

MODEL SYMULACYJNY DO PROGNOZOWANIA WYBRANYCH PARAMETRÓW RUCHU KÓŁ TOCZONYCH

Zbigniew Błaszkiwicz, Artur Szafarz

Instytut Inżynierii Rolniczej, Akademia Rolnicza w Poznaniu

Streszczenie. W pracy przedstawiono utworzony program komputerowy przeznaczony do dokonywania prognozowania oporu toczenia opon na spulchnionych glebach lekkich. Program powstał na bazie oryginalnego modelu matematycznego, utworzonego przez rozwinięcie uprzednio opracowanego modelu opona–gleba przeznaczonego do prognozowania ugniatania gleby oponami toczonymi. W badaniach symulacyjnych wykazano wpływ wartości odległości przekrojów płaskich Δh powierzchni kontaktu opony z glebą na stabilność uzyskiwanych wyników oraz wpływ uwzględniania odkształceń wybranych opon ciągników rolniczych na obliczany opór toczenia kół na spulchnionych glebach lekkich.

Słowa kluczowe: opór toczenia koła, model symulacyjny, badania symulacyjne

Wprowadzenie i cel pracy

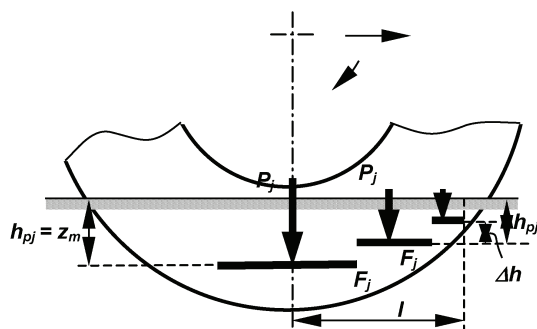
Ruch ciągników i maszyn rolniczych na spulchnionych glebach lekkich jest związany z dużym oporem toczenia kół, znacznie obniżającym sprawność przeniesienia napędu i zwiększającym nakłady energetyczne na uprawę roli [Dwyer 1984; Wong 2001; Szafarz i Błaszkiwicz 2005]. Ograniczenie tego problemu można dokonać przez odpowiedni dobór opon oraz ich parametrów technicznych i eksploatacyjnych. Do tego celu coraz częściej stosuje się technikę komputerową, która wymaga jednak dobrych modeli opisujących układ opona–gleba oraz zbudowanych na ich podstawie programów komputerowych. Model do wyznaczania oporu toczenia koła został utworzony na bazie znanego modelu opona–gleba przeznaczonego do prognozowania ugniatania gleby oponami toczonymi [Błaszkiwicz 1997]. Model ten nie został jednak oprogramowany i zbadany pod względem odporności na oscylacje uzyskiwanych wyników obliczeń. Z badań Błaszkiwicza i Walkowiaka [2000] wynika, że podobny program komputerowy zbudowany na podstawie uprzednio utworzonego modelu opona–gleba, jest wrażliwy na takie oscylacje zależne od przyjmowanej w obliczeniach wartości odległości przekrojów płaskich przestrzennej powierzchni kontaktu opony z glebą. Należy stąd wnosić, że nowy program komputerowy, oparty w znacznej mierze na modelu opona–gleba i na nowym modelu do wyznaczania oporu toczenia, może charakteryzować się podobnymi oscylacjami i będzie wymagać wprowadzenia określonych wartości danych wejściowych dla uzyskiwania akceptowanych wyników obliczeń.

Celem niniejszej pracy jest:

- zbudowanie programu komputerowego do prognozowania oporu toczenia opon i ugniatania gleby w koleinach, na bazie nowego utworzonego modelu i modelu opona–gleba,
- przeprowadzenie badań symulacyjnych za pomocą nowego programu nad wpływem wybranych danych wejściowych do programu na stabilność uzyskiwanych wyników w zakresie wyznaczania oporu toczenia opon oraz nad wpływem odkształceń wybranych opon ciągników rolniczych na obliczany opór ich toczenia.

Opis programu komputerowego do wyznaczania oporu toczenia koła

Model do wyznaczania oporu toczenia opon został zbudowany przez Błaszkiwicza [2006] i powstał na bazie znanej metody, w której przyrównuje się pracę wykonywaną przez toczone koło na pionowe odkształcenie gleby i pracę powodowanego poziomego odkształcenia gleby [Bekker 1969, Wong 2001]. W odniesieniu do zależności dotyczących modelu opona–gleba, przedstawionych na rysunku 1, praca pionowego odkształcenia gleby jest sumą prac cząstkowych wykonywanych na głębokości h_{pj} przez cząstkowe powierzchnie kontaktu F_j , natomiast praca na pokonanie oporu poziomego gleby jest iloczynem poziomej siły oporu toczenia koła P_f i jego przemieszczenia na drodze l .



Rys. 1. Położenie cząstkowych powierzchni kontaktu F_j i cząstkowych sił oporu gleby P_j na powierzchni kontaktu opony z podłożem

Fig. 1. Location of the partial contact areas F_j and the partial soil resistance forces P_j on the contact area of the tyre with the soil

Model ten ma następującą postać:

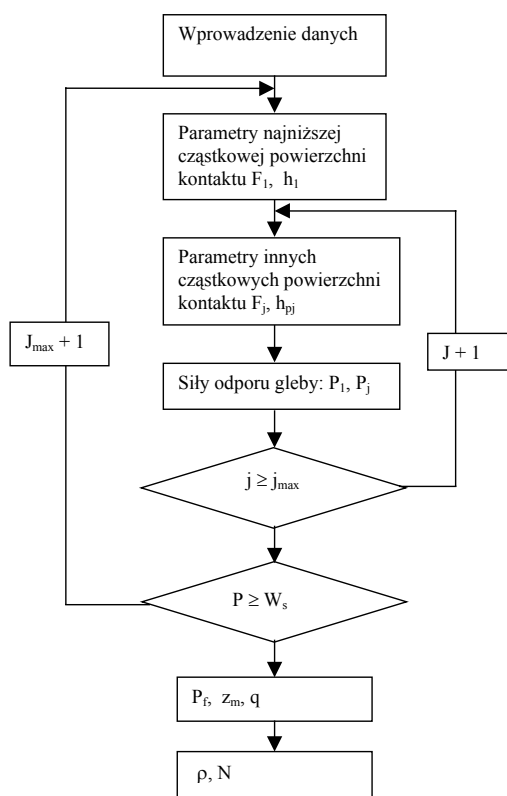
$$P_f = \frac{\sum_{c=1}^c \left\{ \sum_{j=1}^j [F_j \cdot k \cdot \lambda^{x-2} \cdot \left(\frac{h_{pj}}{b_p} \right)^n \Delta h] \right\}}{l} \quad (1)$$

gdzie:

- P_f – opór toczenia koła,
- b_p – szerokość płytki bewametru,
- F_j – pole powierzchni cząstkowej powierzchni kontaktu,
- Δh – odległość poziomych przekrojów płaskich przestrzennej powierzchni kontaktu opony z glebą równa grubości rozważanej warstwy odkształcanej gleby,
- h_{pj} – głębokość położenia cząstkowych powierzchni kontaktu,
- k, n – parametry charakteryzujące właściwości mechaniczne gleby,
- l – poziome przemieszczenie koła,
- λ – parametr podobieństwa opony i płytki bewametru,
- x – parametr podobieństwa skali sił,
- c – liczba cząstkowych powierzchni kontaktu,
- j – oznaczenie kolejnych cząstkowych powierzchni kontaktu.

Bezpośrednie wyznaczenie oporu toczenia koła z powyższego wzoru na podstawie wprowadzonych danych nie jest informatycznie trudne. Jednak dane wejściowe do obliczeń muszą być wyznaczone z uprzednio utworzonego modelu opona-gleba [Błaszkiwicz 1997]. Aby efektywnie realizować obliczenia zbudowano nowy zintegrowany program

komputerowy, oparty na modelu opona-gleba oraz na modelu do wyznaczania oporu toczenia kół (1), umożliwiający wyznaczenie jednocześnie danych wejściowych do modelu (1) i obliczenie oporu toczenia koła, a także wyznaczenie parametrów charakteryzujących ugniatanie gleby tj. głębokość koleiny i w niej gęstość objętościową gleby. Algorytm nowego zbudowanego programu komputerowego przedstawiono na rysunku 2. Program komputerowy zaimplementowano w środowisku Borland C++Builder 5.



Rys. 2. Algorytm graficzny programu komputerowego do wyznaczania oporu toczenia koła i zagęszczenia gleby w koleinach

Fig. 2. Algorithm of the computer program for the determination of the rolling resistance of the towed wheels and soil compaction in the rut

Obliczenia według algorytmu zmierzają do wyznaczenia podstawowego warunku w postaci równości obciążenia koła W_s i sił oporu gleby P_j działających na oponę na różnych głębokościach (rys. 1), gdzie sumę sił oporu gleby określa prawa strona poniższego równania:

$$W_s = \sum_{j=1}^j \left\{ F_j \cdot k \cdot \lambda^{(x-2)} \left(\frac{z_m}{b_b} \right)^n \right\} \quad (2)$$

gdzie:

- W_s – obciążenie koła,
- F_j – pole powierzchni cząstkowej powierzchni kontaktu,
- b_p – szerokość płytki bewametru,
- z_m – głębokość koleiny,
- λ – parametr podobieństwa opony i płytki bewametru,
- x – parametr podobieństwa skali sił,
- k, n – parametry charakteryzujące właściwości mechaniczne gleby.

W obliczeniach prowadzonych za pomocą powstałego programu komputerowego przyjmuje się małą wyjściową wartość głębokości koleiny i następnie są obliczane kolejno: wielkości cząstkowych powierzchni kontaktu położone na przestrzennej powierzchni kontaktu opony z glebą, głębokości ich położenia w koleinie oraz siły oporu na nie działające. Jeśli powyższy warunek równości (2) tj. obciążenia opony i sił oporu gleby nie jest spełniony program ponawia obliczenia, ale dla zwiększonej głębokości koleiny o wartość Δh . Po uzyskaniu powyższej równości obliczone wartości parametrów są wstawiane do wzoru (1) i obliczany jest opór toczenia opony. Ponadto obliczany jest nacisk jednostkowy działający na dno koleiny i z charakterystyki $\rho, N[q]$ obliczana jest gęstość objętościowa gleby w koleinie, a także może być wyznaczona jej porowatość ogólna.

Badania symulacyjne

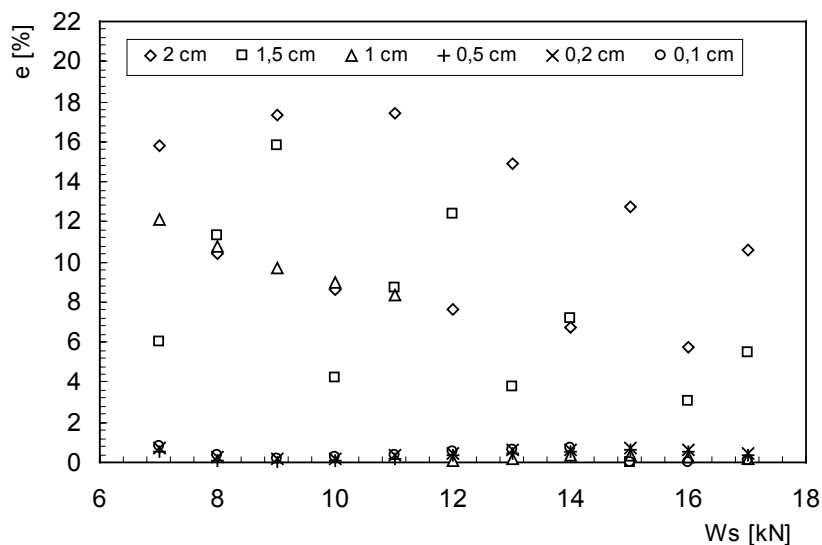
Badania niniejszej części zostały przeprowadzone dla warunków spulchnionej gleby lekkiej (piasek gliniasty) podczas orki i dla opon napędowych 14.9-28 ciągnika Zetor 5211. W etapie pierwszym eksperymentu przeprowadzono badania stabilności utworzonego programu komputerowego w zakresie prognozowania oporu toczenia opony, głębokości tworzonej koleiny oraz w niej gęstości objętościowej gleby.

Z analizy programu wynika, że jeśli oscylacjom nie podlega wyznaczana siła oporu gleby P_j działająca na oponę to nie podlegają jej również powyższe wyznaczone parametry. Zatem badano wpływ różnych odległości przekrojów płaskich Δh powierzchni kontaktu opony z podłożem na dokładność obliczeń sumarycznej siły oporu gleby P_s (rys. 3.). Miarą dokładności obliczeń programu był błąd względny wyrażający dokładność obliczenia siły oporu gleby P_s w odniesieniu do obciążenia koła W_s , obliczany ze wzoru:

$$e = \frac{|W_s - P_s|}{W_s} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

gdzie:

- e – błąd względny aproksymacji [%],
- P_s – suma sił odporu gleby P_j uzyskana z obliczeń,
- W_s – wartość statycznego obciążenia koła.

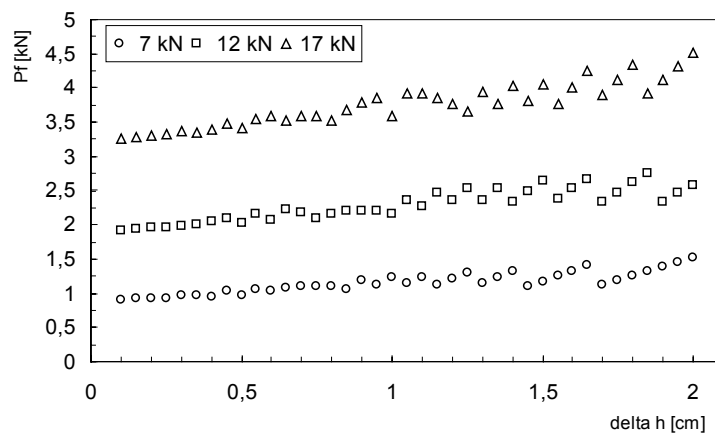


Rys. 3. Zależność błędu względnego aproksymacji e obliczonej siły odporu gleby P_s od obciążenia statycznego opony W_s dla różnych odległości przekrojów płaskich Δh

Fig. 3. Dependence of the relative approximation error e for calculated passive soil pressure P_s on static load of tire W_s for different distances of flat cross-sections Δh

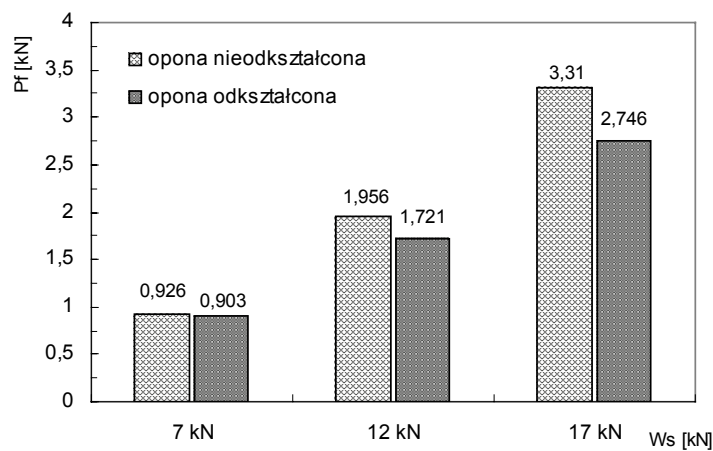
W etapie drugim badano czy wielkość powodowanych w programie oscylacji zależy od wartości obciążenia normalnego opony. Oceny tej dokonano na podstawie analizy przebiegów zależności obliczonych licznych wartości siły oporu toczenia opon od przyjmowanych wartości odległości przekrojów płaskich Δh , dla trzech wybranych wartości obciążenia opony: 7 kN, 12 kN i 17 kN (rys. 4).

W etapie trzecim utworzoną aplikację zastosowano praktycznie w badaniach symulacyjnych, w których dokonano wyznaczenia wpływu odkształceń promieniowych i bocznych opony na obliczane wartości oporu jej toczenia. Przeprowadzono obliczenia oporu toczenia opony bez uwzględnienia jej odkształceń oraz z ich występowaniem dla trzech wybranych wartości obciążenia opony: 7 kN, 12 kN i 17 kN (rys. 5).



Rys. 4. Zależność obliczonej siły oporu toczenia P_f od odległości przekrojów płaskich Δh dla trzech wybranych obciążeń opony W_s

Fig. 4. Dependence of calculated rolling resistance force P_f on distances of flat cross-sections Δh for three selected tire loads W_s



Rys. 5. Obliczone wartości oporu toczenia opony P_f opony nieodkształconej oraz odkształconej dla trzech wybranych wartości jej obciążeń statycznych

Fig. 5. Calculated values of tire rolling resistance P_f undeformed and deformed tire for three selected values of its static loads

Wyniki

Z zależności przedstawionej na rysunku 3 wynika, że dokładność obliczeń zbudowanego programu komputerowego zależy w znacznym stopniu od przyjmowanych wartości odległości przekrojów płaskich Δh powierzchni kontaktu opony z glebą. Błąd względny aproksymacji wskazujący na różnice w obliczanych wartościach siły oporu gleby P_s w odniesieniu do obciążenia opony W_s może wynosić nawet powyżej 10% przy przyjmowanych wartościach $\Delta h \geq 1$ cm. Jednak jeśli wartość Δh wynosi mniej niż 2 mm obliczenia mogą być realizowane z akceptowanym bardzo małym błędem poniżej 1%. Spowoduje to jednak wydłużenie czasu obliczeń komputerowych, który nawet przy dużo mniejszej wartości Δh nie przekracza przy współczesnym sprzęcie komputerowym kilkunastu sekund.

Analiza zależności przedstawionych na rysunku 4 wskazuje również na wrażliwość obliczeń programem komputerowym siły oporu toczenia opony przy różnych jej obciążeniach uzależnioną od przyjmowanych wartości odległości przekrojów płaskich Δh powierzchni kontaktu opony z glebą. Ogólnie można przyjąć, że obserwowane oscylacje wartości tej siły są podobne przy badanych obciążeniach i mogą być akceptowane przy nieco większej wartości przyjmowanych wartości odległości przekrojów płaskich Δh wynoszących do około 0,5 cm. Jednak przy dużo większych wartościach Δh błędy w obliczeniach mogą wynosić nawet do około 20%.

Analiza wyników przeprowadzonych badań symulacyjnych przedstawionych na rysunku 5 wskazuje na znaczenie uwzględniania w modelu i w obliczeniach odkształceń promieniowych i bocznych opon. Błąd obliczeń prowadzonych przy pomocy modelu opona-gleba i modelu dla oporu toczenia opony (1) może wynosić przy badanej oponie, przy większych obciążeniach, nawet około 15%. Wskazane byłoby jednak potwierdzenie takiego stwierdzenia w badaniach empirycznych.

Wnioski

1. Dokładność obliczeń oporu toczenia opony za pomocą zbudowanego programu komputerowego w dużym stopniu zależy od przyjmowanych wartości odległości przekrojów płaskich Δh powierzchni kontaktu opony z podłożem.
2. Dokładność obliczeń programu w zakresie wyznaczania oporu toczenia opony może być akceptowana dla wartości $\Delta h \leq 0,5$ cm. Dalsze zmniejszanie tej wartości powoduje wydłużenie czasu obliczeń nie polepszając znacząco dokładności obliczeń.
3. W badaniach symulacyjnych wykonanych zbudowanym programem komputerowym wykazano, że uwzględnianie odkształceń opon w modelach oraz w obliczeniach siły oporu gleby znacząco wpływa na uzyskiwane wyniki.

Bibliografia

- Bekker M.G.** 1969. Introduction to Terrain-Vehicle Systems. Ann Arbor. The University of Michigan Press. ISBN 0-472-04144-4.
- Błaszkiwicz Z.** 2006. Model do wyznaczania oporu toczenia opon. Inżynieria Rolnicza 2 (77) s. 137-144.
- Błaszkiwicz Z.** 1997. Analiza wpływu wybranych parametrów opon rolniczych na ugniatanie gleby. Roczniki AR w Poznaniu. Rozprawy Naukowe. Zeszyt 271. ISBN 83-7160-036-4.
- Błaszkiwicz Z., Walkowiak R.** 2000. Zastosowanie techniki komputerowej do obliczania parametrów współpracy opon z podłożem. Inżynieria Rolnicza 3 (14) s. 17-27.
- Szafarz A., Błaszkiwicz Z.** 2005. Analiza dokładności modeli układu koło-podłoże dla warunków spulchnionej gleby lekkiej. Inżynieria Rolnicza. 2 (62) s. 145-152.
- Dwyer M.J.** 1984. The tractive performance of wheeled vehicles, Journal of Terramechanics. 21(1) s. 19-34.
- Wong J.Y.** 2001. Theory of ground vehicles. Third edition by John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-35461-9.

SIMULATION MODEL FOR PREDICTION OF THE SELECTED PARAMETERS OF THE TOWED WHEELS

Summary. In this work is presented the simulation model for the prediction of the selected parameters of the towed wheels. The computer program was created on the basis the new mathematic model for the determination of the rolling resistance force of the towed tire. This model was build basis at the knew tyre-soil model for the determination soil compaction caused by tyres. In the simulation test the effects of the input data - the distance Δh between the next cross – sections of the front part of the contact area - on the oscillation of the output data were carried out. Besides, it was stated the effects of the tyre deformation on the calculated rolling resistance force of the towed tyre at the loosened sandy soil.

Key words: rolling resistance force of the towed tire, simulation model, simulation test

Adres do korespondencji:

Zbigniew Błaszkiwicz; e-mail: blaszkie@au.poznan.pl
Instytut Inżynierii Rolniczej
Akademia Rolnicza w Poznaniu
ul. Wojska Polskiego 50
60-627 Poznań