

Lech Jakliński
Instytut Inżynierii Mechanicznej
Politechnika Warszawska w Płocku

BADANIA PARAMETRÓW WSPÓŁPRACY OPONY Z GLEBĄ Z UWZGLĘDNIENIEM ZMIAN CIŚNIENIA POWIETRZA W OPONIE

Streszczenie

Przedstawiono zaprojektowaną i wykonaną nową aparaturę pomiarowo-rejestrującą, służącą do pomiaru kątów współpracy opony z glebą (α_o , β_o) oraz zmian ciśnienia powietrza w oponie w trakcie badań polowych. Badania przeprowadzono w 2004 r. w Federalnym Instytucie Techniki Rolniczej (FAL) w Braunschweigu (Niemcy).

Słowa kluczowe: interakcja opona-gleba, pomiar, ciśnienie w oponie, opis matematyczny, badania polowe

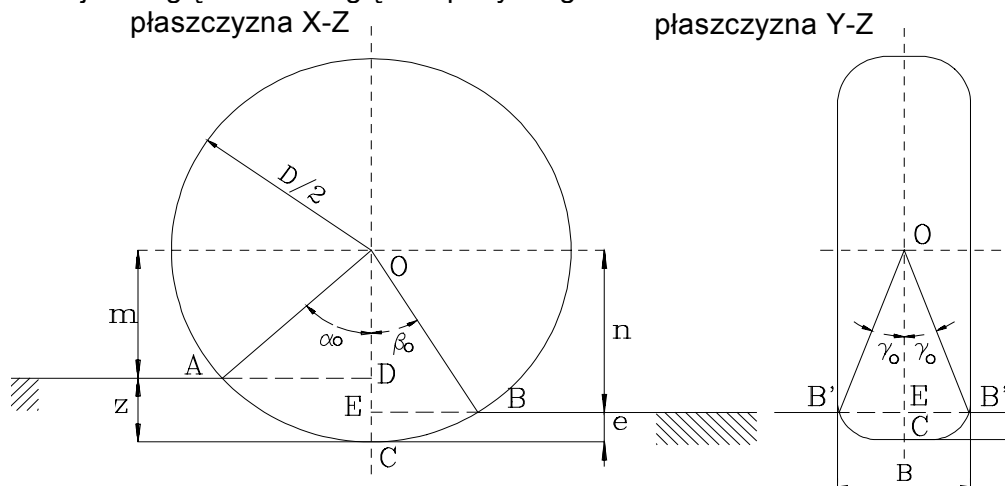
Oznaczenia

- k_1, k_4 – współczynniki charakteryzujące parametry gleby oraz parametry konstrukcyjne i eksploatacyjne badanej opony
 P_u – siła uciągu
 G – obciążenie opony
 $\alpha_o, \beta_o, \gamma_o$ – kąty współpracy opony z glebą
 B – szerokość opony
 D – średnica opony
 z – zagłębienie opony w glebie (głębokość koleiny)
 e – ugięcie opony na glebie
 K_1 – współczynnik opisujący wymiary opony
 K_2 – współczynnik opisujący odkształcenie gleby i opony
 h_i – głębokość rozpatrywanej warstwy gleby

Modele matematyczne rozkładu nacisków opony na glebę

Parametry charakteryzujące współpracę opony z glebą przedstawiono na rysunku 1. Model matematyczny (1) i (2), opisujący wielkość nacisków jednostkowych na styku opony z glebą [Jakliński 1999], wykorzystuje uzyskane w trakcie badań polowych wartości kątów współpracy opony z glebą oraz

wielkości charakteryzujące oddziaływanie opony na podłoże [Jakliński 2003],
takie jak: zagłębienie z i ugięcie opony na glebie e .



Rys. 1. Parametry charakteryzujące współpracę opony z glebą
Fig. 1. Parameters characterizing the tyre-soil interaction

$$\sigma = \frac{\int_0^{\alpha_0 - \alpha} \sqrt{P_u^2 + \frac{G^2}{(k_1 \sin \alpha + \cos \alpha)^2}} - 2 \cdot P_u \cdot \frac{G \cdot \sin \alpha}{k_1 \sin \alpha + \cos \alpha} d\alpha}{k_4 \cdot [\operatorname{tg}(\alpha_0 - \alpha) + \operatorname{tg}(\beta_0 - \beta)] \operatorname{tg}(\gamma_0 - \gamma) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right)} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{\int_0^{\beta_0 - \beta} \sqrt{P_u^2 + \frac{G^2}{(k_2 \sin \beta + \cos \beta)^2}} + 2 \cdot P_u \cdot \frac{G \cdot \sin \beta}{k_2 \sin \beta + \cos \beta} d\beta}{k_4 \cdot [\operatorname{tg}(\alpha_0 - \alpha) + \operatorname{tg}(\beta_0 - \beta)] \operatorname{tg}(\gamma_0 - \gamma) \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right)} \quad (2)$$

$$\gamma_0 = a \sin \left[\frac{B}{2 \cdot \sqrt{\frac{B^2}{4} + \left(\frac{D}{2} - z - e\right)^2}} \right] \quad k_1 = \frac{D - 2 \cdot e}{2 \cdot \sqrt{D \cdot e - e^2}} \quad k_4 = \left(\frac{D}{2} - z - e\right)^2 \cdot \frac{\pi}{2}$$

Rozprzestrzenianie się nacisków w głąb ośrodka glebowego opisuje równanie (3) [Stasiak 2003].

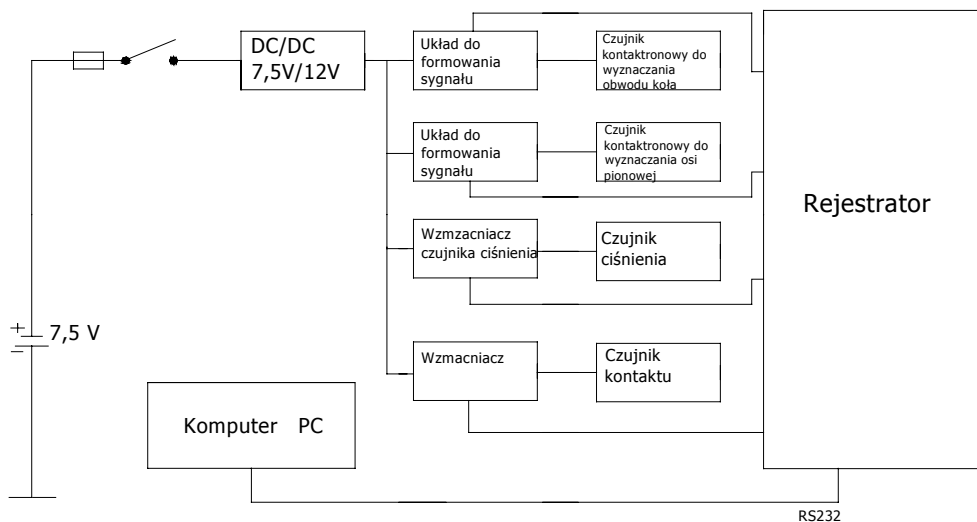
$$\sigma(h_i) = \frac{G}{k_4 \cdot \operatorname{tg}(\gamma) \cdot (\operatorname{tg}(\alpha) + \operatorname{tg}(\beta))} \cdot K_1 \cdot \exp(-K_2 \cdot h_i) \quad (3)$$

$$K_1 = \frac{D}{B} - 1, \quad k_4 = \left(\frac{D}{2} - z - e \right)^2 \cdot \frac{\pi}{2}, \quad K_2 = \frac{z}{e \cdot \sqrt{k_4}}$$

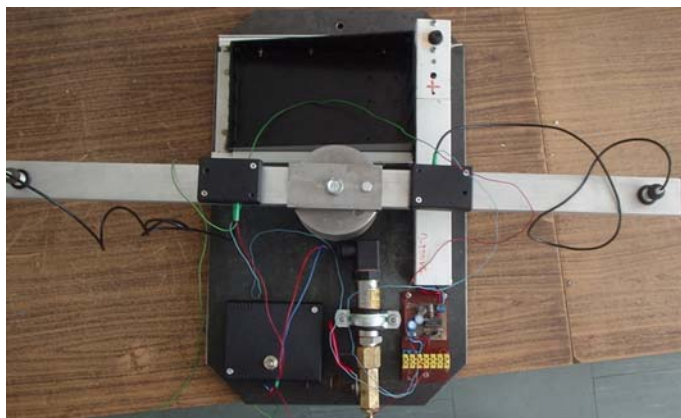
Opis aparatury badawczej

Schemat blokowy układu pomiarowego służącego do pomiaru i rejestracji kątów współpracy opony z glebą (α , β) w całym zakresie jej kontaktu z podłożem oraz pomiaru zmian ciśnienia powietrza w oponie, w trakcie badań polowych przedstawiono na rysunku 2. Poszczególne elementy systemu pomiarowo-rejestrującego umieszczono na metalowej płycie (rys. 3).

Układ pomiarowy zasilany jest z baterii 7,5 V za pomocą przetwornicy DC/DC 7,5/12 V. Sygnały wyjściowe są przekazywane do rejestratora, który po zakończonych pomiarach jest wyjmowany z układu i podłączany do komputera, gdzie są zbierane dane i tworzone wykresy.



Rys. 2. Schemat blokowy układu pomiarowego umieszczonego na płycie wirującej
 Fig. 2. Block diagram of measuring system installed on rotary plate



Rys. 3. Widok aparatury pomiarowo–nadawczej zamocowany na płycie
Fig. 3. View of measuring-sending apparatus mounted on the plate
Płyta układu pomiarowego przymocowana jest na kole napędowym urządzenia badawczego, umożliwiającą badania w warunkach polowych. Widok jednostki napędowej wraz z urządzeniem pomiarowym przedstawia rysunek 4 (FAL, Niemcy).



Rys. 4. Widok jednostki napędowej wraz z urządzeniem pomiarowym [Jakliński 2004]
Fig. 4. View of a driving unit with measuring apparatus

Pomiar ciśnienia powietrza w oponie w trakcie przejazdu

Do pomiaru ciśnienia powietrza w oponie [Jakliński 2004] użyto przetwornika ciśnienia firmy Simex typu PC-50 (rys. 5), którego maksymalne ciśnienie wynosi 2,5 bara. Elementem pomiarowym jest piezorezystancyjny czujnik krzemowy. Czujnik daje napięcie wyjściowe proporcjonalne do ciśnienia atmosferycznego i jest układem różnicowym z kompensacją temperatury. Sy-

gnał z przetwornika ciśnienia podawany jest na wzmacniacz pomiarowy i na moduł nadawczy transmisji radiowej.



Rys. 5. Widok przetwornika ciśnienia
Fig. 5. View of the pressure transducer

Wyniki badań polowych i obliczeń składowych nacisku

Badania przeprowadzone zostały na jesieni 2004 r. w Federalnym Instytucie Techniki Rolniczej (FAL) w Braunschweigu w Niemczech w ramach międzynarodowej współpracy Instytutu Inżynierii Mechanicznej Politechniki Warszawskiej w Płocku z wymienionym ośrodkiem naukowo-badawczym (FAL). W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów kątów współpracy opony z glebą (α , β , γ). Obliczenia wg tych modeli odnoszą się do stanu naprężenia na głębokości dna koleiny przy różnych obciążeniach i ciśnieniach napompowania opony powietrzem.

Tabela 1. Wyniki pomiaru kątów oraz obliczeń składowych stanu naprężenia
Table 1. Measuring results of the angles and calculations of the stress state components

Czas pomiaru (przejazdu) ms			Czas kontaktu czujnika z glebą (ms)		Czas pełnego obrotu	Czas półobrotu koła	c. alfa +beta	c. alfa	c. beta	Gamma oblicz.
Nr	Start	Stop	Start	Stop	ms	ms	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)
1	77	492	245	313	415	296	58,99	39,04	19,95	25,84
2	492	896	654	720	404	695	58,81	36,53	22,28	26,12
3	896	1302	1058	1134	466	1103	58,71	34,76	23,95	25,95
Średnie wartości kątów								36,78	22,06	25,97

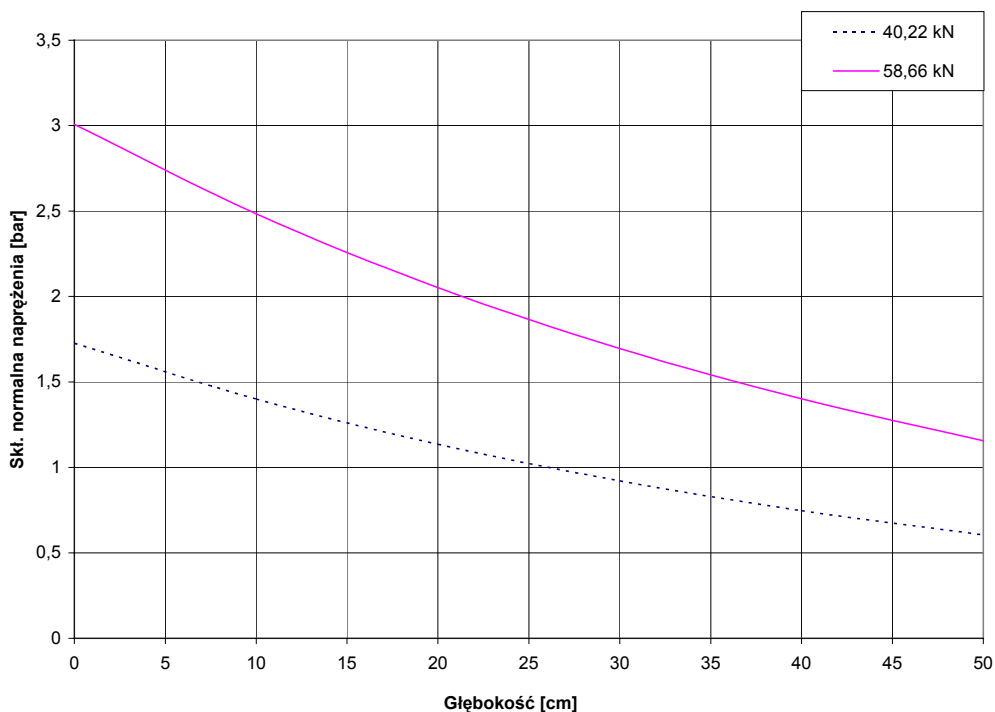
W tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczeń składowych σ , τ i $\sigma(h_i)$ na styku opony z podłożem zgodnie z przedstawionymi na wstępie modelami matematycznymi (1), (2), (3). Zagłębienie opony w glebie z (głębokość koleiny) określono jako wartość średnią z dziesięciu pomiarów równą $z = 11,5$ cm.

Tabela 2. Wyniki obliczeń składowych nacisków
Table 2. Calculation results of pressure components

P_u	Model (1, 2)		Model (3)		
	σ	τ	$\sigma(h_i)$ bar		
N	bar	bar	z = 11,5 cm	z = 20 cm	z = 30 cm
22803	1,311	0,720	1,356	1,135	0,920
21699	1,338	0,698			
20595	1,370	0,678			

W tabeli 1 przedstawiono pomiary kątów zarejestrowane w trakcie przejazdu dla obciążenia $G = 40,22$ kN, ciśnienia powietrza w oponie rysunkach = 1,0 bara i poślizgu $s = 10\%$. Podane w tabeli 2 wartości siły uciągu P_u są wielkościami pomiarowymi uzyskanymi trakcie badań polowych przy poślizgu $s = 10\%$. Otrzymane wartości siły uciągu zmieszczono po odpowiednich przeliczeniach.

Rysunek 6 przedstawia przebieg charakterystyki trakcyjnej [Sommer i in. 2003] badanego mechanizmu jezdnych w warunkach polowych z uwzględnieniem przebiegu siły uciągu P_u niezbędnej do obliczenia składowych stanu naprężenia: $\sigma(\alpha)$ i $\tau(\alpha)$. Wyniki obliczeń rozprzestrzeniania się nacisków w głąb ośrodka glebowego przedstawiono dla dwóch wartości obciążenia zewnętrznego opony: $G = 40,22$ kN i $G = 58,66$ kN, przy różnych ciśnieniach jej napompowania (1,0 bar i 2,2 bara).



Rys. 6. Przebieg zmian rozprzestrzeniania się składowej normalnej stanu naprężenia w głąb gleby

Fig. 6. Traction characteristics of the tested tyre

W tabeli 3 przedstawiono pomiary kątów zarejestrowane w trakcie przejazdu dla obciążenia $G = 58,66$ kN, ciśnienia powietrza w oponie $p = 2,2$ bara i poślizgu $s = 10\%$. Wyniki obliczeń wg modeli (1), (2) i (3) przedstawiono w tabeli 4. Zagłębienie opony w glebie z (głębokość koleiny) określono jako wartość średnią z dziesięciu pomiarów, jako równą $z = 13,5$ cm.

Tabela 3. Wyniki pomiaru kątów oraz obliczeń składowych stanu naprężenia

Table 3. Measuring results of the angles and calculations of stress state components

Czas pomiaru (przejazdu) ms			Czas kontaktu czujnika z glebą ms		Czas pełnego obrotu	Czas półobrotu koła	c. alfa +beta	c. alfa	c. beta	Gamma Oblicz.
Nr	Start	Stop	Start	Stop			deg	deg	deg	deg
1	31	431	191	255	400	239	57,60	38,70	18,90	25,14
2	431	829	586	653	398	630	60,60	39,80	20,80	26,03
3	829	1233	990	1057	404	1032	59,70	37,43	22,27	25,68
Średnie wartości kątów								38,78	20,66	25,62

Tabela 4. Wyniki obliczeń składowych nacisków
 Table 4. Results of pressure components' calculations

P_u	Model (1, 2)		Model (3)		
	σ	τ	$\sigma(h_i)$ bar		
N	bar)	bar	z = 13,5 cm	z = 20 cm	z = 30 cm
31261	2,121	1,094	2,439	2,214	1,909
26480	2,328	1,010			
23906	2,496	0,974			

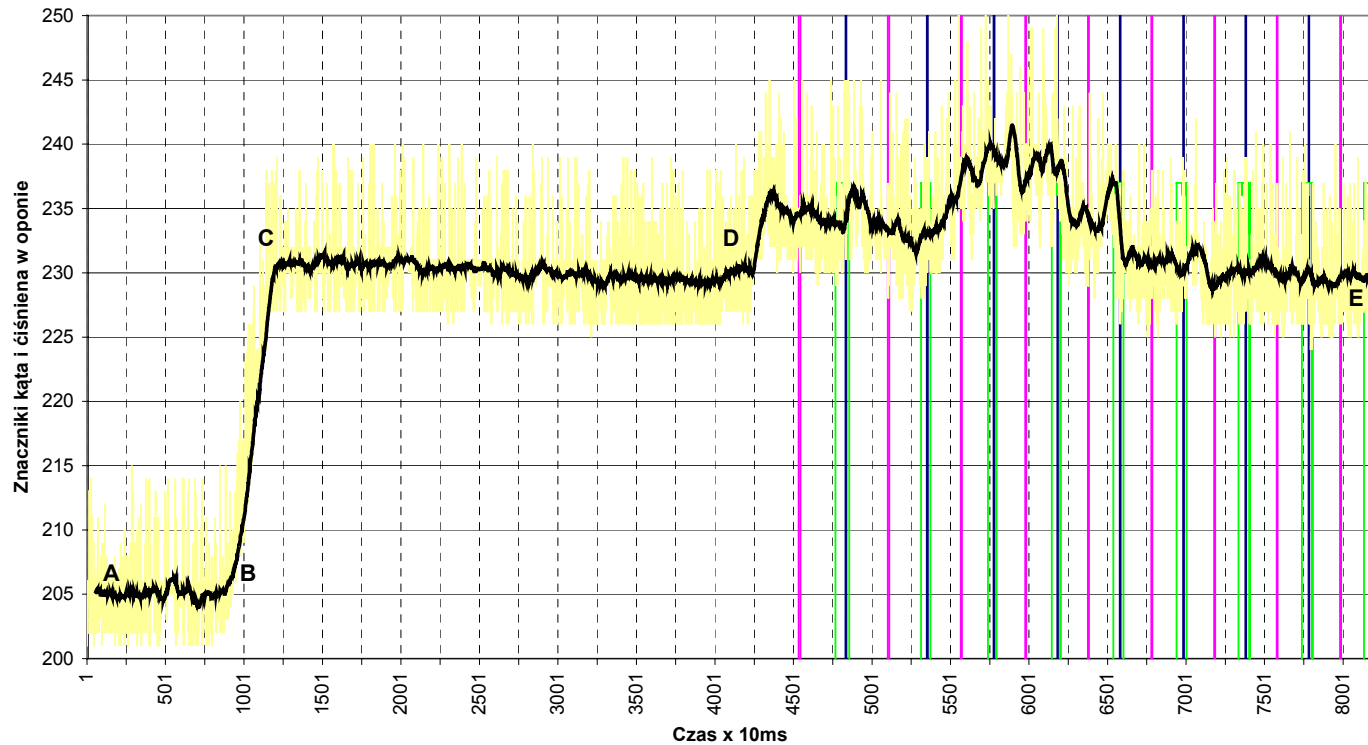
Przedstawione w tabelach 1, 2, 3, 4 wyniki pomiarów i obliczeń przy różnych parametrach badań, obciążenia i ciśnienia powietrza w oponie miały na celu zobrazowanie przebiegu zarejestrowanych wielkości w całym zakresie pomiarowym przy uwzględnieniu różnych wartości obciążenia i ciśnienia powietrza w oponie, jakie można uzyskać przy wykorzystaniu urządzenia badawczego (rys. 4) oraz minimalnego ciśnienia powietrza napompowania opony, ze względu na jej dopuszczalne maksymalne ugięcie.

Wyniki te stanowią wytyczne do szczegółowego określenia parametrów badań, które prowadzone będą w 2006 r. w (FAL) w Braunschweigu (Niemcy) w ramach międzynarodowego programu badawczego.

Pomiar zmian ciśnienia powietrza w oponie w trakcie przejazdu

Rysunek 7 przedstawia wykres zarejestrowanych znaczników kątów współpracy opony z glebą oraz przebieg zmian ciśnienia powietrza w oponie w trakcie przejazdu w funkcji czasu. Znaczniki te są to zarejestrowane zmiany mierzonych wielkości (kąta współpracy opony z glebą α , β i zmian ciśnienia powietrza w oponie) w określonym punkcie kontaktu opony z glebą w funkcji czasu. Naliczane są one od momentu wejścia opony w glebę (tj. od miejsca zainstalowania na oponie czujnika kontaktu) do momentu wyjścia opony z gleby.

Test polowy 8 (poślizg 10%, G=58,66KN, Po=2,2bar)



Rys. 7. Pomiar zmian ciśnienia powietrza w oponie w trakcie przejazdu. Odcinek A-B odnosi się do ciśnienia powietrza w oponie w stanie swobodnym (nieobciążonym), B-C - opona jest opuszczana na ziemię, C-D - opona stoi na glebie, obciążona ciężarem zewnętrznym, D-E - przebieg zarejestrowanych zmian ciśnienia powietrza w oponie w trakcie przejazdu

Fig. 7. The changes in distribution of normal stress component deep in the soil

Wykres A-E uzyskany został w wyniku zastosowania filtrującego programu komputerowego i przedstawia zmianę ciśnienia powietrza w oponie, funkcji czasu w różnych jej stanach obciążenia. Filtracji podane zostały zakłócenia wynikające z drgań całej maszyny badawczej wywołanych pracą hydraulicznego silnika napędowego urządzenia pomiarowego (rys. 4).

Na odcinku C-D widoczne są zmiany ciśnienia w oponie wynikające ze zmian struktury i właściwości gleby w trakcie przejazdu na odcinku pomiarowym. Zmiany te są odzwierciedleniem niejednorodności gleby oraz zmienności jej parametrów.

Podsumowanie

Z pomiarów i obliczeń wynika, że wraz ze wzrostem obciążenia wzrastają wartości składowych stanu naprężenia σ i τ na styku opony z glebą (tab. 2, 4). Zaobserwowano ponadto wpływ siły uciążu P_u na wielkość tych składowych, obliczonych zgodnie z modelem (1) i (2).

Odnosnie pomiaru ciśnienia powietrza w oponie w trakcie przejazdu, obserwujemy jego wzrost (rys. 7) w poszczególnych cyklach, od momentu kiedy opona jest nieobciążona, aż do momentu przejazdu po glebie w stanie obciążonym. W związku z tym, możliwe jest określenie w czasie rzeczywistym bezpośredniej korelacji pomiędzy zmianami ciśnienia powietrza w oponie w trakcie przejazdu a naciskami wywieranymi na podłoże przez oponę.

Problemem naukowym do rozwiązania jest opisanie równaniem matematycznym zmian nacisków jednostkowych, wywieranych przez oponę na glebę w funkcji zmian ciśnienia powietrza, w trakcie jej współpracy z podłożem oraz znalezienie korelacji pomiędzy współczynnikami równania a zmiennymi parametrami podłoża przy uwzględnieniu parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych badanego mechanizmu jezdnego.

Będzie to stanowić kolejny etap badań i analiz teoretycznych nad zagadnieniem określenia współzależności pomiędzy zmianami ciśnienia powietrza w oponie, a zmianą nacisków jednostkowych wywieranych na glebę przez oponę w trakcie badań polowych.

Bibliografia

Jakliński L. 1999. Modele oddziaływania koła pneumatycznego na glebę. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Prace Naukowe, Mechanika z.175, Warszawa

Jakliński L. 2003. Monitorowanie rozkładu nacisków jednostkowych w badaniach polowych. Technika Rolnicza, Ogrodnicza, Leśna, 1

Jakliński L. 2004. Ciśnienie powietrza w oponie jako czynnik determinujący zmianę nacisków jednostkowych. Technika Rolnicza, Ogrodnicza, Leśna, 1

Sommer C., Lebert M., Jakliński L., Jasiński B. 2003. Bodenschadverdichtung strategien und physikalischen Bodenschutz. Landtechnik, 2

Stasiak W. 2003. Modele propagacji nacisków w glebie generowanych przez oponę. Praca doktorska, Płock

