

VLIV STYČNÉ PLOCHY PNEUMATIK NA TAHOVÉ VLASTNOSTI TRAKTORU

P. Sedlák, F. Bauer

Došlo: 12. září 2003

Abstract

SEDLÁK, P., BAUER, F.: *Effect of contact surface of tyres on tractor pulling properties*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2004, LII, No. 1, pp. 209-216

The paper presents a comparison of pulling properties of a prototype of three-axle tractor 6K6 with the classical tractor John Deere 8400. To compare differences in the contact surface of wheels the authors measured the area of tyres of tested tractors. It was found out that the contact surface of tyres of 6K6 tractor was larger by 62 % than that of John Deere 8400. Results of measurements performed on a stubble indicated that the drawbar pull force of 6K6 tractor was 70 kN while that of 4K4 only 58 kN (slippage of wheels was in both cases 40 %). It was concluded that although the weights of both tractors were comparable, a greater drawbar pull force of 6K6 tractor resulted from a larger contact area of tyres with soil surface. The maximum drawbar power of 6K6 tractor was measured at the speed ranging from 13 to 17 km.h⁻¹. In case of John Deere 8400 tractor, the maximum drawbar power was recorded at speeds of 9 to 13 km.h⁻¹.

Wheels of the prototype 6K6 tractor were tired with tyres 480/70 R 30. The equation of slippage curve was derived on the base of measured results and the coefficient of adhesion.

tractor, drawbar pull force, drawbar power, wheel slippage

Tahové vlastnosti traktoru určují především podmínky styku hnacích kol s povrchem terénu. Kvalita těchto podmínek rozhoduje o schopnosti přenést výkon motoru na pracovní stroj a rozhoduje o účinnosti transformace energie spotřebovaného paliva na užitečnou práci vykonanou připojeným strojem. Tahová síla traktoru závisí na zatížení hnacích kol, které je ale limitováno utužováním půdy. Jinou možností zvýšení tahové síly je zvětšení styčné plochy kol podvozku s povrchem pozemku. Při stejném zatížení je možno vyvinout vyšší tahovou sílu při nízkém měrném tlaku na půdu, což je využíváno u pásových podvozků. Proti kolovému má pásový podvozek celou řadu nevýhod, pro které je jeho použití u traktorů omezené. Určitým kompromisem je použití většího počtu hnacích náprav, které zajistí zvětšení plochy styku kol s terénem a zachovají výhody kolového podvozku. Přenosem energie na povrch půdy kolovým podvozkem se za-

bývala řada autorů. V našem příspěvku vycházíme především z prací Grečenka (1994 a 1985), Semetka a kol. (1986), Prielca a Semetka (2003), Drabanta a Petranského (1987 a 1990), Koska, Netika (1969) a Reniuse (1987). V předloženém příspěvku uvádíme výsledky měření tahových charakteristik u prototypu třínápravového traktoru (6K6) v porovnání s klasickým traktorem John Deere 8400.

MATERIÁL A METODA

Teoretický rozbor

Velikost tahové síly traktoru závisí především na celkové hnací síle, kterou jsou kola traktoru schopna přenést na podložku, po níž se pohybují. Celkovou hnací sílu traktoru můžeme obecně vyjádřit:

$$F_h = F_{h1} + F_{h2} + \dots + F_{hn} \text{ [kN]}, \quad (1)$$

kde: F_{h1-n} – hnací síla kol na jednotlivých nápravách [kN].

Přenos síly z kola na podložku ovlivňuje styčná plocha pneumatik S_o s povrchem terénu. Tato plocha má podle typu pneumatiky, huštění, dezénu a dalších parametrů eliptický až rovnoběžníkový tvar. O velikosti síly přenesené kolem na povrch pozemku rozhodují také vlastnosti půdy. Na přenosu tečné síly se podílí především smyková pevnost půdy τ_m definovaná vztahem:

$$\tau_m = c + q_s \cdot \operatorname{tg} \phi \quad [\text{kPa}], \quad (2)$$

kde: c – soudržnost (koheze) půdy [kPa]

q_s – střední kontaktní tlak [kPa]

ϕ – úhel vnitřního tření [°].

Střední kontaktní tlak pneumatik na podložku je roven:

$$q_s = \frac{G_t}{S_o} \quad [\text{kPa}], \quad (3)$$

kde: G_t – tíha traktoru [kN].

Ze vztahu (2) je tedy zřejmé, že při zvyšování kontaktní plochy pneumatik klesá smykové napětí půdy, což dovozuje při stejném smykovém napětí přenést na povrch pozemku vyšší tečnou (hnací) sílu. Styčnou plochu pneumatiky S_o je pro zjednodušení možné nahradit plochou tzv. náhradního obdélníku o stranách b a l .

Prokluz kol můžeme potom vyjádřit z elementární hnací síly dF_h ve styčné ploše S_o a její integrací po délce l styčné plochy pomocí vztahu:

$$F_h = \int_0^l dF_h = \int_0^l \tau \cdot b \, dx = b \int_0^l \tau \cdot dx \quad [\text{kN}]. \quad (4)$$

Při analytickém řešení s využitím bilineární aproximace získáme konečný vztah pro určení prokluzu ve tvaru:

$$\delta = \frac{\delta_k}{2\mu_{\max}} \cdot \frac{3\mu_{\max}\mu - 2\mu}{\mu_{\max} - \mu} \quad [-], \quad (5)$$

kde: δ_k – charakteristický prokluz [-]

$$\delta_k = \frac{j_k}{l} \quad [-] \quad (6)$$

j_k – charakteristická deformace podložky [m]

$\mu_{\max}$ – součinitel záběru při $\delta = \infty$ [-]

μ – součinitel záběru [-]

$$\mu = \frac{F_h}{G_t} \quad [-] \quad (7)$$

Vztah (5) vystihuje fyzikální podstatu prokluzu a činitele, kteří jej ovlivňují. Z výše uvedeného je

mimo jiné zřejmé, že zvýšení hnací síly vozidla a snížení prokluzu ovlivňuje délka styčné plochy kol s terénem.

Tahová síla kterou vyvine traktor se určí ze vztahu:

$$F_t = F_h - F_v = F_h - f \cdot G_t [\text{kN}], \quad (8)$$

kde: F_h – hnací síla [kN]

F_v – valivý odpor [kN]

f – součinitel odporu valení [-].

Měření

Pro ověření vlivu styčné plochy pneumatik na tahové vlastnosti traktoru jsme realizovali porovnávací měření prototypu traktoru s podvozkem 6K6 a traktoru klasické konstrukce 4K4 John Deere 8400. Před vlastním měřením bylo provedeno vážení obou traktorů a pomocí přídavných závaží byla jejich hmotnost upravena tak, že rozdíl jejich hmotností činil pouze 125 kg.

Porovnání celkové plochy, kterou se stýkají kola obou měřených traktorů s podložkou, jsme získali měřením plochy otisku pneumatik. Zjišťování otisku pneumatiky bylo provedeno na rovné betonové ploše. Pod kolo zvednuté nápravy byla umístěna podložka, dezén pneumatiky byl natřen barvou a při postupném otáčení a spouštění nápravy jsme získali ohraničenou plochu styku pneumatiky s podložkou. Zjištění plochy otisku bylo provedeno v biometrické laboratoři LDF MZLU sejmutím obrazu otisku digitálním fotoaparátem do paměti počítače. Pro vyhodnocení obrazu byl použit program pro měření ploch LUCIA – G firmy Laboratory Universal Computer Image Analysis.

Měření tahových vlastností bylo prováděno v polních podmínkách na strništi po sklizni ječmene na pozemku zemědělského podniku Farma DVOŘÁK v katastru obce Jeníčkova Lhota, název pozemku „Trhovské“, plocha 100 ha, půda hlinitopísčitá, průměrná vlhkost dle hmotnosti byla 13,2 %, průměrná objemová hmotnost vysušené půdy v hloubce 5 cm zjišťovaná metodou Kopeckého válečků, modifikace Nováka, byla 1,42 g/cm³. Všechna měření probíhala za slunečního počasí, teplota vzduchu se pohybovala v rozmezí 24 – 32 °C. Na pozemku byla vybrána část na rovině, kde byl vyměřen 50 m dlouhý měřicí úsek. Před měřicím úsekem byl ponechán dostatečně široký pás pozemku pro ustálení parametrů měřicí soupravy. Při každém měření jela kola traktoru vždy v nové stopě po nepřejetém povrchu pozemku.

Měřicí souprava sestávala z měřeného traktoru a nákladního automobilu Tatra 815 AGRO s přívěsem PS 1010 H, která vyvozovala brzdovou sílu. Obě vozidla byla spojena lanem, ve kterém byl umístěn tenzometrický snímač síly Hottinger typ U2A. Pro měření tahových sil byla použita čtyřkanálová tenzometrická měřicí aparatura Spider 4 firmy HBH Hottinger

připojená ke snímači a měřicímu počítači. Měřené hodnoty tahové síly byly ukládány s frekvencí 10 Hz do paměti počítače. Vlastní zkouška probíhala tak, že měřený traktor táhl pomocí lana automobil vyvozu-jící konstantní brzdící sílu měřenou snímačem, viz obr. 1. Při průjezdu vytýčeným úsekem byly údaje ze snímače ukládány do paměti počítače. K měřicí aparatuře byl také připojen radar RDS TGSS namontovaný na nárazníku brzdícího automobilu pro měření skutečné rychlosti zkušební soupravy. Teoretická rychlost traktoru byla zjišťována měřením otáček motoru a přes celkový převodový poměr jednotlivých převodových stupňů byla stanovena rychlost. Před

zahájením zkoušek bylo provedeno cejchovní měření pro určení teoretických rychlostí traktoru v měřeném rozsahu převodových stupňů. Z obou takto naměřených rychlostí byl vypočten prokluz kol traktoru. Pro kontrolu byla současně při průjezdu soupravy měřicím úsekem změřena dráha ujetá na pět otáček kol měřeného traktoru. Stejným způsobem byla změřena dráha u nezatíženého samostatného traktoru pro stanovení prokluzu. Při všech zkouškách byly zařazeny uzávěrky nápravových diferenciálů u traktoru 6K6 první a druhé nápravy, u třetí nebyl diferenciál uzavřen. U traktoru 4K4 byly uzavřeny diferenciály na obou nápravách.



1: Měření tahové síly traktoru JD 8400

Současně byla měřena spotřeba paliva na průjezd úsekem. Pro měření spotřeby paliva traktoru byl použit průtokoměr FLOWTRONIC 206, doplněný o Flowjet-Ventil 4703, který zajišťoval chlazení paliva dopravovaného do vstřikovacího čerpadla. Všechny zkoušky probíhaly s nastavenou plnou dodávkou paliva. U každého traktoru byly měřeny tahové charakteristiky při vybraných rychlostních stupních. Bylo dbáno na to, aby na každý rychlostní stupeň bylo naměřeno v celém rozsahu tahových sil dostatek hodnot pro sestrojení tahové charakteristiky. Pro nakreslení tahových charakteristik byl pro každý průjezd soupravy měřicím úsekem vypočten prokluz kol traktoru pomocí vztahu:

$$\delta = \left[1 - \frac{v}{v_t} \right] \cdot 100 \quad [\%], \quad (9)$$

kde: v – skutečná rychlost soupravy [m/s]
 v_t – teoretická rychlost soupravy [m/s].

Dále byl vypočten dosažený tahový výkon:

$$P_t = F \cdot v \quad [\text{kW}], \quad (10)$$

kde: F – naměřená průměrná tahová síla [kN].

VÝSLEDKY A DISKUSE

Vyhodnocení plochy otisku pneumatik

Výsledky měření plochy otisků pneumatik namontovaných na zkoušených traktorech jsou uvedeny v tabulce I. Přesnost měření je doložena chybou měření uvedenou pod tabulkou, která se pohybuje pro všechny vzorky hluboce pod 1 %. Otisky měřených pneumatik jsou uvedeny na obr. 2 až 4. Z tabulky I je zřejmé, že největší plocha otisku byla naměřena u pneumatiky na traktoru 6K6 huštěné tlakem 130 kPa. Celková plocha, kterou se stýkají pneumatiky traktoru s podložkou, je při šesti hnacích kolech 1,38 m². U traktoru JD 8400 byl na přední nápravě použit stejný rozměr pneumatik, ale při vyšším tlaku 150 kPa byla naměřena menší plocha. Na zadní nápravě, při větším průměru kola, nebyla naměřena větší plocha. Celková styčná plocha pneumatik traktoru JD 8400 byla 0,85 m². Z uvedených výsledků plyne, že ve srovnání s traktorem JD 8400 je styčná plocha kol prototypu traktoru 6K6 o 62,2 % větší. V praxi to znamená, že traktor 6K6 při stejné hmotnosti vyvozuje nižší měrný tlak na půdu a hlavně je schopen přenést větší hnací sílu. Tato skutečnost se také plně potvrdila při níže uvedených tahových zkouškách.

I: Výsledky měření otisku pneumatik

Vzorek č.	Traktor	Náprava	Pneumatika	Plocha otisku	Tlak
				[cm ²]	[kPa]
1	JD 8400	Přední	Barum 480/70 R 30	1995.1	150
2	6K6	Všechny	Barum 480/70 R 30	2300.7	130
3	JD 8401	Zadní	Barum 20.8 R 42	2259.7	190

Chyba měření: lineárně +/- 0.12 cm
 plošně: +/- 0.03 cm²



2: Otisk přední pneumatiky traktoru JD 8400



3: Otisk pneumatiky prototypu traktoru 6K6



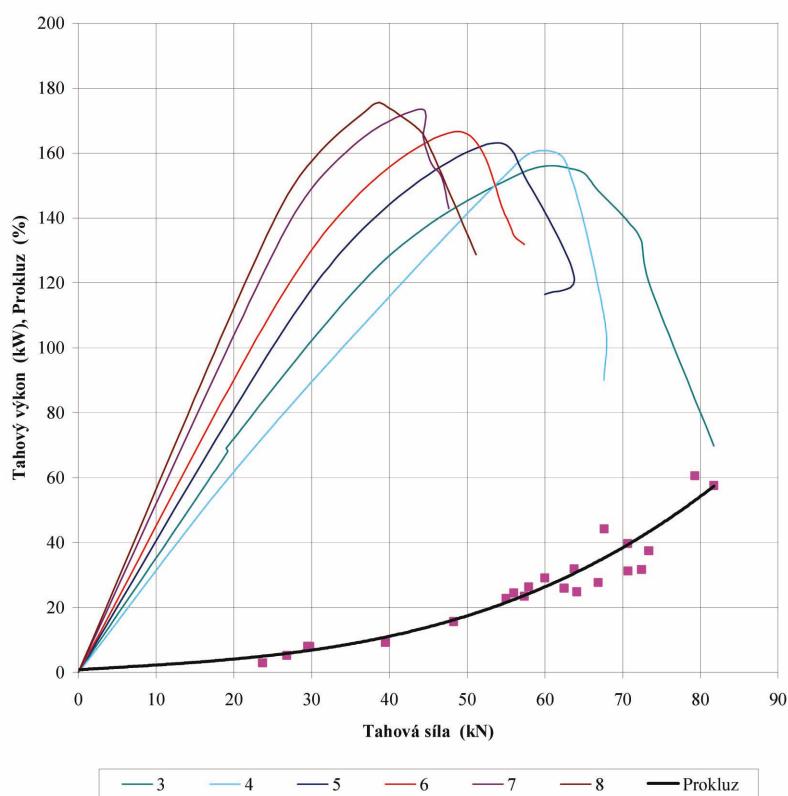
4: Otisk zadní pneumatiky traktoru JD 8400

Vyhodnocení tahových vlastností

Výsledky měření tahových vlastností jsou vynešeny do tahových charakteristik na obr. 5 a 6. V charakteristice jsou vyneseny závislosti tahového výkonu a prokluzu kol na tahové síle při jednotlivých zařazených převodových stupních.

Jak je patrné z grafu na obr. 5, u prototypu traktoru

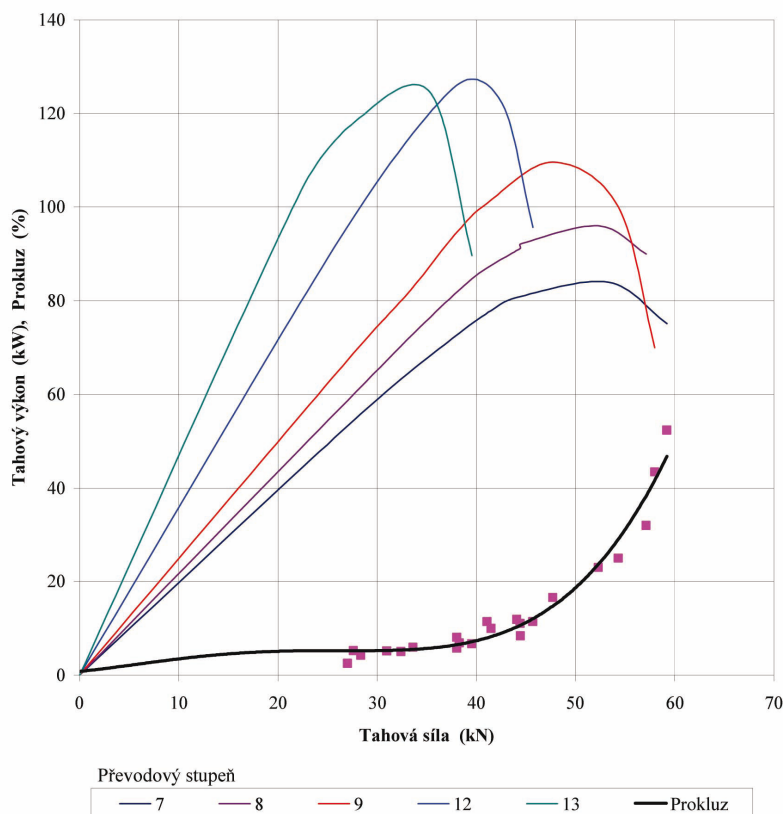
6K6 proběhly tahové zkoušky při zařazených šesti převodových stupních. Maximální naměřená tahová síla u třinápravového traktoru byla 81,75 kN a prokluzu 57,6 %. Maximální tahový výkon 175,4 kW byl dosažen při jezdové rychlosti 16,25 km/h. Rychlost traktoru při zkouškách se pohybovala v rozmezí 3,07 – 19,8 km/h.



5: Tahová charakteristika traktoru 6K6 na strništi

Tahové zkoušky u traktoru JD 8400 proběhly na pět převodových stupňů. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou vyneseny v grafu na obr. 6. Maximální tahová síla 59,2 kN byla dosažena při prokluzu 52,3 %. Nejvyšší naměřený výkon 126 kW byl dosažen při jezdové rychlosti 11,9 km/h. Pracovní rychlost se během tahových zkoušek pohybovala od 4,34 km/h do 16,7 km/h.

Jak je zřejmé z tahové charakteristiky uvedené na obr. 5, dosahuje traktor 6K6 poměrně ve velkém rozmezí tahových sil od 30 kN do 70 kN pro praxi využitelný tahový výkon. Pro tahovou sílu 70 kN prokluz nepřesáhl hodnotu 40 %. Traktor John Deere 8400 (viz obr. 6) dosáhl při prokluzu 40% maximální tahovou sílu 58 kN, což je o 12 kN méně. Pro praxi využitelný tahový výkon je v rozmezí sil 28 až 58 kN.



6: Tahová charakteristika traktoru JD 8400 na strništi

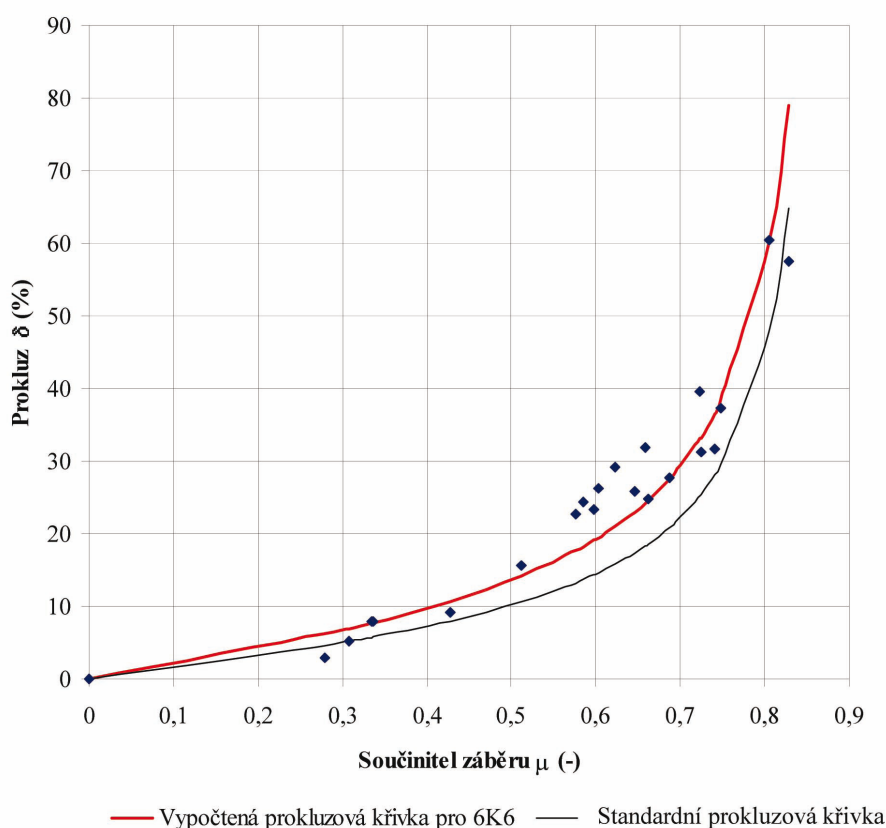
Uvedenou vyšší tahovou sílu prototypu 6K6 při srovnatelné tíze obou traktorů lze odůvodnit větší styčnou plochou hnacích kol, která je ve srovnání s trakorem John Deere o 62 % vyšší. Maximální tahový výkon u traktoru John Deere 8400 $P_{t,max} = 126,04$ kW s prokluzem 5,8 % byl naměřen při rychlosti 11,93 km.h⁻¹. Traktor v tomto případě pracoval s nejvyšším využitím výkonu motoru. Součinitel využití tahového výkonu je 0,606. U traktoru 6K6 byl naměřen nejvyšší výkon $P_{t,max} = 175,4$ kW při prokluzu 9,8 % a rychlosti 16,25 km.h⁻¹. Součinitel využití tahového výkonu je v tomto případě 0,585.

Z naměřených hodnot prototypu traktoru 6K6,

s pneumatikami Barum 480/70 R 30 s huštěním $p = 130$ kPa na strništi s hlinitopísčitou půdou, byl vyhodnocen prokluz v závislosti na součiniteli záběru μ . Z výsledků měření bylo dosažením charakteristických hodnot do rovnice (5) odvozeno analytické vyjádření prokluzové křivky ve tvaru:

$$\delta = \frac{0,172 \cdot \mu - 0,128 \cdot \mu^2}{0,898 - \mu} [-]. \quad (11)$$

Graficky je odvozená závislost vynesena na obr. 7 spolu se standardní prokluzovou křivkou uváděnou v literatuře (Grečenko, 1963; Semeťko a kol., 1981) pro prokluz kolového traktoru na strništi. Statistic-



7: Průběh prokluzu v závislosti na součiniteli záběru

kým vyhodnocením byla zjištěna velká korelace mezi naměřenými údaji a vypočtenými daná korelačním koeficientem $r = 0,892$. Vzhledem k tomu, že na průběh prokluzu v závislosti na součiniteli záběru má vliv celá řada činitelů jako je konstrukce pneumatiky, huštění, druh půdy, po které se pneumatika pohybuje, její vlhkost a další činitelé, je možno konstatovat, že odvozená prokluzová křivka dobře koresponduje s křivkou standardního prokluzu.

Na základě výsledků provedených měření tahových charakteristik obou porovnávaných traktorů na strništi je možno konstatovat, že traktor 6K6 dosahuje ve velkém rozmezí tahových sil od 30 kN do 70 kN pro praxi využitelný tahový výkon. Při tahové síle 70 kN prokluz kol nepřesáhl hodnotu 40 %. Traktor John Deere při prokluzu 40 % dosáhl tahovou sílu 58 kN. Pro praxi využitelný tahový výkon byl naměřen v rozmezí sil (28 až 58) kN.

Uvedenou vyšší tahovou sílu traktoru 6K6 lze odůvodnit větší styčnou plochou hnacích kol, nebo přesněji vyjádřeno větší délkou styčné plochy kol s terénem (viz vztah (5) a (6)), která je ve srovnání s traktorem John Deere o 62 % vyšší. Pokles středního

kontaktního tlaku q_s vede také k poklesu smykového napětí v půdě (viz vztah (2)), což se projeví v nižším prokluzu kol při stejné tahové síle, nebo vyšší tahové síle při stejném prokluzu.

Prototyp traktoru 6K6 na základě naměřených hodnot dosahuje maximální tahový výkon při jezdové rychlosti v rozmezí 13 až 17 km.h⁻¹. Traktor John Deere dosahuje maximální tahový výkon při jezdové rychlosti v rozmezí (9 až 13) km.h⁻¹. Vyšší tahový výkon traktoru 6K6 je dán vyšším výkonem motoru. Pro dosažení maximální tahové účinnosti při běžných agrotechnických operacích prováděných soupravou traktoru s pracovním strojem jsou rychlosti nad 15 km.h⁻¹ již příliš vysoké a motor traktoru není možno efektivně vytížit. Přesun maxima tahového výkonu do oblasti nižších jezdových rychlostí použitím motoru s menším výkonem by zajistilo snížení měrné spotřeby paliva u většiny polních prací a vedlo by ke zvýšení efektivnosti práce traktoru.

Nespornou velkou výhodou zkoušeného prototypu traktoru 6K6 je nízký měrný tlak na půdu, což snižuje riziko nežádoucího ztuhnutí půdy.

SOUHRN

V příspěvku je uvedeno porovnání tahových vlastností prototypu třínápravového traktoru 6K6 s klasickým traktorem John Deere 8400. Pro porovnání rozdílu styčné plochy kol bylo provedeno měření otisku pneumatik obou traktorů. U traktoru 6K6 byla naměřena o 62 % větší styčná plocha pneumatik než u traktoru John Deere 8400. Z naměřených tahových charakteristik obou traktorů na strništi je patrné, že při 40% prokluzu kol vyvinul traktor 6K6 tahovou sílu 70 kN, kdežto traktor 4K4 pouze 58 kN. Větší tahová síla traktoru 6K6 při srovnatelné hmotnosti obou měřených traktorů je dána větší styčnou plochou kol s povrchem terénu. Traktor 6K6 dosahuje maximální tahový výkon při jezdové rychlosti v rozmezí 13 až 17 km.h⁻¹. Traktor John Deere dosahuje maximálního tahového výkonu při jezdové rychlosti v rozmezí 9 až 13 km.h⁻¹.

Z naměřených hodnot prototypu traktoru 6K6 s pneumatikami 480/70 R 30 byl vyhodnocen prokluz v závislosti na součiniteli záběru a z výsledků měření byla odvozena rovnice prokluzové křivky.

traktor, tahová síla, tahový výkon, prokluz kol

Příspěvek byl vypracován na základě výsledků získaných při řešení projektu VAZV QC 0009 „Objektivizace normativů spotřeby pohonných hmot a energie na výrobu zemědělských produktů a tvorba jejich databáze“.

LITERATURA

- DRABANT, Š., PETRANSKÝ, I., ŽIKLA, A. (1987): Výzkum progresivnějších metod v tahových zkouškách traktorů. *Acta technol. agric. Univ. agric. Nitra, Příroda Bratislava*, 1987, 18, s. 55-71.
- DRABANT, Š., PETRANSKÝ, I. (1990): Vliv nestálého zařazování na prokluz traktora Z-12045. *Acta technol. agric. Univ. agric. Nitra, Příroda Bratislava*, 1990, 31, 12 s.
- GREČENKO, A. (1963): Kolové a pásové traktory. SZN Praha 1963, 402 s.
- GREČENKO, A. (1994): Vlastnosti terénních vozidel. VŠZ v Praze, 1994, 118 s.
- KOSEK, J., NETÍK, O. (1969): Vliv dvojité montáže hnacích pneumatik na tahové vlastnosti traktorů v podmínkách sklizně cukrovky. *Zemědělská technika*, 15, 1969,(9), s. 493 –498.
- PRIECEL, J., SEMETKO, J. (2003): Teoretické principy přenosu hnacích sil pásov, pásových podvozků. *Acta technologica agriculturae*, 6, 2003, (1), s. 14-16.
- RENIUS, T. (1987): *Traktoren Technik und ihre Anwendung*. München, BLV Verlagsgesellschaft 1987, 191 s.
- SEMETKO, J., A KOL. (1986): *Mobilné energetické prostriedky*. *Příroda Bratislava*, 1986, 453 s.

Adresa

Ing. Pavel Sedlák, CSc., Doc. Ing. František Bauer, CSc., Ústav základů techniky a automobilové dopravy, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika