

Bronisław Kolator  
Katedra Budowy, Eksploatacji Pojazdów i Maszyn  
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

## METODA WYZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKA OPORU TOCZENIA KOŁA NAPĘDOWEGO CIĄGNIKA

### Streszczenie

Zaprezentowano metodę i urządzenie umożliwiające określenie współczynnika oporu toczenia koła napędowego ciągnika. Obiektem badań były napędowe koła 11.2-28 6PR ciągnika rolniczego. Badania przeprowadzono za pomocą urządzenia pomiarowego opracowanego i wykonanego przez autora. Określono zależność między współczynnikiem oporu toczenia napędowego koła ciągnika a obciążeniem normalnym na podłożu nieodkształcalnym i odkształcalnym.

**Słowa kluczowe:** metoda, współczynnik oporu toczenia, koło napędowe, stanowisko badawcze

### Wykaz symboli i oznaczeń

- $a$  – rozstaw osi ciągnika [m],
- $b$  – odległość od osi przedniej do punktu zamocowania urządzenia pomiarowego [m],
- $c$  – położenie środka ciężkości ciągnika względem osi tylnej [m],
- $e_t$  – ramię działania normalnej składowej reakcji podłoża na koło tylne [mm],
- $f$  – współczynnik oporu toczenia koła,
- $f_p$  – współczynnik oporu toczenia koła przedniego,
- $f_t$  – współczynnik oporu toczenia koła tylnego,
- $f_{ta}$  – współczynnik oporu toczenia koła tylnego na nieodkształcalnym podłożu,
- $f_{td}$  – współczynnik oporu toczenia koła tylnego na odkształcalnym podłożu,
- $F_f$  – sumaryczna siła oporu toczenia kół ciągnika [N],
- $F_{fp}$  – styczna składowa wypadkowa siła oporu toczenia koła przedniego [N],
- $F_{ft}$  – styczna składowa wypadkowa siła oporu toczenia koła tylnego [N],
- $F_o$  – siła działająca w osi koła tylnego [N],
- $F_u$  – siła uciągu ciągnika [N],

- $F_x$  – siła wzdłużna mierzona w urządzeniu pomiarowym [N],
- $m_c$  – masa ciągnika [kg],
- $m_i$  – masa narzędzia [kg],
- $M_k$  – moment napędowy koła [Nm],
- $Q_p$  – normalna składowa wypadkowej reakcji podłoża na koło przednie [N],
- $Q_t$  – normalna składowa wypadkowej reakcji podłoża na koło tylne [N],
- $r_{dt}$  – promień dynamiczny koła napędowego [mm],
- $\omega_k$  – prędkość kątowa koła tylnego [ $\text{rad s}^{-1}$ ].

## Wprowadzenie

Efektywność funkcjonowania agregatu ciągnikowego podczas wykonywania prac polowych określa się m.in., wykorzystując kryterium sprawności uciągu  $\eta_u$ . Przez American Society of Agricultural Engineers (ASAE), współczynnik sprawności uciągu jest zdefiniowany jako stosunek mocy użytecznej do mocy wejścia urządzenia pociągowego. Moc użyteczna to uzyskany efekt jako iloczyn siły uciągu ciągnika  $F_u$  i prędkości jazdy agregatu ciągnikowego  $v$ . Poniesione nakłady na uzyskanie tej mocy to suma iloczynów momentu obrotowego  $M_k$  i prędkości kątowej  $\omega_k$  poszczególnych kół napędowych ciągnika. Różnicę między mocą wejściową a mocą użyteczną określono jako straty mocy wynikające z oporów toczenia i poślizgu kół.

Od wielu lat liczni badacze przedstawiają w różny sposób osiągi kół pojazdów, które poruszają się po różnych podłożach. Obliczenia współoddziaływania elastycznego koła z glebą przeprowadził Okello [1992], stosując klasyczne metody mechaniki układu pojazd-teren. Wyniki tych obliczeń porównano z wynikami pomiarów i stwierdzono, że różnice wynoszą 20%. Modyfikacji dobrze znanego modelu analitycznego sztywnego koła pojazdu dokonał Muro [1997]. Model ten był oparty na pół-doświadczalnym modelu zaproponowanym przez Bekkera [1960], który uwzględnił zmianę właściwości gleby pod kołami tylnymi z powodu przejazdu przednich kół. Pół-doświadczalną metodę określenia sprawności trakcyjnej koła na podłożu odkształcalnym opracował Shmulevich i in [2003]. Analityczne rozważania współpracy koła z podłożem w zależności od wartości i zwrotu momentu napędzającego koło przedstawił Żebrowski [2004], gdzie wykazał, że sprawność trakcyjna jest zależna od oporów toczenia i poślizgu koła. Matematyczny model koła napędowego współpracującego z nieodkształcalnym podłożem, z uwzględnieniem zapotrzebowania momentu napędowego, opracowano w pracy Sharma i in. [1997].

Z powyższego przeglądu literatury wynika różnorodność badań właściwości kół ciągników. Rozmaitość w podejściach do badań efektywności kół pojazdów terenowych wynika ze złożoności tego zagadnienia. Każdy z wyżej wymienionych sposobów ma kilka ograniczeń z powodu wykorzystania zazwyczaj wielu współczynników i wskaźników. Jednym z nich jest współczynnik oporu toczenia koła, który często jest wykorzystywany jako stała wartość dla odpowiedniego podłoża, przy stałej prędkości bez uwzględnienia zmian normalnego obciążenia koła. Siłę uciągu ciągnika  $F_u$  zdefiniowano za pomocą wyrażenia:

$$F_u = \frac{M_k}{r_{dt}} - Q_t \cdot f_t - Q_p \cdot f_p \quad (1)$$

Z powyższej zależności wynika, że w celu określenia wartości siły uciągu niezbędna jest znajomość wartości współczynników oporów toczenia kół przednich i tylnych ciągnika oraz normalnego wypadkowego reakcję podłoża na te koła.

### **Cel i zakres badań**

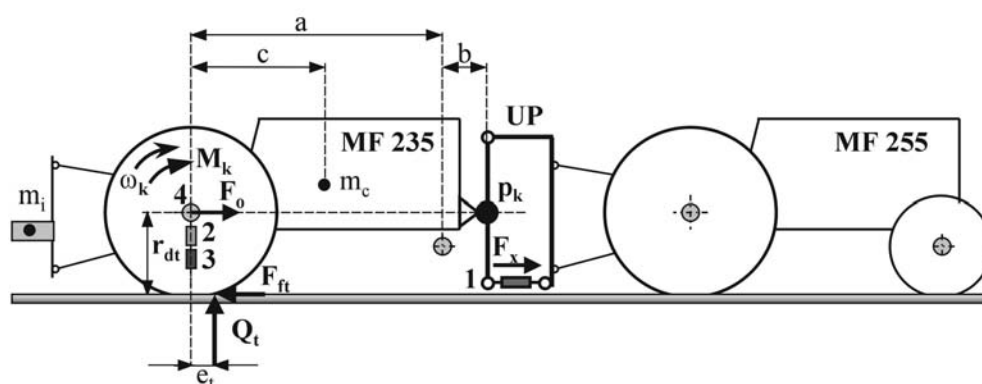
Celem badań była weryfikacja eksperymentalna metody wyznaczania współczynnika oporu toczenia napędowych kół ciągnika oraz określenie wpływu podłoża i normalnego obciążenia kół na jego wartość.

### **Materiał i metody**

Do badań wykorzystano ciągnik URSUS MF 235 z zamontowanymi na kołach przednich oponami 6.00-16 6PR (przy ciśnieniu napompowania 180 kPa) i na kołach tylnych wyposażonego w opony 11.2-28 6PR (przy ciśnieniu napompowania 80 kPa). Do holowania ciągnika wykorzystano opracowane i wykonane przez autora niniejszej pracy urządzenie pomiarowe ( $UP$ ) połączone z ciągnikiem URSUS MF 255 za pomocą trzypunktowego układu zawieszenia narzędzi (rys. 1). Na korpusie badanego ciągnika z przodu zamontowano przegub kulisty ( $p_k$ ) umożliwiający jego przeciągnięcie i przenoszenie normalnego obciążenia przypadającego na koła przednie. Stanowisko badawcze wyposażono w czujniki pomiarowe (rys. 1) i aparaturę rejestrującą składającą się z przetworników A/C oraz komputera TOUGHBOOK Panasonic CF-28 [Kolator 2005].

W celu określenia potrzebnych do analiz wielkości, badania eksperymentalne przeprowadzono zgodnie z opracowaną metodyką. Całkowitą masę (sumę  $m_c$  i  $m_i$ ) badanego ciągnika określono na wadze przejazdowej z dokładnością  $\pm 10\text{kg}$  (0,05%). W wyniku określenia położenia środka ciężkości ciągnika stwierdzono, że jego położenie było w osi podłużnej pojazdu niezależnie od masy całkowitej. Na tym stwierdzeniu do dalszych rozważań przyjęto układ sił i ich położenie na

płaszczyźnie. Obciążenie normalne kół realizowano poprzez zmianę masy  $m_i$  umieszczonej na układzie zawieszenia narzędzi badanego ciągnika. Ustalono skokowo pięć wartości normalnych obciążeń kół tylnych (zgodnie z danymi producenta opon) w zakresie od 6,3 kN do 11,8 kN. Obciążenie to rejestrowano podczas każdego przejazdu badawczego, wykorzystując czujnik siły U9B (2). Przejazdy pomiarowe zrealizowano na podłożu nieodkształcalnym (asfalt) i odkształcalnym (droga gruntowa) w trzech powtórzeniach. Na podłożu odkształcalnym dokonano zmiany rozstawu kół ciągnika ciągnącego, aby badane koła nie poruszały się po śladach kół tego ciągnika.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego składającego się z ciągników; ciągnącego i holowanego oraz urządzenia do pomiaru siły oporu toczenia kół tylnych

Fig. 1. Scheme of research test stand consisting of tractors; pulling and towed and device used to measuring of rolling resistance force of rear wheels

W pierwszym etapie ciągnik MF 235 pokonywał odcinek pomiarowy z własnym napędem, na czterech kołach, ze stałą prędkością jazdy. Podczas tego przejazdu były rejestrowane następujące wielkości: moment napędowy koła  $M_k$  - czujnik tensometryczny na półosi napędowej (4); odległość od osi koła do podłoża, jako promień dynamiczny koła napędowego  $r_{dt}$  - czujnik UM 30-300 A-HP (3). Na podstawie pierwszego etapu pomiarów określono sumaryczną wartość siły oporu toczenia kół ciągnika z zależności:

$$F_f = F_{fp} + F_{ft} = \frac{M_k}{r_{dt}} \quad (2)$$

Następnie ciągnik badawczy był holowany na czterech kołach przez ciągnik MF 255 za pomocą urządzenia pomiarowego, gdzie była rejestrowana siła wzdłużna

– czujnik siły U9B (1). Badania według tego etapu umożliwiły określenie całkowitej siły oporów toczenia kół ciągnika  $F_f$ , która była równoważona przez zarejestrowaną siłę  $F_x$  w urządzeniu pomiarowym. Współczynnik oporu toczenia  $f$  wszystkich kół ciągnika wyznaczono ze wzoru:

$$f = \frac{F_f}{Q_p + Q_t} \quad (3)$$

W ostatnim etapie badań w ciągniku MF 235 zostały zdemontowane koła przednie, a ich normalne obciążenie zostało przeniesione na urządzenie pomiarowe (rys. 2). Położenie przegubu kulistego (odległość od podłoża) ustawiono na wartość równą promieniowi badanego koła napędowego. Ciągnik badawczy był holowany na kołach napędowych przez ciągnik MF 255.



Rys. 2. Widok stanowiska przygotowanego do badań współczynnika oporu toczenia kół napędowych

Fig. 2. View of test stand prepared for research of rolling resistance coefficient of drive wheels

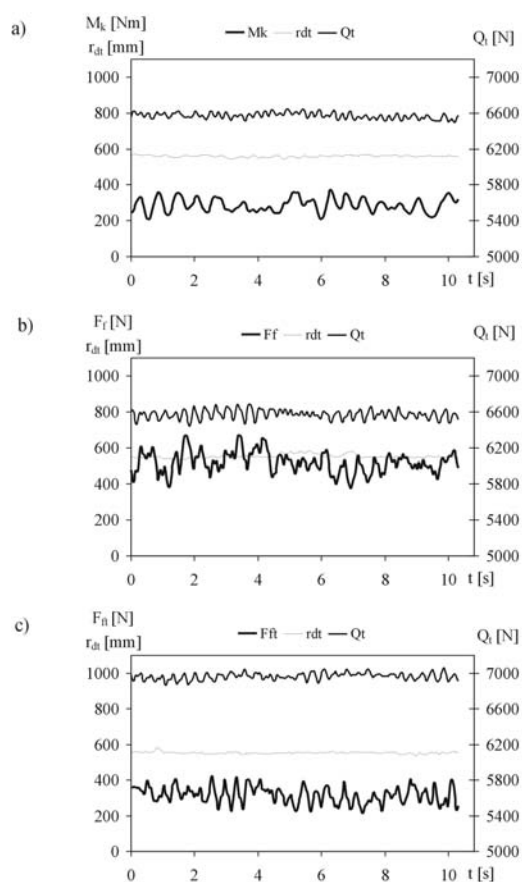
W tym przypadku zarejestrowana siła  $F_x$  była równa sile  $F_o$  przyłożonej w osi koła, a ta siła równoważyła siłę oporu toczenia koła  $F_{ft}$ . Współczynnik oporu toczenia koła napędowego określono z zależności:

$$f_t = \frac{F_{ft}}{Q_t} \quad (4)$$

Opracowana metodyka badań i przeprowadzenie pomiarów umożliwiło wyznaczenie sił oporów toczenia kół badanego ciągnika.

### Wyniki badań i ich analiza

Rejestrację mierzonych wielkości przeprowadzono za pomocą aparatury pomiarowej z częstotliwością 50 Hz. Przykładowe przebiegi zarejestrowanych wielkości przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Zarejestrowane w funkcji czasu wielkości badanego ciągnika: a) własny napęd, b) przetaczany na wszystkich kołach, c) przetaczany na kołach napędowych

Fig. 3. Investigated tractor performance registered in the function of time: a) own drive, b) rolled on all wheels, c) rolled on drive wheels

Zestawienie przykładowych wyników badań na odkształcalnym podłożu o całkowitej masie ciągnika 2060 kg przedstawiono w tabeli 1.

*Tabela 1. Zestawienie wyników badań na odkształcalnym podłożu o masie ciągnika 2060 kg*

*Table. 1. Comparison of research results on deformable surface of 2060 kg mass tractor*

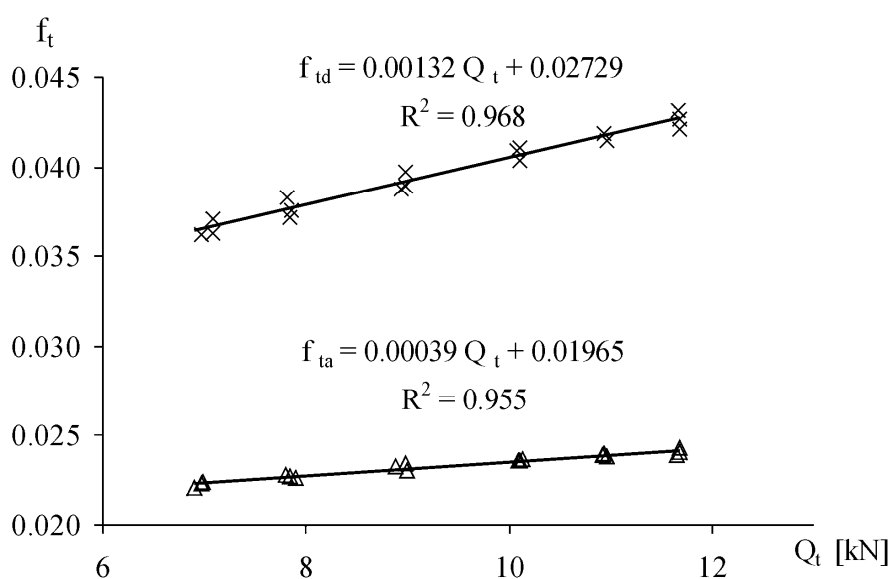
Sposób przejazdu	Nr przejazdu	Wartość średnia			Odchylenie standardowe			Średni współczynnik oporu toczenia
		$M_k$ [Nm]	$Q_t$ [N]	$r_{dt}$ [mm]	$M_k$	$Q_t$	$r_{dt}$	f
Napęd własny	1	287,7	6571	555,9	37,7	32,3	5,6	0,0507
	2	283,6	6568	554,3	32,4	42,1	8,3	
	3	292,3	6584	556,2	35,5	38,2	6,1	
Holowany na wszystkich kołach		$F_f$ [N]	$Q_t$ [N]	$r_{dt}$ [mm]	$F_f$	$Q_t$	$r_{dt}$	f
	1	513,4	6570	556,1	58,9	48,7	10,4	0,0509
	2	508,2	6582	555,8	52,3	53,2	8,9	
3	515,3	6573	555,2	55,2	51,8	9,5		
Holowany na kołach napędowych		$F_{ft}$ [N]	$Q_t$ [N]	$r_{dt}$ [mm]	$F_{ft}$	$Q_t$	$r_{dt}$	$f_t$
	1	276,1	6965	553,0	46,4	36,9	5,3	0,0396
	2	283,3	6978	552,8	48,3	33,1	7,2	
3	275,2	6964	553,7	45,5	39,5	9,3		

Współczynniki oporu toczenia podczas napędu własnego i holowania ciągnika na czterech kołach mają zbliżone wartości i odpowiednio wynoszą 0,0507; 0,0509. Natomiast wartość współczynnika oporu toczenia na dwóch kołach napędowych jest niższa i wynosi 0,0396.

Przejazd ciągnika z własnym napędem (przy zerowej sile uciągu) i holowanie go (w obu przypadkach na wszystkich kołach) umożliwia wyznaczenie wartości współczynnika oporu toczenia kół ciągnika. Określony za pomocą pierwszego i drugiego sposobu przejazdu współczynnik ma zbliżoną wartość, ze względu na różne (odmienne) normalne obciążenie osi kół. Powyższe sposoby umożliwiają wyznaczenie współczynnika oporu toczenia wszystkich kół ciągnika.

Trzeci sposób przejazdu z wykorzystaniem urządzenia pomiarowego, to metoda autora niniejszej pracy, która pozwala na określenie (niezależnie od kół przednich)

współczynnika oporu toczenia napędowych kół zamontowanych na ciągniku badawczym w warunkach naturalnych. Określony za pomocą tej metody współczynnik oporu toczenia napędowego koła 11.2-28 6PR ciągnika rolniczego w zależności od normalnego obciążenia na podłożu odkształcalnym i nieodkształcalnym przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Zależność współczynników oporu toczenia koła napędowego od normalnego obciążenia na podłożu odkształcalnym  $f_{td}$  i nieodkształcalnym  $f_{ta}$

Fig. 4. Dependence of rolling resistance coefficients of a drive wheel over normal load on not deformable  $f_{ta}$  and deformable  $f_{td}$  surface

Zaprezentowana metoda wraz z urządzeniem pomiarowym po niewielkich adaptacjach (montaż przegubu kulistego) może być wykorzystana do innych typów ciągników (wyposażonych w inne rodzaje opony) w celu określenia współczynników oporu toczenia napędowych kół w warunkach polowych.

## Wnioski

1. Zaprezentowana metoda i urządzenie umożliwiają określenie współczynnika oporu toczenia koła napędowego ciągnika w zależności od obciążenia normalnego tego koła.



2. Uzyskane wyniki wskazują, że na podłożu odkształcalnym obserwuje się wyraźnie większy wpływ normalnego obciążenia na wartość współczynnika oporu toczenia, niż na podłożu nieodkształcalnym.
3. Wartości współczynnika oporu toczenia koła napędowego w zależności od normalnego obciążenia ma charakter liniowy.

### **Bibliografia**

Bekker M. G. 1960. *Off-the-Road Locomotion*. Ann Arbor, Mich.: University of Michigan Press.

Kolator B. 2005. *Metodyka badań procesu funkcjonowania agregatu ciągnikowego w aspekcie poprawy wskaźników efektywności jego pracy*. (Praca złożona do druku w Inżynierii Rolniczej).

Muro T. 1997. Comparison of the traffic performance of a two-axle four wheel drive (4WD), rear wheel drive (RWD), and front wheel drive (FWD) vehicle on loose sandy sloped terrain. *J. Terramechanics* Vol.34 nr 1.

Okello J.A. 1992. Prediction of the force distribution between the soil and a pneumatic wheel. *J. Agricult. Eng. Res.* Vol.51 nr 4.

Sharma A.K., Pandey K.P. 1997. Modelling power requirement for traction tyres with zero sinkage. *J. Terramechanics* Vol.34 nr 1.

Shmulevich I., Osetinsky A. 2003. Traction performance of a pushed/pulled drive wheel. *J. Terramechanics* Vol.40 nr 1.

Żebrowski J. 2004. *Metodyka określania efektywności funkcjonowania ciągnika terenowego*. Prace naukowe, Mechanika z. 206, PW Warszawa.

## **THE METHOD OF TRACTOR DRIVE WHEEL ROLLING RESISTANCE COEFFICIENT ESTIMATION**

### **Summary**

The method and equipment for tractor drive wheel rolling resistance coefficient estimation are presented. Drive wheels (of 11.2-28 6PR type) of an agricultural were the subjects of the research. The research was carried out by the measuring device, designed and built by the author. The dependencies between the rolling resistance coefficient of a drive wheel of a tractor and normal load on not deformable and deformable subsoil were determined.

**Key words:** method, rolling resistance coefficient, drive wheel, research test stand