

Jerzy Żebrowski* Zbigniew Żebrowski **

PORÓWNANIE WPŁYWU SKRZYNEK BIEGÓW TYPU „POWERSHIFT” I HYBRYDOWYCH NA WŁAŚCIWOŚCI TRAKCYJNE CIĄGNIKA

Streszczenie. Celem pracy było porównanie dwóch ciągników wyposażonych w skrzynki „powershift” i hybrydową pod kątem uzyskiwanych sił napędowych i sprawności układu napędowego w zależności od prędkości jazdy.

Słowa kluczowe: ciągnik, skrzynki biegów „powershift” i hybrydowe, sprawność układu napędowego, siła napędowa

WSTĘP

Prędkości, z jakimi ciągnik rolniczy wykonuje prace mają wartości: od poniżej 1 km/h, przez 4–12 km/h, przy głównych pracach wykonywanych przeważnie z największymi siłami uciągu (do których pokonywania przystosowany jest dany ciągnik), do 30 lub 40 km/h, a nawet 50 km/h, w zależności od konstrukcji ciągnika i przepisów drogowych. Siły działające na ciągnik również zmieniają się w szerokim zakresie. Zależą one od rodzaju prac i warunków, w jakich porusza się agregat ciągnikowy, dlatego siła uciągu może zmieniać się od wartości zerowej, np. przy pracy z zawieszonym opryskiwaczem, do maksymalnej wartości wynikającej z przyczepności kół do podłoża, np. podczas orki. Wymagane prędkości jazdy przy różnych siłach obciążających ciągnik można osiągnąć stosując układ napędowy o odpowiedniej rozpiętości i liczbie przełożeń. W celu uniknięcia zatrzymywania się ciągnika, zmiana przełożenia powinna odbywać się odpowiednio szybko (w przypadku stopniowych skrzynek biegów) lub w sposób ciągły (skrzynki bezstopniowe).

Dlatego też w ciągnikach, uwzględniając również trwałość jak i sprawność układu napędowego, stosuje się coraz szerzej skrzynki stopniowe przełączane pod obciążeniem, określane jako „powershift”, i najnowszej generacji skrzynki hybrydowe, które umożli-

* Dr inż. Jerzy Żebrowski, Katedra Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

** Dr inż. Zbigniew Żebrowski, Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich, Politechnika Warszawska w Warszawie

wiają bezstopniową zmianę ich przełożenie. [Deere 1992], [Case IH CVT 1998] [Sauer 1998], [Aitzetmüller 1999], [Pohlenz 1999], [Claas Xerion], [Fendt].

SKRZYNKI HYBRYDOWE

Skrzynki hybrydowe [Lang i in. 1998, Renius 1999, Szydelski 1998, 1999], składają się z równolegle połączonych: przekładni hydrostatycznej o zmiennym bezstopniowo przełożeniu i stopniowej przekładni mechanicznej. Działanie tych skrzynek polega na tym, że moc dostarczana z silnika rozdziela się na dwa strumienie płynące równolegle przez przekładnie mechaniczną i hydrostatyczną. Proporcja rozdziału strumienia mocy zależy od nastawionego przełożenia przekładni hydrostatycznej i włączonego przełożenia przekładni mechanicznej. Strumienie te łączą się na wale sumującym, który jest wałem wyjściowym skrzynki przekładniowej. W związku z tym zmienia się także w zależności od przełożenia sprawność skrzynki przekładniowej. Biegi przekładni stopniowej w zależności od rozwiązania konstrukcyjnego albo określają zakresy prędkości jazdy (np. Fendt Vario – dwa zakresy: prace robocze i prace transportowe) [Fendt, Żebrowski i Żebrowski 2003], albo służą do uzyskania odpowiedniej rozpiętości przełożenia, które można zmieniać bezstopniowo. Polega to na tym, że stopniowa przekładnia (planetarna) przełączana automatycznie ma tak dobrane przełożenia, że najmniejsza wartość przełożenia skrzynki odpowiada największemu przełożeniu skrzynki na biegu wyższym. Ciągnik Xerion firmy Claas posiada czterobiegową planetarną skrzynkę przekładniową połączoną szeregowo z dwubiegową przekładnią w taki sposób, że uzyskuje się w sumie osiem przełożeń [Claas Xerion], [Seeger 2001:]. Skrzynki „Eccom transmission” firmy ZF [Pohlenz 1999] i Steyr S-Matic firmy Steyr-Daimler-Puch AG [Aitzetmüller 1998, Case IH CVT] mają czterobiegowe (ale różne) planetarne skrzynki przekładniowe [Lang i in. 1998].

CEL I ZAKRES PRACY

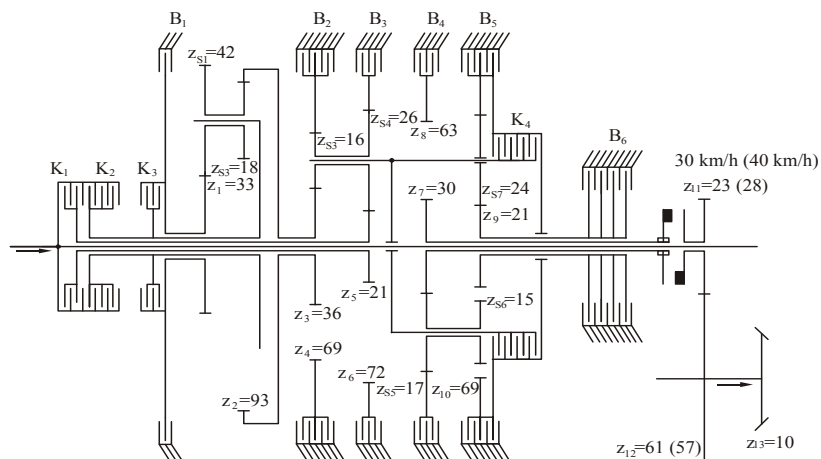
W celu określenia wpływu dwóch rodzajów rozwiązań konstrukcyjnych skrzynek na pewne właściwości trakcyjne ciągnika porównano ze sobą:

- ciągnik John Deere 7810 wyposażony w dziewiętnastobiegową skrzynkę „powershift” (rys. 1) i silnik o mocy nominalnej 175 kW, osiąganey przy prędkości obrotowej 2100 obr/min,
- ciągnik Fendt Favorit Vario 924 wyposażony w hybrydową skrzynkę o dwóch zakresach przełożeń (rys. 2) i silnik o mocy 176 kW, osiąganey przy prędkości obrotowej 2150 obr/min.

Pod uwagę wzięto zmianę siły napędowej i sprawności układu napędowego w funkcji prędkości teoretycznej przy obciążeniu ciągnika siłą uciagu, powodującą wykorzystywanie nominalnej mocy silnika w całym zakresie zmian prędkości jazdy.

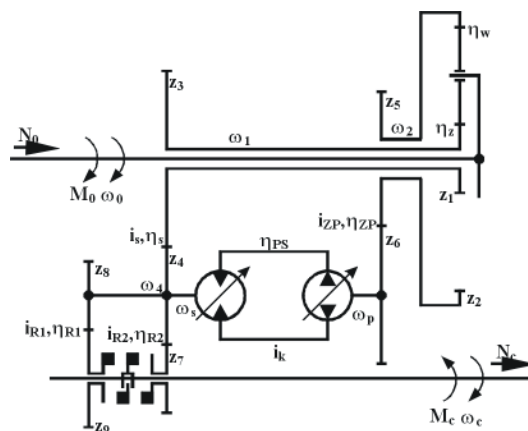
W celu określenia odpowiednich zależności, wyznaczono dla skrzynki „powershift” przełożenia i sprawności na poszczególnych biegach (uwzględniając przenoszenie mocy przez poszczególne szeregi planetarne ruchem unoszenia i ruchem względnym) [Żebrowski 2002]. Dla skrzynki hybrydowej wzięto pod uwagę pierwszy zakres jej pracy (większe przełożenie dwubiegowego reduktora). Wyznaczono w zależności od przełożeń

nia przekładni hydrostatycznej przełożenie całej skrzynki hybrydowej i kierunku przepływu mocy przez skrzynkę. Na tej podstawie przy uwzględnieniu zmiany sprawności przekładni hydrostatycznej w funkcji jej przełożenia wyznaczono z kolei w zależności od tego przełożenia, sprawności całej skrzynki i układu napędowego [Żebrowski i Żebrowski 2003].



Rys. 1. Schemat planetarnej skrzynki „powershift” ciągnika John Deere 7810

Fig. 1. A draft of the planetary ‘powershift’ gearbox of a John Deere tractor 7810



Rys.2. Schemat hybrydowej skrzynki przekładniowej ciągnika Fendt Favorit Vario 924

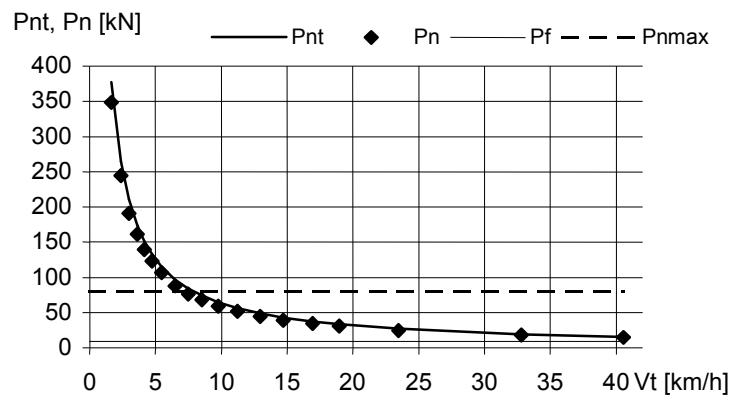
Fig. 2. A draft of the hybrid gearbox of a Fendt Favorit Vario 924 tractor

WYNIKI PRZEPROWADZONYCH ANALIZ FUNKCJONOWANIA SKRZYNEK

Na rys. 3 przedstawiono wartości teoretycznych sił napędowych i prędkości jazdy na poszczególnych biegach ciągnika ze skrzynką „powershift”. Przedstawiono także zmianę siły napędowej w zależności od prędkości jazdy przy nominalnej mocy silnika

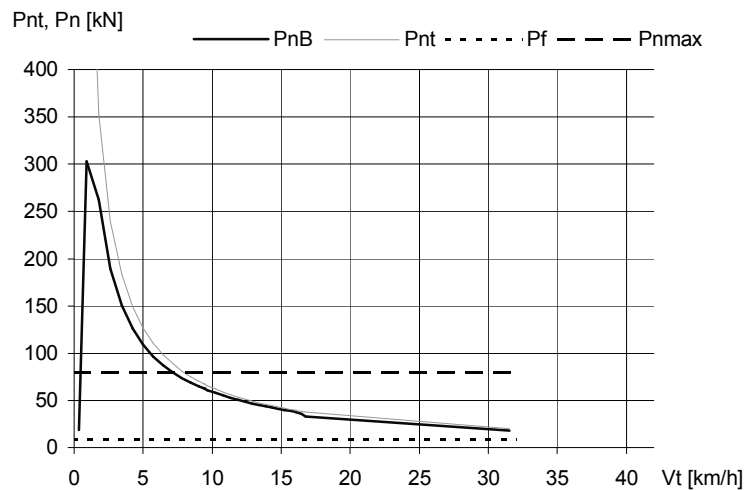
w przypadku zastosowania idealnej bezstopniowej skrzynki przekładniowej. Jak widać, siły napędowe na poszczególnych biegach są ze względu na wysokie sprawności skrzynki nieznacznie mniejsze od teoretycznych. Natomiast wartości sił napędowych podczas pracy ciągnika mogą się zawierać tylko w granicach wyznaczonych siłą oporów toczenia ciągnika i siłą wynikającą z maksymalnej wartości współczynnika siły napędzającej (współczynnika przyczepności kół napędowych do podłoża) i nacisku kół napędowych na podłoże, co zaznaczają dwie poziome linie na wykresie. W związku z tym na biegach od pierwszego do ósmego ciągnik będzie osiągał przy tej samej prędkości obrotowej silnika taką samą maksymalną wartość siły uciagu, ale w zależności od biegu przy różnych prędkościach jazdy (ma to znaczenie przy napędzaniu wałkiem odbioru mocy maszyn współpracujących z ciągnikiem). Na pozostałych biegach maksymalne wartości uzyskiwanych sił napędowych oczywiście zmniejszają się wraz ze zmniejszaniem się wartości przełożenia skrzynki.

W przypadku hybrydowej skrzynki przekładniowej (rys. 4) wartości sił napędowych podczas pracy ciągnika zawierają się (tak jak i w poprzednim przypadku) w tych samych granicach (założone te same warunki pracy) i w zakresie prędkości od około 2 do 7 km/h osiągają stałą maksymalną wartość wynikającą z przyczepności kół do podłoża. W stosunku do poprzedniego przypadku różnica siły napędowej wynikającej z mocy silnika oraz prędkości jazdy i siły przekazywanej na koła przez układ napędowy jest większa i zależy od prędkości jazdy. Przyczyną tego jest zmieniająca się sprawność skrzynki wraz ze zmianą przełożenia. Sprawność przekładni jest również przyczyną gwałtownego spadku siły napędowej po obniżeniu prędkości jazdy poniżej 2 km/h.



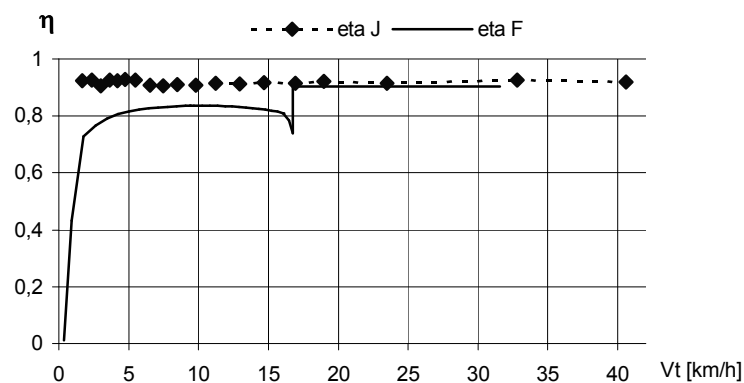
Rys. 3. Wartości rzeczywistych i teoretycznych sił napędowych oraz prędkości na poszczególnych biegach ciągnika John Deere 7810: P_{nt} – siła napędowa wynikająca z mocy silnika i prędkości jazdy, P_n – siła napędowa wynikająca z momentu silnika, przełożenia i sprawności układu napędowego oraz promienia dynamicznego kół, P_f – siła oporów toczenia, P_{nmax} – maksymalna siła napędowa wynikająca z przyczepności kół do podłoża

Fig. 3. Values of real and theoretical driving forces and speeds at particular gears of a John Deere tractor 7810: P_{nt} – driving force resulting from an engine's power and the speed of driving, P_n – driving force resulting from an engine's torque, shifting and the efficiency of the driving unit as well as the dynamic radius of the wheels, P_f – force of the rolling resistance, P_{nmax} – maximum driving force resulting from the wheels friction



Rys. 4. Zmiana rzeczywistych i teoretycznych sił napędowych w funkcji prędkości teoretycznej ciągnika Fendt Favorit Vario 924; oznaczenia jak na rys. 3.

Fig. 4. Change of real and theoretical driving forces in the theoretical speed function of a Fendt Favorit Vario 924 tractor, symbols as in Fig. 3



Rys. 5. Wartości sprawności układu napędowego ciągnika John Deere 7810 na poszczególnych biegach (ηJ) oraz zmiana sprawności układu napędowego ciągnika Fendt Favorit Vario 924 (ηF) w funkcji prędkości jego jazdy (przy stałej prędkości obrotowej silnika)

Fig. 5. Efficiency values for the driving system of a John Deere 7810 tractor on particular gears (ηJ) as well as change in driving unit efficiency of a Fendt Favorit Vario 924 tractor (ηF) in its driving speed function (at the constant engine's rotational speed)

Ponieważ na wartość siły napędowej ma wpływ nie tylko przełożenie układu napędowego, ale i jego sprawność, na rys. 5 przedstawiono wartości sprawności układu napędowego ciągnika John Deere 7810 na poszczególnych biegach, a więc i prędkościach teoretycznych jazdy (wynikających z przyjętej stałej prędkości obrotowej silnika) oraz

zmianę sprawności układu napędowego ciągnika Fendt Favorit Vario 924 w funkcji prędkości jego jazdy wynikającej (przy stałej prędkości obrotowej silnika) z bezstopniowej zmiany przełożenia skrzynki hybrydowej.

W przypadku skrzynki „powershift” najniższa sprawność układu napędowego była na biegu trzecim i wynosiła 0,905, a najwyższa na biegu szóstym i wynosiła 0,929 i przy prędkościach powyżej 4 km/h z wyjątkiem biegu 8, 9, 11 nie była mniejsza niż 0,91. Jak z powyższych danych wynika, sprawność układu napędowego ciągnika John Deere jest bardzo wysoka i praktycznie nie zależy od obciążenia.

Sprawność analizowanej skrzynki hybrydowej w dużym stopniu zależy od podziału strumienia mocy na część przenoszoną przez przekładnię hydrostatyczną i mechaniczną oraz od sprawności przekładni hydrostatycznej. Sprawność przekładni hydrostatycznej zmienia się wraz z jej przełożeniem kinematycznym zdefiniowanym jako stosunek prędkości obrotowej wału silnika hydraulicznego do prędkości obrotowej wału pompy. Sprawność ta dosyć gwałtownie wzrasta, gdy przełożenie przekładni wzrasta od wartości zerowej, następnie zmienia się w niewielkim stopniu, by ponownie gwałtownie obniżyć się do zera, gdy przełożenie przekładni osiąga maksymalną wartość. Wysoka sprawność przekładni zębatych w stosunkowo niewielkim stopniu obniża sprawność całej skrzynki. Podział strumienia mocy doprowadzonej do skrzynki jest taki, że w sytuacji, kiedy ciągnik rusza z miejsca cała moc płynie w zasadzie przez przekładnię hydrostatyczną, której przełożenie i sprawność zaczynają wzrastać od wartości zerowej. Powoduje to, że w zakresie prędkości jazdy od zera do około dwóch km/h sprawność przenoszenia mocy jest bardzo niska. Wraz ze wzrostem przełożenia przekładni hydrostatycznej wzrasta prędkość ciągnika i strumień mocy przepływający przez przekładnię hydrostatyczną zmniejsza się przy jednoczesnym wzroście mocy przenoszonej przez przekładnię mechaniczną. Powoduje to po przekroczeniu prędkości około 4 km/h wzrost sprawności powyżej 0,8. Jednak przy przenoszeniu mocy jednocześnie przez przekładnię hydrostatyczną i mechaniczną sprawność układu nie przekracza 0,85. Przy zbliżaniu się przełożenia przekładni hydrostatycznej do maksymalnej wartości obniża się jej sprawność, co powoduje, że moment oporów wału pompy jest taki jak moment doprowadzany do niego z przekładni planetarnej. Powoduje to zatrzymanie wału pompy i od tej chwili cała moc jest przekazywana tylko na drodze mechanicznej, w wyniku czego następuje gwałtowny wzrost sprawności skrzynki do wartości około 0,9, co ma miejsce przy prędkości około 17 km/h (rys. 5). Przy tej sprawności przekładnia pracuje do maksymalnej prędkości, jaką może osiągnąć ciągnik na rozpatrywanym zakresie pracy skrzynki, tj. około 32 km/h.

Z przedstawionego porównania obydwu skrzynek przekładniowych wynika, że skrzynka hybrydowa ma w całym zakresie rozpatrywanych prędkości niższą sprawność od skrzynki typu „powershift”. Z kolei skrzynka hybrydowa dzięki bezstopniowej zmianie przełożenia umożliwia, mimo zmieniającej się siły uciągu, pracę silnika ciągnika ze stałą mocą odpowiednio wybraną z obszaru charakterystyki uniwersalnej silnika ze względu na kryterium pracy (np. najmniejsze zużycie paliwa, maksymalna wydajność pracy) lub pracę ciągnika ze stałą prędkością, co wymaga zastosowania odpowiedniego systemu sterowania skrzynką i silnikiem. W przypadku skrzynki „powershift”, ze względu na jej skokowe zmiany przełożenia przy odpowiednim układzie automatycznego sterowania, moc silnika będzie zmieniała się w pewnym zakresie przy zmianie siły uciągu.

WNIOSKI

1. Jak wynika z rys. 4, w ciągniku Fendt przy prędkościach teoretycznych jazdy bliskich zeru przy niewielkim wzroście prędkości następuje dosyć gwałtowny wzrost siły napędowej.
2. Skrzynka typu „powershift” ma wyższą sprawność niż skrzynka hybrydowa.
3. Sprawność skrzynki „powershift” na danym biegu jest w zasadzie stała, a sprawności na poszczególnych biegach różnią się niewiele.
4. Sprawność skrzynki hybrydowej zależy od jej przełożenia i w zakresie wzrostu największych przełożeń gwałtownie się obniża.
5. W zakresie prędkości do 4 km/h (przy prędkości nominalnej silnika) sprawność przekładni hybrydowej nie przekracza 0,8, co powoduje duże straty energii, a tym samym zwiększa zużycie paliwa.

PIŚMIENNICTWO

1. **Aitzetmüller H. 1999:** Steyr S-Matic – the future continuously variable transmission for all terrain vehicles. Proc. 13th International Conference of the ISTVS (Munich, Germany), September 14–17.
2. Case IH CVT, Case Corporation CVT – UK – 1/98.
3. Claas Xerion.
4. Fendt: Favorit 900 Vario 916, 920, 924, 926, AGCO GmbH & Co, D-87616 Marktoberdorf, E 10/00-2.
5. **Deere J. 1992:** Transmission HO 920528 A.
6. **Lang T., Römer A., Seeger J. 1998:** Entwicklungen der Hydraulik in Traktoren und Landmaschinen. O + P = Ölhydraulik und Pneumatik, 42, 2.
7. **Pohlentz J. 1999:** The new continuously variable ZF Ecom Tractor Transmission. 13th International Conference of the ISTVS (Munich, Germany), September 14–17.
8. **Renius K. 1999:** Th. Generation change in tractor drive lines – a review. 13th International Conference of the ISTVS (Munich, Germany), September 14–17.
9. **Sauer G. 1998:** Sind stufenlose Getriebe der Traktorfahrer der Zukunft? Landtechnik Sonderheft.
10. **Seeger J. 2001:** Wirkungsgraduntersuchung des Systems „Dieselmotor – Leistungsverzweigtes Getriebe“. O + P = Ölhydraulik und Pneumatik 10, 42.
11. **Szydelski Z. 1999:** Analiza możliwości zastosowania napędów hydrostatycznych jazdy do ciągników rolniczych. Konferencja naukowo-techniczna „Napędy i sterowanie hydrauliczne ’99“, Wrocław-Polanica Zdrój.
12. **Szydelski Z. 1998:** Rozwój napędów hydrostatycznych jazdy maszyn kołowych, część I. Hydraulika i pneumatyka, 6.
13. **Szydelski Z. 1999:** Rozwój napędów hydrostatycznych jazdy maszyn kołowych, część II. Hydraulika i pneumatyka 1.
14. **Żebrowski J. 2002:** Analyse der Leistungsverteilung im Power-Shift-Wechselgetriebe von Ackerschleppern John Deere 7000. XIV Polish-German Seminar: Development Trends in Design of Machines and Vehicles., TU Warschau/FH Köln (UASC) Warszawa, 8–14 czerwca.
15. **Żebrowski J., Żebrowski Z. 2003:** Analyse des Leistungsflusses im Hybridgetriebe eines Radackerschleppers. Scientific Reports of the University of Applied Sciences Cologne, 1/2003; XVth German–Polish Scientific Seminar – Research and Development in Engineering and Studying in United Europe, Köln, 17–21 November.

THE COMPARISON OF AN INFLUENCE OF POWERSHIFT AND HYBRID GEAR BOXES
TYPES ON TRACTION PROPERTIES OF A TRACTOR

Summary. The purpose of the work was to compare two agricultural tractors equipped with powershift and hybrid gear boxes types in the aspect of the obtained driving forces and efficiency of the driving system in dependence on velocity.

Key words: tractor, powershift and hybrid gear boxes types, efficiency of driving system, driving force

Recenzent: prof. dr hab. Bogdan Żółtowski