

## **ANALIZA ODDZIAŁYWANIA KOŁOWYCH MECHANIZMÓW JEZDNYCH NA PODŁOŻE Z ZASTOSOWANIEM METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH**

*W pracy przedstawiono problematykę badań układu pojazd-teren, oraz metody stosowane w badaniach propagacji nacisków w podłożu powstałych w wyniku oddziaływania kołowego mechanizmu jezdnego. Opisano problematykę realizacji badań przy pomocy modelowania cyfrowego i obliczeń metodą elementów skończonych. Zamieszczono przykładowe obliczenia i symulacje dla wybranego przypadku koła wyposażonego w popularną oponę rolniczą.*

### **WSTĘP**

Oddziaływanie mechanizmów jezdnych na podłoże ma bardzo ważne znaczenie ze względów trakcyjnych i eksploatacyjnych. Mechanizmy jezdne maszyn i urządzeń poruszających się po podłożu powinny wywierać jak najmniejsze naciski jednostkowe, a jednocześnie rozwijać maksymalne w danych warunkach siły trakcyjne (siła uciągu  $P_u$ , siła jazdy  $P_j$ ). Osobnym zagadnieniem jest zakres rozprzestrzeniania się nacisków w podłożu, powstałych pod wpływem nacisków powstających w strefie kontaktu układu pojazd-teren.

Pojazdy negatywnie oddziałują na podłoże poprzez mechanizmy jezdne, co wywołuje skutki zarówno zamierzone, jak i uboczne. Do tych drugich należy wpływ parametrów technicznych układów jezdnych w trakcie wykonywania czynności roboczych w procesie transportu, co jest bezpośrednio związane z powstawaniem odkształceń ilościowych i jakościowych, i ma bezpośredni wpływ na jakość powierzchni drogi.

Zauważalna jest tendencja do zwiększania sił trakcyjnych mechanizmów jezdnych ciągników i samobieżnych maszyn transportowych, przy jednoczesnym zmniejszaniu stopnia ugniecenia podłoża (odkształcenia jakościowe). Wzrost nacisku na podłoże wywołuje wzrost wartości siły jazdy, od której bezpośrednio zależy wartość siły uciągu.

Istnieje konieczność wyznaczenia zależności opisujących oddziaływanie mechanizmów jezdnych na podłoże poprzez ustalenie związku tychże z cechami konstrukcyjnymi i eksploatacyjnymi. W literaturze przedmiotu można spotkać liczne prace teoretyczne oraz wyniki badań empirycznych dotyczących opisywanego zagadnienia.

W ostatnim czasie, dzięki dynamicznemu rozwojowi systemów informatycznych pojawiła się możliwość zastosowania nowoczesnych numerycznych technik komputerowych do analizy współpracy układu opona-podłoże. Jedną z najczęściej wykorzystywanych metod w obliczeniach wybranych parametrów współpracy mechanizmów jezdnych z glebą jest MES (Metoda Elementów Skończonych).

### **1. ROZWÓJ METOD BADAŃ ODDZIAŁYWANIA MECHANIZMÓW JEZDNYCH NA PODŁOŻE**

Badania nad oddziaływaniem mechanizmów jezdnych maszyn i urządzeń na podłoże oraz nad opracowaniem modeli opisujących

rozkłady wartości nacisków występujących w gruncie, w wyniku przejazdu kołowego pneumatycznego mechanizmu jezdnego, prowadziło wielu badaczy [1, 3, 4, 8, 15].

Już w 1913 roku niemiecki badacz Berenstein opracował zależność pomiędzy naciskiem na glebę a jej deformacją pionową [3].

W latach dwudziestych ubiegłego wieku prowadzono badania w zakresie oddziaływania na podłoże ciągników, napędzanych silnikami spalinowymi oraz pługów motorowych [12]. Badania przeprowadzane w latach trzydziestych XX wieku miały za zadanie ustalenie procesu ruchu mechanizmu jezdnego po podłożu odkształcalnym.

Rozwój badań w omawianym zakresie nastąpił w latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku. Teoretyczne podstawy współpracy koła z podłożem odkształcalnym opracował amerykański naukowiec polskiego pochodzenia M. Bekker [1]. Duży wkład w rozwój opisywanej dziedziny wiedzy wniosły prace W. Söhnego [16] oraz J. Wonga [18]. W wielu pracach przedstawiano także modele matematyczne, które pozwalały na szacowanie parametrów technicznych współpracy mechanizmów kołowych i gąsienicowych z podłożem [17].

Intensyfikacja badań nastąpiła pod koniec ubiegłego wieku w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku [8, 9, 10]. Dokonano analizy wielkości siły trakcyjnej, poślizgu oraz oporu przetaczania mechanizmów jezdnych.

W ostatnich latach powstawały prace dotyczące skutków ruchu po podłożu, a także wpływu czynników konstrukcyjnych na właściwości trakcyjne koła [8]. Interakcja koła z podłożem ma istotne znaczenie z wielu powodów, do których w pierwszej kolejności należy zaliczyć dążenie do minimalizacji nacisków powierzchniowych.

Dotychczasowe badania oddziaływania koła jezdnego na glebę były realizowane w warunkach laboratoryjnych lub polowych. W obu przypadkach stosowano zestaw specjalistycznych urządzeń badawczych i aparaturę pomiarową – rejestrującą [11].

W warunkach laboratoryjnych analizę naprężeń zachodzących w glebie dokonywano w tzw. kanałach glebowych. Badania te opierały się na symulowaniu ruchu pojazdu, w tym przypadku pojedynczej opony po odcinku gleby usypanej w specjalnie przygotowanym do tego celu kanale. W podłożu tym na ściśle określonych głębokościach pomiarowych były umieszczane czujniki tensometryczne, które współpracowały z elektroniczną aparaturą pomiarową [9]. Zadaniem tak przygotowanego stanowiska laboratoryjnego było rejestrowanie składowych stanu naprężenia w ośrodku glebowym,

zarówno w badaniach statycznych jak i dynamicznych, np. z uwzględnieniem poślizgu koła na podłożu.

Alternatywą dla opisanej metodyki badań jest modelowanie komputerowe poprzez zastosowanie obliczeń numerycznych z wykorzystaniem MES.

## 2. ODDZIAŁYWANIE MECHANIZMÓW JEZDNYCH NA PODŁOŻE

Przemieszczający się pojazd przenosi poprzez mechanizm jezdny obciążenia, które powodują powstanie w podłożu stanu naprężeń oraz odkształcenia. Odkształcenie gleby można rozpatrywać jako pionowe, powstałe w wyniku jej ugniatania, oraz poziome, powstałe w wyniku działania sił stycznych od napędu.

Przemieszczanie pojazdu po podłożu podatnym na odkształcenie skutkuje zmianą jego właściwości i kształtu, które są kwalifikowane jako niekorzystne z punktu widzenia eksploatacyjnego – drogi, lub agrotechnicznego – gleba. Największy wpływ na zmiany ma nie tylko działająca siła nacisku, ale także rodzaj podłoża po którym porusza się pojazd.

Właściwości podłoży glebowych są opisywane przy pomocy określonych cech. Jednym z negatywnych skutków towarzyszących ruchowi koła po glebie jest szkodliwy wpływ na zwiększenie jej gęstości. Zmiana tej cechy polega na szczelniejszym ułożeniu cząstek gleby w jednostce objętości, co skutkuje wzrostem gęstości objętościowej. W przypadku gleb użytkowanych rolniczo wzrost zagęszczenia powodować może szereg niepożądanych zjawisk [4]. Badania wykazały, że duże zagęszczenie powoduje zwiększony opór dla korzeni roślin, co skutkować może spadkiem plonowania [14]. Ponadto zwiększenie zagęszczenia skutkuje pogorszeniem właściwości retencyjnych gleby [7]. Pogorszone zostają zdolności gleby do gromadzenia pierwiastków niezbędnych do prawidłowego rozwoju roślin [9]. Konieczność ograniczania przedstawionych powyżej negatywnych skutków biologicznych sprawia, że zasadne stają się badania nad problematyką ugniatania podłoży na skutek ruchu pojazdów rolniczych oraz maszyn transportowych.

## 3. METODA ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Metoda Elementów Skończonych (ang. FEA – Finite Element Analysis) jest przeznaczona do komputerowego wspomaganie obliczeń inżynierskich (ang. CAE – Computer Aided Engineering).

Do podstawowych etapów analizy MES zaliczyć należy:

- budowa modelu cyfrowego,
- dyskretyzację obszaru analizy,
- wprowadzenie warunków brzegowych,
- określenie stref i rodzajów kontaktów,
- wykonanie obliczeń oraz analiza uzyskanych wyników.

Model cyfrowy układu technicznego jest opisywany przy pomocy równań różniczkowych, które przy pomocy funkcji wagowych przekształcane są do postaci równań metody elementów skończonych. Na ich podstawie przeprowadzana jest asemblacja układu równań. Obliczane są wartości współczynników, które stoją przy niewiadomych, a także odpowiadające im wartości prawych stron. W każdym układzie liczna równań równa jest liczbie węzłów, pomnożonych przez liczbę ich stopni swobody, czyli przez liczbę niewiadomych, które występują w pojedynczym węźle [6].

Poprzez wykonanie odpowiednich modyfikacji macierzy współczynników do układu równań wprowadzane są warunki brzegowe. Rozwiązując układ równań otrzymuje się wartości poszukiwanych wielkości fizycznych w poszczególnych węzłach siatki, tworzącej model dyskretny układu [13].

## 4. PRZYKŁADOWA REALIZACJA BADAŃ – OBLICZENIA NUMERYCZNE Z ZASTOSOWANIEM MES

Zastosowanie metod symulacji cyfrowej w omawianej dziedzinie ma istotne znaczenie ze względów ekonomicznych, gdyż badania laboratoryjno-polowe wymagają poniesienia znacznych kosztów finansowych, z uwagi na wysoką cenę urządzeń pomiarowych oraz konieczność dysponowania odpowiednio przygotowanym terenem. Ponadto zastosowanie MES eliminuje problem sezonowości badań, który ma miejsce w przypadku prac polowych.

Zaplanowano i wykonano następujące zadania:

- budowa cyfrowego modelu bryłowego zestawu przykładowych opon napędowych, zawierających wszystkie podstawowe elementy wchodzące w skład ich budowy, ze szczególnym uwzględnieniem geometrii bieżnika,
- budowa modelu współpracy modeli opon z podłożem (gleba) z uwzględnieniem naprężeń kontaktowych między powierzchniami elementów odkształcalnych (opona-podłoże),
- opracowanie modelu rozkładu nacisków powierzchniowych oraz obliczenia rozkładu nacisków powstałych w glebie, z zastosowaniem metody elementów skończonych dla wybranych przypadków obciążenia i kształtów geometrycznych bieżnika,
- analiza uzyskanych wyników obliczeń w postaci map naprężeń, przeprowadzona w wybranych przekrojach modelu geometrycznego opona-gleba,
- porównanie uzyskanych wyników obliczeń numerycznych z wynikami laboratoryjno-polowymi.

Proces modelowania i obliczeń MES przeprowadzono zgodnie z tokiem postępowania przedstawionym na poniższym rysunku.



**Rys. 1.** Tok postępowania w procesie analizy MES

W następstwie uzyskanych wyników obliczeń teoretycznych została wykonana analiza porównawcza wartości wyznaczonych nacisków z uzyskanymi na drodze badań empirycznych. Celem realizacji obliczeń określono założenia wstępne, które pozwoliły na odtworzenie laboratoryjnych warunków badawczych w procesie modelowania cyfrowego:

- bazowy model opony: Stomil 14.9R28/8PR,
- obciążenia robocze:  $G_1=10$  kN,  $G_2=7$  kN,
- ciśnienie w oponie: 225 kPa,
- rodzaj podłoża: gleba gliniasto-piaszczysta.

W pracy wykonano model cyfrowy opony 14.9-R28/8PR Stomil Olsztyn poprzez zastosowanie funkcji modelowania bryłowego systemu Inventor firmy Autodesk.

Cyfrowy prototyp opony 14.9R28/8PR został zbudowany w następujących etapach.

- Opracowanie szkicu ogólnego, przedstawiającego zarys poprzeczny bryły obrotowej.
  - Utworzenie bryły 3D poprzez zastosowanie funkcji obrotu względem osi w wyniku czego otrzymano ogólny zarys opony bez bieżnika.
  - Wykonanie modelu bieżnika.
  - Opracowanie modelu stalowej felgi.
  - Budowa cyfrowego modelu koła (opona + felga).
  - Zamodelowanie cyfrowej postaci układu element jezdny-podłoże.
- Poszczególne etapy modelowania opony zostały przedstawione na rysunku nr 2.



**Rys. 2.** Etapy modelowania cyfrowego koła napędowego z oponą 14.9R28/8PR

Efektom ww. prac jest model bryłowy opony napędowej, zawierającej wszystkie podstawowe elementy wchodzące w skład jej budowy.

Model współpracy opony z podłożem wykonano poprzez określenie strefy kontaktu ciał odkształcalnych oraz jej odpowiednią konfigurację. Zagadnienia kontaktu ciał w analizie MES są silnie nieliniowe i zwykle wymagają znacznych nakładów obliczeniowych oraz wymagają budowy efektywnego modelu numerycznego, w omawianym przypadku dotyczy to modelu wybranej opony oraz podłoża. Strefa kontaktu nie jest dokładnie znana i zależy od następujących czynników:

- obciążenia,
- własności materiałowych,
- warunków brzegowych.

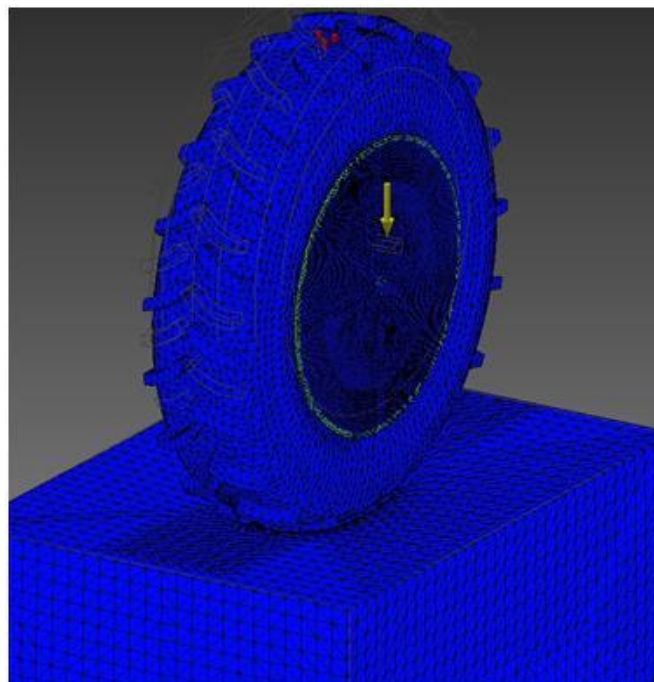
Istnieją trzy podstawowe sposoby realizowania kontaktu:

- węzeł-węzeł (node-to-node),
- węzeł-powierzchnia (nod-to-surface),
- powierzchnia-powierzchnia (surface-to-surface).

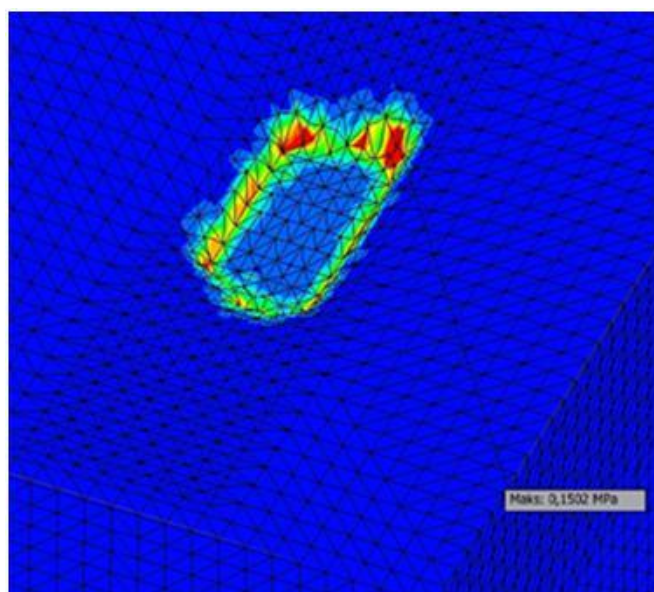
Zasadniczym zdaniem jest zdefiniowanie strefy potencjalnego kontaktu reprezentowanej przez węzły brzegowe lub elementy związane z powierzchnią brzegową. Model obliczeniowy w systemie MES rozpoznaje możliwe pary kontaktowe przez specjalne elementy, które zostają zbudowane w tej strefie.

Określono strefę potencjalnego kontaktu pomiędzy powierzchnią czołową wybranych elementów bieżnika a górną warstwą gleby, w miejscach gdzie spodziewano się naturalnego kontaktu elementów odkształcalnych. Określenie strefy kontaktu umożliwiło wyznaczenie w systemie MES cyfrowej mapy nacisków powierzchniowych

powstających między oponą i glebą oraz rzeźby odkształcenia podłoża. Przykładowe obliczenia przeprowadzono dla modelu opony 14.9R28/8PR i podłoża o własnościach mechanicznych odpowiadających glebie piaszczysto-gliniastej.



**Rys. 3.** Symulacja cyfrowa odkształcenia opony i podłoża pod wpływem siły obciążającej oś koła napędowego



**Rys. 4.** Rozkład nacisków na powierzchni podłoża (siła 10 kN)

Obliczenia wytrzymałościowe naprężeń powstających w ośrodku glebowym oparto na hipotezie Hubera-Misesa-Henckiego zaimplementowanej w systemie wykorzystywanym do obliczeń.

Zgodnie z metodyką pomiarów rozkładu naprężeń w ośrodku glebowym realizowanych w warunkach laboratoryjnych (kanał glebowy) oraz w badaniach polowych wyznaczono składową normalną naprężeń obliczonych w systemie ANSYS. Składową normalną naprężeń  $\sigma_n$  w przyjętym układzie odniesienia ma następującą postać:

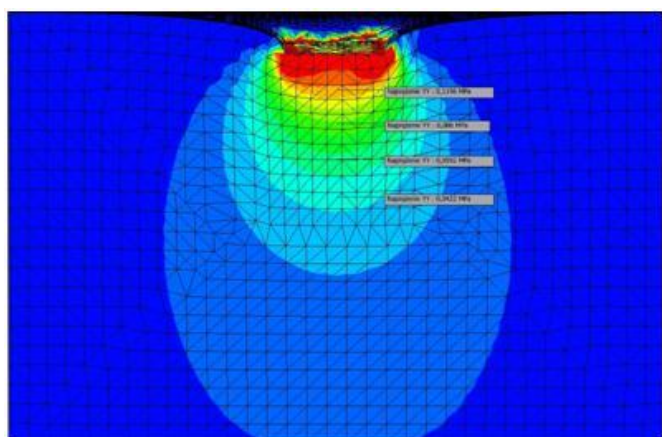
$$\sigma_n = \sqrt{\sigma_y^2 + 3\tau_{yx}^2 + 3\tau_{yz}^2} \quad (1)$$

$$\sigma_x = 0 \quad (2)$$

$$\sigma_z = 0 \quad (3)$$

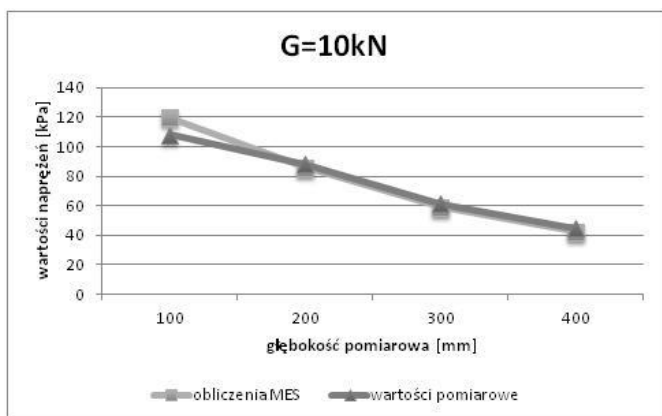
$$\tau_{xz} = 0 \quad (4)$$

Poniżej przedstawiono mapy rozkładu naprężeń w podłożu, w płaszczyźnie prostopadłej do osi jazdy, na której znajduje się oś koła, dla przykładowych dwóch przypadków obciążenia  $G_1=10$  kN oraz  $G_2=7$  kN. Wyniki przedstawiono dla modelu opony odpowiadającego własnościami materiałowymi i kształtem oponie 14.9R28/8PR.

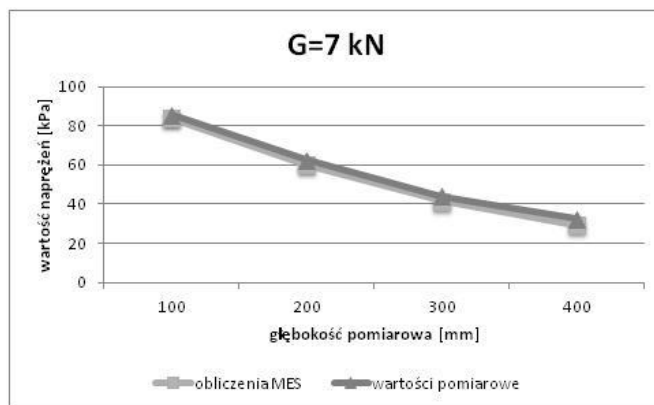


**Rys. 5.** Propagacja naprężeń w głąb podłoża (siła 10 kN).

Uzyskane wyniki obliczeń z wykorzystaniem MES porównano z wynikami laboratoryjnymi. Do analizy porównawczej wykorzystano wyniki badań laboratoryjnych zamieszczonych w [9].



**Rys. 6.** Porównanie obliczeń MES i wyników zarejestrowanych w badaniach laboratoryjno-polowych ( $G=10$  kN)



**Rys. 7.** Porównanie obliczeń MES i wyników zarejestrowanych w badaniach laboratoryjno-polowych ( $G=7$  kN)

Wyniki pomiarowe i obliczone metodą MES wykazują istotne podobieństwo czego dowodem są wartości różnic względnych, które nie przekraczają  $\pm 10\%$  na wszystkich głębokościach podłoża.

Aby poprawić dokładność obliczeń należy w dalszych badaniach zmodyfikować model dyskretny podłoża i współpracującej z nim opony, m.in. poprzez zastosowanie elementów izoparametrycznych. Kolejnym krokiem będzie budowa cyfrowych modeli czujników umieszczonych w modelu podłoża, dzięki czemu, przy zastosowaniu metody obliczeń naprężeń kontaktowych, możliwe będzie dokładne odwzorowanie warunków laboratoryjnych, co w konsekwencji pozwoli na osiągnięcie większej zgodności wyników.

**PODSUMOWANIE**

Analiza wyników obliczeń teoretycznych wykazała korelację wartości naprężeń z uzyskanymi na drodze badań empirycznych, wykonywanych zarówno w warunkach laboratoryjnych (kanał glebowy) jak i warunkach polowych przeprowadzonych w Federal Research Centre – Braunschweig [9]. Wyniki obliczeń MES wykazują dodatkowo, że:

- kształt bieżnika ma wpływ na propagację naprężeń w podłożu, przy czym opony z bieżnikiem łukowym generują mniejsze wartości naprężeń od opon z bieżnikiem daszkowym,
- na wartość naprężeń istotny wpływ ma kąt nachylenia bieżnika do osi jazdy,
- istnieje możliwość wyznaczenia wartości kąta nachylenia bieżnika, przy którym wartości naprężeń generowanych przez dany typ opony będą najmniejsze na badanych głębokościach pomiarowych
- wyznaczony rozkład wartości naprężeń dla badanych przypadków opon odpowiada matematycznemu modelowi teoretycznemu [10], który opisuje proces rozprzestrzeniania się naprężeń w głąb podłoża.

Zastosowanie systemów CAD oraz metod symulacji cyfrowej i obliczeń MES w omawianej problematyce daje wymierne korzyści, do których należą m.in.:

- znaczne skrócenie czasu wykonywanych badań i niezależnie-

**Tab. 1.** Porównanie obliczeń MES z pomiarami laboratoryjnymi

Głębokość [mm]	G=10kN			G=7kN		
	obliczenia MES $\sigma_n$ [kPa]	wartości pomiarowe $\sigma_n$ [kPa]	różnica [%]	obliczenia MES $\sigma_n$ [kPa]	wartości pomiarowe $\sigma_n$ [kPa]	różnica [%]
100	119,6	108,2	9,53%	83,7	85,6	2,27%
200	86,0	88,1	-2,44%	60,2	62,5	-3,82%
300	59,2	61,4	-3,72%	41,5	44,0	-6,02%
400	42,2	44,8	-6,16%	29,5	32,4	-9,83%

- nie procesu badawczego od warunków pogodowych i klimatycznych,
- odciążenie zespołu badawczego od prac zrutynizowanych i nietwórczych – czasochłonne przygotowywanie stanowisk badawczych i pracochłonna analiza uzyskanych wyników,
- ułatwienie wykonania analizy porównawczej badanych opon oraz rodzajów podłoża,
- możliwość realizacji wiarygodnych badań z wykorzystaniem systemów komputerowych jeszcze w fazie projektowania opony i układu napędowego, bez konieczności wykonywania kosztownych i czasochłonnych badań laboratoryjnych,
- określenie wartości wybranych cech konstrukcyjnych bieżnika, które zapewnią najmniejsze z możliwych naciski układu jezdnego na podłoże.

### BIBLIOGRAFIA

1. Bekker, M., Theory of land locomotion. The University of Michigan Press 1960.
2. Bekker M., Introduction to terrain-vehicle system, The University of Michigan Press, Ann Arbor 1969.
3. Berenstein, R., Probleme zur experimentellen Motorflugmechanik. Motorwagen 1913.
4. Brennenstul M., Ocena właściwości trakcyjnych układu koło – podłoże w aspekcie zdolności uciążowych ciągnika jako uniwersalnego źródła energii pociągowej. Rozprawa doktorska. Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wrocław 2012.
5. Cannel R., Reduced tillage in north-west Europe a review, 1985, p. 129–177.
6. Dacko M., Metoda Elementów Skończonych w mechanice konstrukcji, Arkady, Warszawa 1994.
7. Głąb, T., Kopeć, S., Wpływ ugniatania kołami ciągnika dwóch gleb piaszczystej i pyłowej na ich właściwości retencyjne, 4, 2a(11), 2004, s. 87–93.
8. Hammel K., Soil stress distribution under lugged tires. 32, s. 163–181, 1994.
9. Jakliński L., Mechanika układu pojazd-teren w teorii i badaniach. Wybrane zagadnienia, OWPW, Warszawa 2006.
10. Jakliński, L., Modele oddziaływania koła pneumatycznego na glebę (Models of the impact of a pneumatic wheel on soil), OWPW 1999.
11. Jakliński L., Malesa W., Zastosowanie systemów CAD w procesie modelowania cyfrowego układu pojazd-teren, Politechnika Warszawska, Plock 2011.
12. Krauze J., Badania pługów motorowych, 9/1996.
13. Rakowski G., Kacprzak Z., MES w mechanice konstrukcji. OWPW, Warszawa 2005.
14. Reheul D., Nevens F., The consequences of wheel-induced soil compaction, 2003. s. 70, s. 175 -184.
15. Sołtyński A., Mechanika układu pojazd-teren, MON, Warszawa 1966.
16. Sohne W., Welchebeziehungen zwischen Fahrzeug – Laufwerk und Boden beim Fahren auf unbefestigter Fahrbahn Grundlanger der Landtechnik 1961.
17. Taylor J., Lug gable effect on traction performance of pneumatic tractor tires Transactions of the ASAE 1974, paper No 73 – 1505, 3 – 6.
18. Wong J., Reece A., Prediction of rigid wheel performance based on the analysis of soil wheel stressed Journal of Terramechanics, 1967.

### Analysis of impact on the ground of wheel drive mechanisms using Finite Elements Methods

*The research problems of vehicle-land layout and methodic using on the research of propagation pressure in the ground resulting from wheel drive mechanism was presented. Problematic of research using digital modeling and calculations using Finite Elements Methods was described. The paper is included examples of calculations and simulations for selected wheel equipped of popular agricultural tire.*

Autor:

**dr inż. Włodzimierz Malesa** – Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa Mechaniki i Petrochemii w Plocku, Instytut Inżynierii Mechanicznej, Zakład Podstaw Technologii i Konstrukcji Maszyn.