotu,
 l_2 – odległość osi kół tylnych od osi obrotu.

Schemat przyjętych charakterystycznych wielkości prezentuje rys.2.



Rys.2. Schemat obliczeniowy oporów skrętu dla pojazdu przegubowego, gdzie: 1 – oś przednia, 2 – oś tylna

Z kolei momenty oporów skrętu członu pierwszego M_{os1} i drugiego M_{os2} obliczane są z zależności [3,5]:

$$M_{os1} = m_1 \cdot g \cdot f \cdot k \frac{B_1}{2} \quad (4)$$

$$M_{os2} = m_2 \cdot g \cdot f \cdot k \frac{B_2}{2} \quad (5)$$

gdzie: m_1 – masa przedniego członu wraz z przednią częścią sprzęgu,
 m_2 – masa tylnego członu wraz z tylną częścią sprzęgu,
 g – przyspieszenie ziemskie,
 f – współczynnik tarcia tocznego przyjęty dla danego podłoża,
 k – współczynnik poślizgu kół i zgarniania gruntu kół członu przedniego,
 B_1 – odległość między środkami kół przednich,
 B_2 – odległość między środkami kół tylnych.

Podczas skrętu muszą zostać pokonane opory przetaczania się kół oraz opory zgarniania gruntu krawędzią boczną koła. W literaturze wartości ujmującego ten efekt współczynnika wahają się w zakresie $k = 1,4 - 2,5$. Ponieważ powierzchnia zgarniająca grunt oraz sztywność boczna w przypadku gąsienicy jest znacznie większa niż w przypadku opon, zasadne jest określenie wartości współczynnika k na drodze badań doświadczalnych.

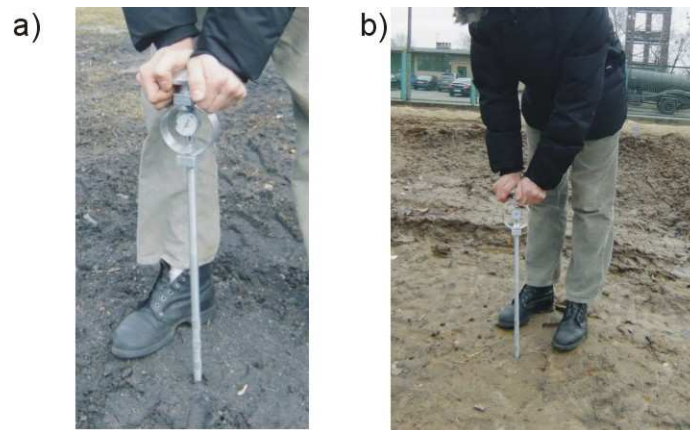
3. BADANIA DOŚWIADCZALNE TESTOWEJ PLATFORMY GĄSIENICOWEJ

Doświadczalne określenie wartości oporów skrętu gąsienicowej platformy przegubowej wymagało przeprowadzenia testów na zróżnicowanym podłożu. Podczas każdej z prób wykonywano dwa skręty członów platformy względem siebie (jeden w prawo, drugi w lewo) od położenia do jazdy na wprost do skrajnego skręcenia. W trakcie badań dokonywano pomiaru wartości ciśnień w siłownikach układu skrętu [2].

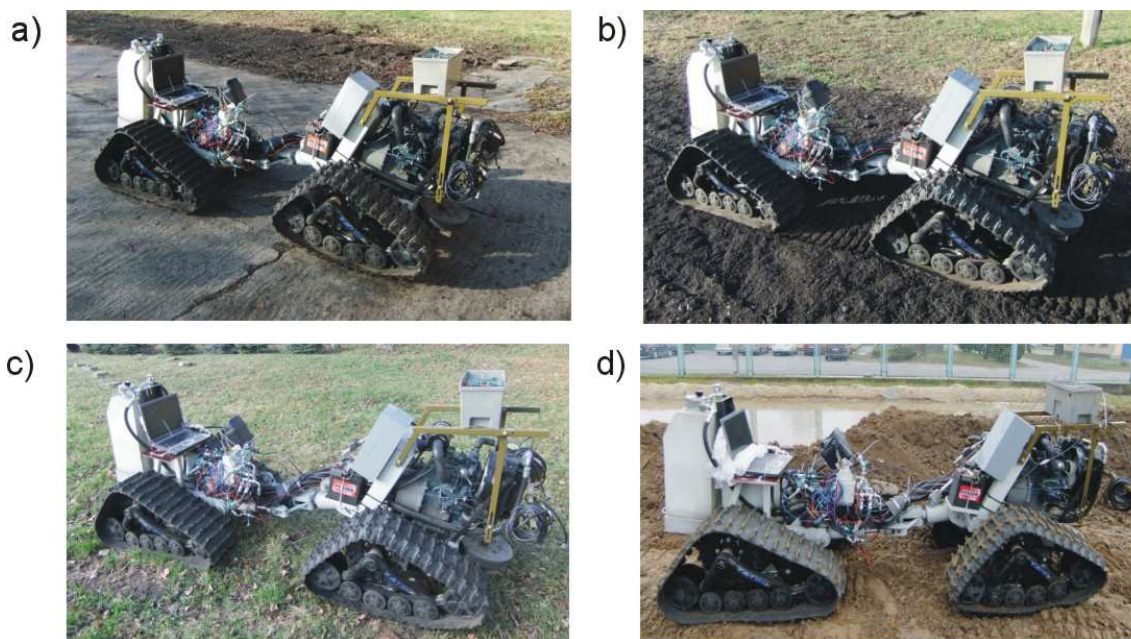
Układ pomiarowy składał się z:

- czujników ciśnienia KOBOLD SEN-8700 o zakresie pomiarowym 0-400 bar i klasie pomiarowej 0,5 umieszczonych na linii zasilającej i zlewowej układu skrętu;
- systemu akwizycji danych IO Tech Personal DAQ 3005;
- komputera typu laptop rejestrującego pomiary.

Próby na różnych podłożach gruntowych oraz betonie zostały przeprowadzone na terenie toru testowego robotów KBM WAT. Badania na podłożach gruntowych poprzedziły badania ich nośności z wykorzystaniem metody CONE INDEX – CI (rys.3). Pomiaru nośności podłoża dokonano za pomocą penetrometru wyposażonego w stożek o polu powierzchni wynoszącym $0,5 \text{ in}^2$. Ostatecznie testy poligonowe przeprowadzone zostały na podłożu betonowym, na gruncie o nośności $CI = 280 \text{ kPa}$, gruncie trawiastym o nośności $CI = 290 \text{ kPa}$ oraz na gruncie o obniżonej nośności wynoszącej $CI = 150 \text{ kPa}$ (rys.4).

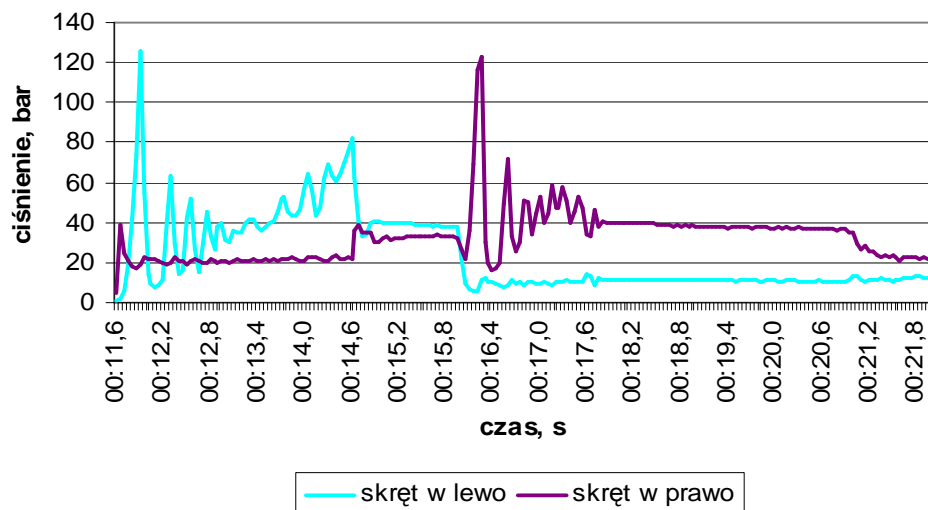


Rys.3. Pomiar nośności podłoża metodą CI przed przystąpieniem do badań właściwych: a) podłoże o nośności 280 kPa, b) podłoże o nośności 150 kPa



Rys.4. Gąsienicowa platforma testowa podczas badań: a) na podłożu betonowym, b) gruncie o nośności CI = 280 kPa, c) gruncie porośniętym trawą o nośności CI = 290 kPa, d) gruncie o nośności CI = 150 kPa

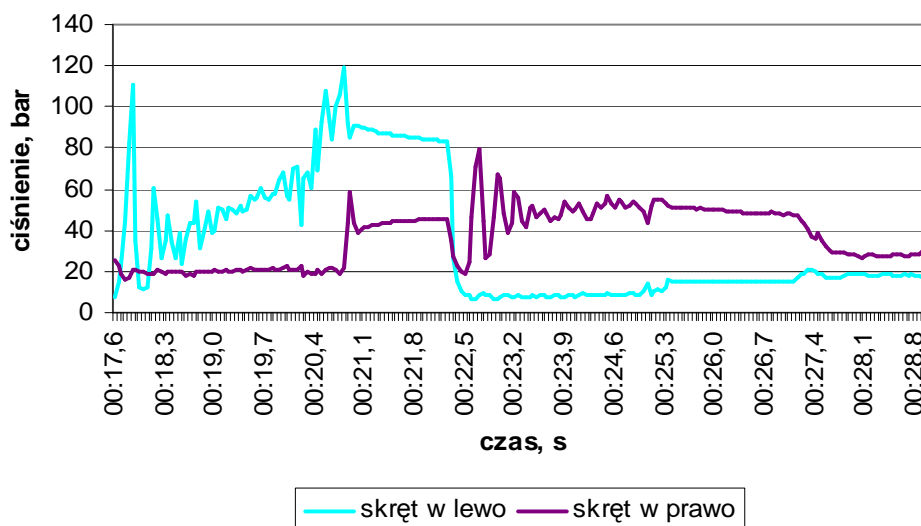
Przebiegi czasowe zmiany wartości ciśnienia w siłownikach skrętu połączonych krzyżowo oraz zmiany wartości siły napędowej F_N podczas próby wykonanej na podłożu betonowym przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Przebiegi czasowe zmiany wartości ciśnienia w siłownikach skrętu podczas próby na podłożu betonowym

Maksymalne szczytowe ciśnienie w układzie skrętu zarejestrowane podczas próby wynosi około 120 bar, przy czym wartość ta występuje tuż po przesterowaniu rozdzielacza hydraulicznego i wynika z dynamiki zaworów w instalacji hydraulicznej, a nie z oporów skrętu. Natomiast średnie ciśnienie panujące w siłownikach układu skrętu oscyluje w granicach 40 do 60 bar, stanowiąc tym samym około 25 % wartości ciśnienia nominalnego wynoszącego 25 MPa. Kinematyka przegubowego układu skrętu powoduje zmniejszanie promienia działania siłowników skrętu wraz z kątem wzajemnego skręcania względem siebie członów platformy. Ciśnienie jednak nie rośnie przy tym znacznie, dzięki czemu można stwierdzić zmniejszanie się oporów skrętu wraz ze wzrostem kąta skręcenia wzajemnego członów platformy.

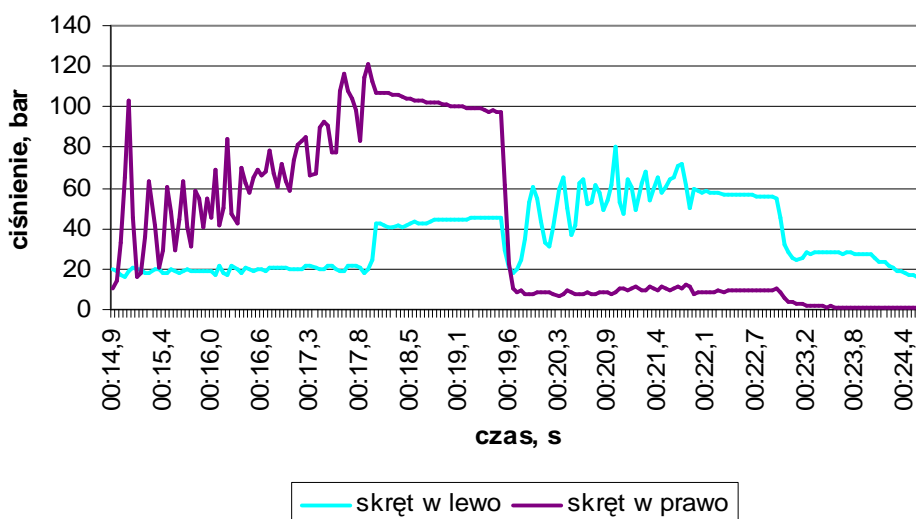
Przebiegi czasowe zmiany wartości ciśnienia w siłownikach skrętu połączonych krzyżowo podczas próby wykonanej na podłożu gruntowym o nośności $CI = 280 \text{ kPa}$ przedstawiono na rysunku 6.



Rys.6. Przebiegi czasowe zmiany wartości ciśnienia w siłownikach skrętu podczas próby wykonywanej na podłożu gruntowym o nośności $CI = 280 \text{ kPa}$

Maksymalna chwilowa wartość ciśnienia w siłownikach skrętu podczas próby skrętu w miejscu na podłożu gruntowym o nośności $CI = 280 \text{ kPa}$, sięga 120 bar. Przy czym wartość ta wystąpiła przy skrajnym wzajemnym skręceniu względem siebie członów przedniego i tylnego. Ciśnienie panujące w układzie podczas wykonywania manewru skrętu utrzymuje się w granicach 50–60 bar, stanowiąc tym samym około 25 % ciśnienia nominalnego w układzie skrętu.

Przebiegi czasowe zmiany wartości ciśnienia w siłownikach skrętu połączonych krzyżowo podczas próby wykonanej na podłożu gruntowym porośniętym trawą o nośności $CI = 290 \text{ kPa}$ przedstawiono na rysunku 7.

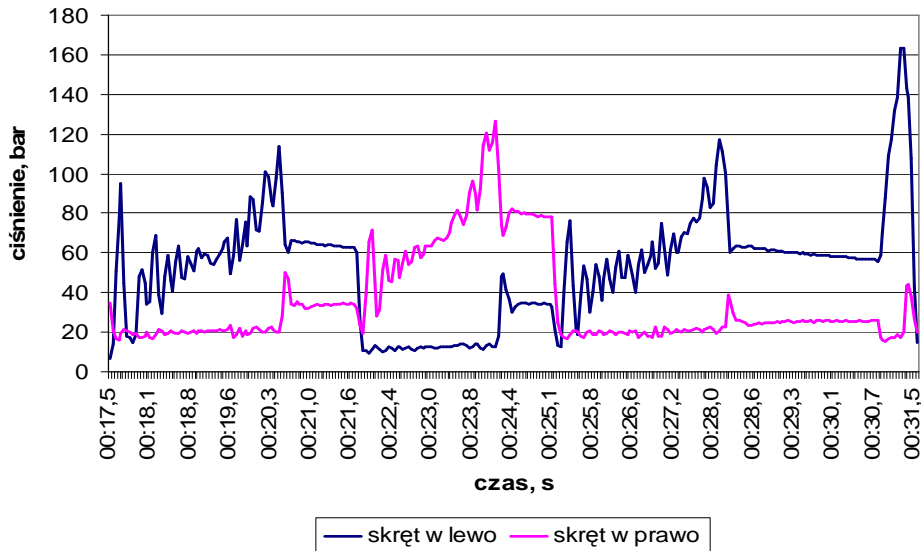


Rys.7. Przebiegi czasowe zmiany wartości ciśnienia w siłownikach skrętu podczas próby wykonywanej na podłożu gruntowym porośniętym trawą o nośności $CI = 290 \text{ kPa}$

Maksymalna chwilowa wartość ciśnienia w siłownikach skrętu podczas próby skrętu w miejscu na podłożu gruntowym porośniętym o nośności $CI = 290 \text{ kPa}$, sięga 120 bar. Przy czym wartość ta wystąpiła przy skrajnym wzajemnym skręceniu względem siebie członów przedniego i tylnego. Ciśnienie panujące w układzie podczas wykonywania manewru skrętu

utrzymuje się na poziomie 60 bar (nie zmieniając się istotnie wraz ze zmianą promienia działania siłowników skrętu), stanowiąc tym samym około 25 % ciśnienia nominalnego.

Ponadto wykonano również próbę na podłożu gruntowym o obniżonej nośności $CI = 150 \text{ kPa}$. Przebiegi czasowe zmiany wartości ciśnienia w siłownikach skrętu połączonych krzyżowo podczas próby wykonanej na gruncie o obniżonej nośności przedstawiono na rysunku 8.



Rys.8. Przebiegi czasowe zmiany wartości ciśnienia w siłownikach skrętu podczas próby wykonywanej na podłożu gruntowym o obniżonej nośności $CI = 150 \text{ kPa}$

Ciśnienie w układzie skrętu zarejestrowane podczas próby wykonywania skrętu w miejscu sięga wartości 80 bar, co jest wartością największą spośród przeprowadzonych prób. Ponadto w odróżnieniu od pozostałych podłoży występuje tu zauważalny wzrost wartości oporów skrętu przy zmianie promienia działania siłowników. Różnica ciśnień pomiędzy skrajnymi wartościami podczas skrętu sięga 40 bar. Niemniej ciśnienie na poziomie 80 bar stanowi 32 % ciśnienia nominalnego instalacji. Wyniki badań umożliwiły przeprowadzenie weryfikacji analitycznych (znanych z literatury) metod wyznaczania oporów skrętu pojazdów przegubowych.

4. WERYFIKACJA ANALITYCZNEJ METODY WYZNACZANIA OPORÓW SKRĘTU DLA PRZEGUBOWEJ GĄSIENICOWEJ PLATFORMY TESTOWEJ

Do analitycznego wyznaczenia oporów skrętu przegubowej gąsienicowej platformy testowej przyjęto następujące wartości podstawowych parametrów:

- $m_1 = 400 \text{ kg}$,
- $m_2 = 400 \text{ kg}$,
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$,
- $B1 = 0,725 \text{ m}$,
- $B2 = 0,710 \text{ m}$.

Maksymalny kat skrętu ramy dla tego pojazdu wynosi 70° . Wartości kątów odchylenia przedniej i tylnej części pojazdu wyznaczono zgodnie z zależnościami (2) i (3).

Zmierzony doświadczalnie współczynnik oporów własnych układu bieżnego wyniósł $f_{wt} = 0,14$. Przyjęto, że opory toczenia dla podłoża betonowego zostaną powiększone o $f_{gr} = 0,02$, dla gruntowego o $f_{gr} = 0,05$, a dla gruntowego luźnego o $f_{gr} = 0,1$.

Obliczenia przeprowadzono dla dwóch skrajnych wartości współczynnika k , tzn. dla $k = 1,4$ oraz $k = 2,5$. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Tab.2. Zestawienie teoretycznych wartości oporów skrętu przegubowej gąsienicowej platformy testowej

Parametr	Podłoże betonowe		Podłoże gruntowe		Podłoże gruntowe - luźne	
	1,4	2,5	1,4	2,5	1,4	2,5
$k_1 = k_2$	1,4	2,5	1,4	2,5	1,4	2,5
$\alpha_1 [^\circ]$	27,2		27,2		27,2	
$\alpha_2 [^\circ]$	42,8		42,8		42,8	
$f = f_{wt} + f_{gr}$	0,14 + 0,02		0,14 + 0,05		0,14 + 0,10	
$M_{os1} [Nm]$	124	221	147	262	186	332
$M_{os2} [Nm]$	191	341	227	405	286	511
$M_{os} [Nm]$	315	562	374	667	472	843

Analizując przebiegi uzyskane podczas badań eksperymentalnych można stwierdzić, że maksymalna różnica ciśnienia pomiędzy komorami czynnymi i biernymi siłowników układu skrętu wynosi na podłożu betonowym $\Delta p = 5$ MPa (rys.5), a na podłożu gruntowym $\Delta p = 8$ MPa (rys.6, 7 i 8). Ciśnienie efektywne Δp_e , które jest obrazem pokonywanych oporów skrętu, jest od nich niższe o wartość strat własnych instalacji Δp_{str} (straty ciśnienia w siłowniku, złączkach i przewodach). Przyjęto, iż kształtują się one na poziomie $\Delta p_{str} = 1$ MPa (tab.3).

Rozbieżności pomiędzy teoretycznymi i eksperymentalnymi wartościami momentów oporu skrętu zawierają się dla współczynnika $k = 1,4$ w przedziale 4,43–6,54, a dla $k = 2,5$ – w przedziale 2,48–3,66 (tab.3). W drugim przypadku błąd jest mniejszy, lecz i tak wyniki analityczne nieakceptowanie odbiegają od rzeczywistych.

Tab.3. Zestawienie eksperymentalnych wartości oporów skrętu przegubowej gaśienicowej platformy testowej

Parametr	Podłoże betonowe		Podłoże gruntowe		Podłoże gruntowe - luźne	
$\Delta p_e = \Delta p - \Delta p_{str} [MPa]$	4		7		7	
$M_{os\ e} [Nm]$	1395		2442		2442	
$k_{11} = k_{21}$	1,4	2,5	1,4	2,5	1,4	2,5
$M_{os\ e} / M_{os}$	4,43	2,48	6,54	3,66	5,17	2,90

Ponieważ metoda szacowania oporów skrętu wykorzystywana dla ładówek kołowych nie dała zadowalających wyników w przypadku podwozia gaśienicowego, podjęto próbę opracowania zależności lepiej odwzorowujących rzeczywistość.

5. AUTORSKIE METODY SZACOWANIA OPORÓW SKRĘTU

Pierwsze podejście polega na wprowadzeniu dodatkowych współczynników poprawkowych k_{11} i k_{21} do zależności (4) i (5). Ich ideą było uwzględnienie różnicy powierzchni styku jaka daje opona oraz gaśienica. Wyznaczamy je z zależności:

$$k_{11} = \frac{L_{pG}}{B_{pG}} \quad (6)$$

$$k_{21} = \frac{L_{tG}}{B_{tG}} \quad (7)$$

gdzie: L_{pG} – długość styku gaśienicy przedniej z podłożem,
 L_{tG} – długość styku gaśienicy tylnej z podłożem,
 B_{pG} – szerokość gaśienicy przedniej,
 B_{tG} – szerokość gaśienicy tylnej.

Należy zaznaczyć, że długość styku gaśienicy z podłożem, może się zmieniać w zależności od jej konstrukcji i podatności gruntu. Dla gaśienicowej platformy testowej wartości tych współczynników przedstawiono w tabeli 4.

W zmodyfikowanej formie równania na wyznaczenie oporów skrętu przedniego i tylnego członu prezentują się następująco [2]:

$$M_{os1}^* = m_1 \cdot g \cdot f \cdot k \cdot \frac{B_1}{2} \cdot k_{11} \quad (8)$$

$$M_{os2}^* = m_2 \cdot g \cdot f \cdot k \cdot \frac{B_2}{2} \cdot k_{21} \quad (9)$$

Tab.4. Wartości współczynników poprawkowych do teoretycznej metody wyznaczania momentów oporów skrętu

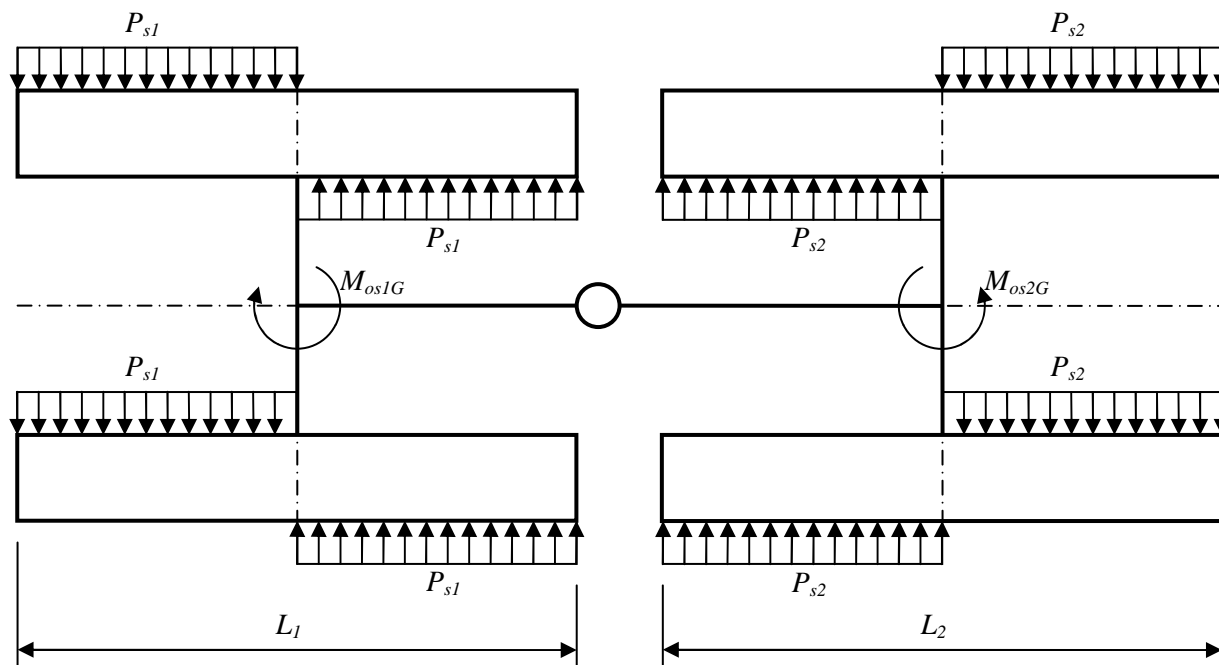
Parametr	Podłoże betonowe	Podłoże gruntowe	Podłoże gruntowe - luźne
$B_{pG} [mm]$	285		
$B_{tG} [mm]$	310		
$L_{pG} [mm]$	141	424	728
$L_{tG} [mm]$	423	423	823
k_{11}	0,49	1,49	2,55
k_{21}	1,36	1,36	2,65

Wyznaczone w oparciu o powyższe współczynniki wartości momentu oporów skrętu M_{os}^* zawiera tabela 5. Niezgodności wynoszą teraz dla współczynnika $k = 1,4$ od 1,98 do 4,34, a dla $k = 2,5$ zawierają się w zakresie 1,11–2,43. Uzyskano więc poprawę w każdym przedziale, lecz tylko dla luźnego podłoża gruntowego wynik teoretyczny jest zadowalająco zbliżony do doświadczalnego.

Tab.5. Zestawienie wartości oporów skrętu przegubowej gąsienicowej platformy testowej

Parametr	Podłoże betonowe		Podłoże gruntowe		Podłoże gruntowe - luźne	
	$M_{os}^* [Nm]$	321	574	528	943	1234
M_{os_e} / M_{os}^*	4,34	2,43	4,63	2,59	1,98	1,11

Druga z zaproponowanych metod polega na potraktowaniu każdego członu jak pojazdu gąsienicowego skręcającego w miejscu, których opory są sumowane. Schematyczne ujęcie tej metody przedstawia rysunek 9.



Rys.9. Schemat obrazujący autorską ideę przejętą do wyznaczania oporów skrętu przegubowej platformy testowej

Zależność na wyznaczenie sumarycznych oporów skrętu ma postać:

$$M_{osG} = M_{os1G} + M_{os2G} \quad (10)$$

gdzie: M_{os1G} – momenty oporów skrętu członu pierwszego,
 M_{os2G} – momenty oporów skrętu członu drugiego.

Wartość oporów na każdym z członów liczymy z równań [2]:

$$M_{os1G} = \frac{1}{4} m_1 \cdot g \cdot \varphi_1 \cdot L_1 \cdot k_1 \quad (11)$$

$$M_{os2G} = \frac{1}{4} m_2 \cdot g \cdot \varphi_2 \cdot L_2 \cdot k_2 \quad (12)$$

gdzie: φ_1 – współczynnik przyczepności dla członu pierwszego,
 φ_2 – współczynnik przyczepności dla członu tylnego,
 L_1 – długość styku gąsienicy pierwszego członu z podłożem,
 L_2 – długość styku gąsienicy tylnego członu z podłożem,
 k_1 – współczynnik poślizgu i zgarniania gruntu gąsienicą członu przedniego,
 k_2 – współczynnik poślizgu i zgarniania gruntu gąsienicą członu tylnego.

Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 6. Rozbieżność pomiędzy wartościami teoretycznymi i rzeczywistymi zawiera się w przedziale 0,97–1,36. Przy czym podobnie jak w metodzie pierwszej, najwierniej odtwarzane są opory dla luźnych podłoży gruntowych.

Tab.6. Zestawienie teoretycznych wartości oporów skrętu przegubowej gąsienicowej platformy testowej

Parametr	Podłoże betonowe	Podłoże gruntowe	Podłoże gruntowe - luźne
$k_1 = k_2$	2,5	2,5	2,5
φ	0,8	0,85	0,6
M_{os1G} [Nm]	282	901	1183
M_{os2G} [Nm]	846	898	1117
M_{osG} [Nm]	1128	1800	2520
$M_{os e} / M_{osG}$	1,24	1,36	0,97

6. WNIOSKI

Największe wartości ciśnienia w siłownikach układu skrętu zarejestrowano w przypadku wykonywania manewrów na podmokłym podłożu gruntowym o niskiej nośności. Wartość ciśnienia szczytowego uzyskanego w trakcie pomiarów stanowiła około 65 % ciśnienia nominalnego, co świadczy o zbyt dużej założonej wartości oporów skrętu na etapie projektu oraz co jest z tym związane przewymiarowaniu konstrukcji platformy.

Przeprowadzone analizy wykazały, że dostępne w literaturze zależności na wyznaczenie oporów skrętu pojazdów przegubowych nie dają wyników adekwatnych do tych uzyskiwanych w badaniach eksperymentalnych. W przypadku gąsienicowych układów bieżnych wartości teoretyczne były zaniżone w stosunku do rzeczywistości a różnice sięgały nawet 150–400 %. Uzyskane wyniki świadczą o tym, że literaturowy współczynnik poślizgu i zgarniania gruntu kołem $k = 2,5$ jest zbyt niski.

Zaproponowane przez autorów dwie metody szacowania oporów skrętu pozwoliły istotnie zredukować te błędy. W pierwszej z nich błąd dla podłoża twardych sięgał 140 %–160 %, a dla miękkich tylko 11 %. W drugiej propozycji było to odpowiednio 24 %–36 % oraz 3 %.

Opracowane na podstawie badań doświadczalnych metody szacowania wartości oporów skrętu przegubowych platform gąsienicowych mogą być w przyszłości wykorzystywane do dokładniejszego projektowania tego typu układów.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Dąbrowska A., Łopatka M.J., Rubiec A.: *Badania hydrostatycznego układu napędu jazdy lekkiej bezząłogowej platformy lądowej*, XXV Konferencja Naukowa Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych, Zakopane 2012.
- [2] Sprawozdanie z projektu badawczego nr ON502001234/PBG *Kształtowanie struktur układów zawieszenia i jazdy lekkich bezząłogowych platform lądowych ekstremalnej mobilności*, WAT, Warszawa 2011.
- [3] Brach J., Tyro G.: *Maszyny ciągnikowe do robót ziemnych*, Warszawa, WNT 1986.
- [4] Prochowski L.: *Teoria ruchu i dynamika pojazdów mechanicznych, cz.1 i 3*, Warszawa, WAT 1998.
- [5] Pieczonka K.: *Analityczne metody wyznaczania podstawowych wielkości konstrukcyjnych i eksploatacyjnych samojezdnych maszyn przegubowych*, Wrocław, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej 1976.