

OPTYMALIZACJA PRACY CIĄGNIKA U 912

Adam Koniuszy

Zakład Podstaw Techniki, Akademia Rolnicza w Szczecinie

Streszczenie. W artykule przedstawiono symulacyjną metodę optymalizacji pracy ciągnika rolniczego U 912 na przykładzie 900-hektarowego gospodarstwa rolnego na Pomorzu Zachodnim. W procesie optymalizacji jako warunki ograniczające przyjęto osiągi silnika Z 8401.12 oraz prędkości jazdy ciągnika wymagane ze względów agrotechnicznych. Wyniki przedstawiono w postaci charakterystyki gęstości czasowej. Porównano optymalne ustawienia prędkości obrotowych silnika i przełożeń w układzie napędowym ciągnika z ustawieniami najczęściej występującymi w praktyce eksploatacyjnej.

Słowa kluczowe: ciągnik rolniczy, optymalizacja, przełożenia, charakterystyka gęstości czasowej

WSTĘP

Projektowanie urządzenia technicznego polega na takim doborze parametrów konstrukcyjnych, aby uzyskać pożądane własności fizyczne i ekonomiczne. W zakresie układu przeniesienia napędu kołowego ciągnika rolniczego ze stopniową skrzynią biegów wiąże się to z właściwym doбором liczby oraz wartości przełożeń między wałem korbowym silnika a kołami napędowymi. Przełożenia dobierane są według kryteriów kinematycznych i dynamicznych, m.in. takich jak: minimalna i maksymalna prędkość jazdy ciągnika, rozwijana siła uciagu, zdolność do pokonywania wzniesień, przyczepność kół ciągnika do podłoża. Konstrukcja ciągnika oparta jest zwykle na istniejącym już silniku o znanych własnościach energetycznych i określonym oddziaływaniu na otoczenie. Według tych informacji sporządzany jest wykres trakcyjny oraz charakterystyki przebiegowego zużycia paliwa na poszczególnych biegach w funkcji prędkości ciągnika.

Większa niż w pojazdach samochodowych liczba przełożeń ciągnika powoduje, że wybór właściwego biegu, zapewniającego zachowanie jednostkowego zużycie paliwa przez silnik na optymalnym poziomie nie zawsze jest uwzględniony w sposobie eksploatacji ciągnika. Trudności wynikają z faktu, że eksploatacja ciągnika jest procesem losowym, zależnym od wielu czynników związanych z rodzajem wykonywanej pracy. W zależności od oporu jednostkowego gleby, jej struktury i stopnia uwilgotnienia, operator ciągnika decyduje o wyborze przełożenia, które przede wszystkim pozwala na uzyskanie żądanej prędkości i jej utrzymanie w przypadku wzrostu oporów ruchu agregatu. Dodatkowo, zastosowanie reduktora oraz wzmacniacza momentu w układzie napędowym

powiela ilość możliwych do uzyskania prędkości jazdy, z których część, dzięki zmianie prędkości obrotowej silnika, może być taka sama dla różnych ustawień w skrzyni przekładniowej.

W praktyce eksploatacyjnej wybór właściwego przełożenia zależy od doświadczenia i cech psychomotorycznych operatora ciągnika, który bierze pod uwagę subiektywne wskaźniki oceny pracy silnika, co nie zawsze związane jest z uzyskaniem optymalnych osiągnięć, np. utrzymywanie zakresu wysokich prędkości obrotowych odpowiadających mocy znamionowej silnika przy każdym z wykonywanych zabiegów uprawowych. Decyzja co do wyboru optymalnego przełożenia nie uwzględnia tym samym istotnych wskaźników ważnych z punktu widzenia ekonomiki pracy silnika.

Pomiary i analiza obciążeń ciągnika mają bardzo duże znaczenie na etapie projektowania układu napędowego i doboru silnika do konkretnego typu ciągnika. Dlatego tak istotne jest zbieranie informacji na temat najczęściej wykorzystywanych przełożeń i rozwijanych przez ciągnik prędkości. Nieliczne badania prowadzone w tym zakresie wskazują, że wykorzystanie dostępnych przełożeń ciągnika jest znacznie ograniczone przy jednoczesnym niepełnym wykorzystaniu mocy znamionowej silnika [Kim i in. 2000].

Optimalizacja procesu produkcji rolnej odbywać się może również poprzez harmonogramowanie prac, poprawiające wykorzystanie środków produkcji [Błażczak, Przybył, 1997] lub poprzez określenie optymalnych mocy (typoszeregów ciągników) zależnie od zapotrzebowania i rozmieszczenia w danej gminie [Golka, 1998, Bręczewski, Krysztosiak 1999].

Znaną w krajach Europy Zachodniej oraz USA metodą optymalizacji jest technika sterowania ciągnikiem oparta na założeniu *gear-up and throttle-down*. Polega ona na zmniejszeniu prędkości obrotowej silnika przy jednoczesnym przejściu na wyższy bieg (niższe przełożenie) ciągnika, który pracuje przy częściowym wykorzystaniu swej mocy znamionowej. Oszczędności w zużyciu paliwa przez tak sterowany ciągnik w porównaniu z tradycyjną techniką jazdy sięgają nawet do 20% [Grisso, Pitman 2001]. Stosowanie tej właśnie metody, również w warunkach polskich przy obecnym poziomie parku ciągnikowego, chociażby ze względu na brak konieczności stosowania jakichkolwiek urządzeń dodatkowych, wydaje się być najbardziej uzasadnione.

METODYKA BADAŃ

W celu utrzymania wymaganej ze względów agrotechnicznych prędkości jazdy operator ciągnika dysponuje zazwyczaj kilkoma przełożeniami, które w połączeniu ze zmienną prędkością obrotową silnika dają pożądany efekt. Wyraża to zależność (1), która jest przekształceniem równania uproszczonego bilansu mocy ciągnika poruszającego się z niewielką prędkością po płaszczyźnie poziomej [Dajniak 1985]:

$$v = \frac{M_s \cdot i_c \cdot \omega_s \cdot \eta_u}{P_u} \quad (1)$$

gdzie:

v – prędkość ciągnika,
 M_s – moment obrotowy silnika,

i_c – przełożenie całkowite w układzie napędowym,
 ω_s – prędkość kątowna silnika,
 η_u – sprawność uciagu,
 P_u – siła uciagu.

Poprzez optymalizację pracy ciągnika rozumiane jest postępowanie, polegające na ustaleniu takiego przełożenia i obciążenia silnika, przy którym zachodzą następujące relacje:

- jednostkowe zużycie paliwa g_e jest możliwe na najniższym poziomie,
- moment obrotowy silnika jest M_s mniejszy od momentu znamionowego rozwijanego przy określonej prędkości obrotowej silnika,
- prędkość ciągnika v jest równa lub zbliżona do żądanej prędkości agregatu v_o ,
- prędkość obrotowa silnika n_s mieści się w zakresie wartości dopuszczalnych.

W przedstawionym sposobie optymalizacji pracy ciągnika U 912 posłużono się dodatkiem Solver arkusza kalkulacyjnego Microsoft Excel. Jako warunki ograniczające przyjęto zależności (2)–(4):

$$n_{\min} = 800 \leq n_s \leq n_{\max} = 2200 \quad (2)$$

$$v \approx v_o \quad (3)$$

$$M_s \leq -5 \cdot e^{-5} \cdot n_s^2 + 0,1472 \cdot n_s + 168,66 \quad (4)$$

Przebieg funkcji (4) znamionowego momentu obrotowego silnika Z 8401.12 wyznaczono za pomocą programu komputerowego Orient. Wartościami zmienianymi były: prędkość obrotowa silnika n_s oraz przełożenie w układzie napędowym. Natomiast wartością minimalizowaną było jednostkowe zużycie paliwa g_e .

Za najbardziej optymalne warunki pracy ciągnika U 912 uznane zostały takie ustawienia przełożeń i obciążeń silnika, przy którym ciągnik podczas pojedynczego zabiegu agrotechnicznego rozwija żądaną prędkość roboczą, a prędkość i moment obrotowy silnika mieszczą się w polu pracy silnika o możliwie najniższym jednostkowym zużyciu paliwa.

Zakres przeprowadzonej optymalizacji obejmował zabiegi agrotechniczne wykonywane z udziałem ciągnika U 912 w gospodarstwie rolnym o powierzchni 906 ha, zlokalizowanym na Pomorzu Zachodnim. Na podstawie wcześniej wykonanych badań, dotyczących m.in. analizy struktury gospodarstw rolnych Pomorza Zachodniego, wytypowano zabiegi uprawowe najczęściej wykonywane badanym ciągnikiem [Siekacz, Wiśniewski 1993, Dobrzycki 2005, Koniuszy 2005].

Po rozwinięciu ogólnego bilansu mocy ciągnika (5) wyznaczono wartości poszczególnych składników bilansu z uwzględnieniem parametrów charakterystycznych dla każdego z zabiegów uprawowych, tj.: rodzaj podłoża, szerokość, głębokość oraz prędkość robocza narzędzia, itp. [Kuczewski 1974, Dajniak 1985].

$$N_s = M_s \cdot \omega_s \cdot (1 - \eta_u) + W_{tc} \cdot v + P_n \cdot v_s + P_u \cdot v \quad (5)$$

gdzie:

N_s – moc użyteczna silnika,
 M_s – moment obrotowy silnika,

ω_s – prędkość obrotowa silnika,
 η_u – sprawność uciagu,
 W_{tc} – siła oporu toczenia ciągnika,
 v – prędkość ciągnika,
 P_n – siła napędowa,
 v_s – prędkość poślizgu kół napędowych,
 P_u – siła uciagu.

Jednym z najistotniejszych czynników, rozpatrywanych w bilansie mocy jest rodzaj podłoża po jakim porusza się ciągnik. Związane jest to nie tylko z oporem toczenia samego ciągnika czy też jego poślizgiem, ale przede wszystkim z oporem narzędzia. Dlatego też, w celu wyznaczenia jednostkowego oporu narzędzi, przyporządkowano kompleksom przydatności rolniczej gleb właściwe opory jednostkowe przy optymalnym stanie uwilgotnienia gleby [Domżał i in. 1980, Skrobacki 1980]. W ten sposób obliczono zapotrzebowanie mocy efektywnej każdego z zastosowanych agregatów (tab. 1).

Tabela 1. Zestawienie niektórych danych zabiegów agrotechnicznych z udziałem ciągnika U 912 w ciągu roku

Table 1. The list of some data of a year's ploughing with the tractor U 912

Nr zabiegu	Zabieg uprawowy	Roślina	Maszyna		Prędkość robocza, v_o m/s	Czas pracy, t h	Wymagana moc	
			Symbol	Szer. rob., a m			Uciagu, N_u kW	Silnika, N_s kW
1	Podorywka	Kukurydza	U043/1	1,7	1,50	67	18,9	31,5
2	Orka	Pszenica	U024	1,0	1,35	50	27,0	45,0
3		Rzepak		1,0	1,35	40	20,3	33,8
4		Kukurydza		1,0	1,33	52	15,3	25,5
5	Doprawianie gleby	Buraki	U708/2	2,5	1,66	25	16,6	27,1
6		Kukurydza		2,5	2,20	33	12,8	21,4
7	Siew	Pszenica	S045/2	6,0	1,60	40	14,4	24,0
8		Rzepak		6,0	1,60	40	10,6	17,7
9		Kukurydza		6,0	1,43	33	8,6	14,4
10	Nawożenie	Buraki	N218/2	2,2	1,00	61	17,7	29,5
11	Transport	Pszenica	T070	-	4,50	37	14,8	24,7

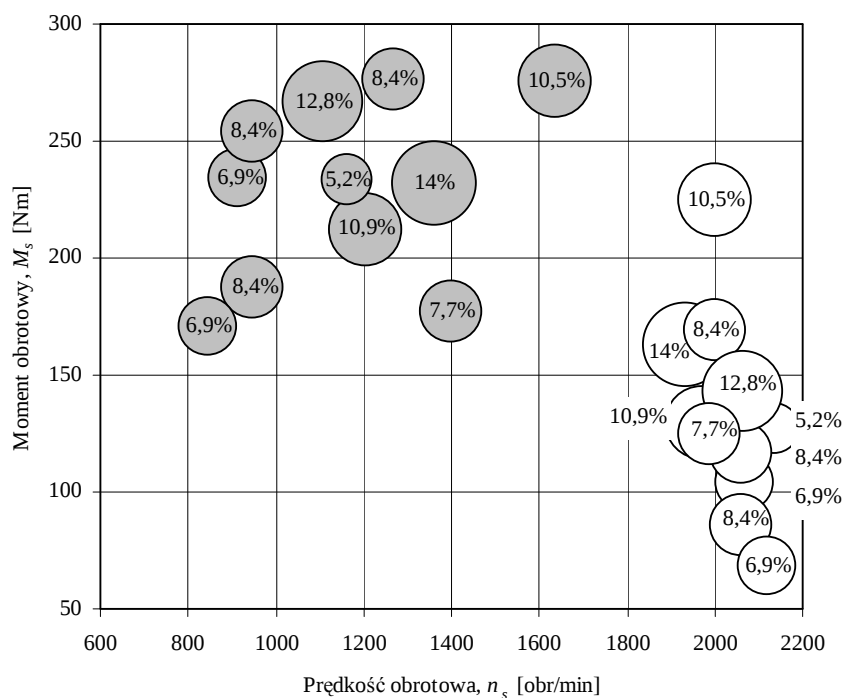
WYNIKI I DYSKUSJA

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że dla przyjętych warunków ograniczających w każdym z rozpatrywanych zabiegów agrotechnicznych istnieją przynajmniej dwa możliwe ustawienia w skrzyni przekładniowej i prędkości obrotowe silnika, odpowiadające wymaganej mocy silnika. Optymalne i najczęściej stosowane ustawienia przełożeń i prędkości obrotowych silnika przedstawiono w tab. 2.

Tabela 2. Ustawienia przełożeń i prędkości obrotowych silnika; 1...4 – nr biegu, I – z reduktorem, II – bez reduktora, W – z wzmacniaczem momentu

Table 2. Gear settings and rotation speed of the engine; 1...4 – running number, I – with reduction, II – without reduction, W – with the torque amplifier

Nr zabiegu	Wymagana moc silnika, N_s kW	Prędkość robocza, v_o m/s	Ustawienia optymalne			Ustawienia najczęściej stosowane		
			przełożenie	moment obrotowy silnika, M_s Nm	prędkość obrotowa silnika, n_s obr/min	przełożenie	moment obrotowy silnika, M_s Nm	prędkość obrotowa silnika, n_s obr/min
1	31,5	1,50	4 I	231,7	1359	3 I	163,1	1932
2	45,0	1,35	4 I W	275,3	1635	1 II W	224,8	2002
3	33,8	1,35	2 II W	267,0	1267	1 II W	168,8	2002
4	25,5	1,30	4 I	212,0	1205	1 II W	129,3	1973
5	27,1	1,66	2 II	232,5	1166	3 I	126,8	2138
6	21,4	2,20	4 II W	234,0	914	2 II W	103,7	2065
7	24,0	1,60	3 II W	253,6	946	3 I	116,5	2061
8	17,7	1,60	3 II W	187,0	946	3 I	85,9	2061
9	14,4	1,43	3 II W	170,3	846	1 II W	67,9	2121
10	29,5	1,00	1 II	266,7	1106	2 I	143,0	2063
11	24,7	4,50	4 II	176,7	1398	3 II	124,3	1988



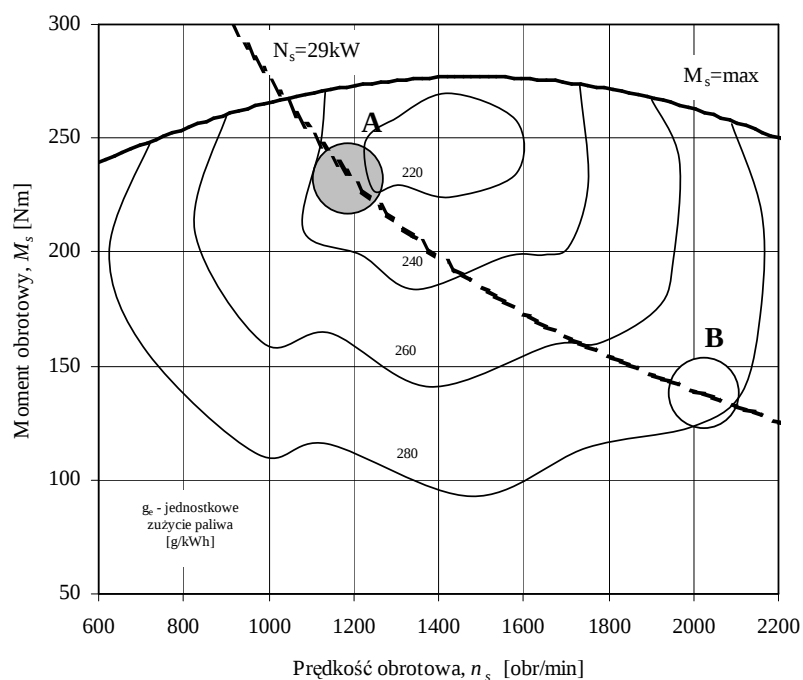
Rys. 1. Momenty i prędkości obrotowe silnika podczas zabiegów agrotechnicznych (pola powierzchni kół proporcjonalne do czasu trwania obciążenia); kolor szary – wielkości zoptymalizowane

Fig. 1. Torques and rotation speed of engine during ploughing (field of circle proportionally to load duration); grey color – value optimization

Na rys. 1 przedstawiono w postaci cykli obciążeń optymalne wartości momentów i prędkości obrotowych silnika (pola szare) i porównano je z wartościami najczęściej stosowanymi w praktyce eksploatacyjnej (pola białe). Obszary pracy silnika zazwyczaj wykorzystywane w praktyce (pola białe) znajdują się w pobliżu znamionowych prędkości obrotowych silnika. Jak wynika z obserwacji eksploatacyjnych, ciągłe utrzymywanie przez operatora ciągnika prędkości obrotowych silnika, zbliżonych do znamionowych wynika niekiedy z konieczności uzyskania żądanej prędkości obrotowej WOM przy niektórych zabiegach agrotechnicznych z maszynami aktywnymi, jednak w dużej mierze jest kwestią cech psychomotorycznych kierowcy.

Optymalne obszary pracy silnika (pola szare) są wyraźnie przesunięte w stronę niższych prędkości obrotowych i wyższych momentów obrotowych silnika. Taki układ obciążeń silnika odpowiada korzystnym ekonomicznym warunkom pracy silnika ciągnikowego, co potwierdzają prowadzone w tym zakresie wyniki badań innych autorów [Wang Zoerb 1989, Souza, Santa Catarina 1999].

Aby ocenić efekt ekonomiczny optymalizacji, porównano zużycie paliwa ciągnika U 912. W tym celu, uwzględniając czasy pracy silnika przy różnych momentach i prędkościach obrotowych, wyznaczono średnie ważone dwóch zakresów obciążeń (rys. 1), a następnie naniesiono je na charakterystykę uniwersalną badanego silnika (rys. 2). Obszar pracy silnika A odpowiada średniej ważonej obciążeń optymalnych, zaś obszar B – obciążeń najczęściej występujących.



Rys. 2. Średnie ważone obszarów pracy silnika (A, B) na charakterystyce uniwersalnej silnika

Fig. 2. Average weighed working area (A, B) in performance map for an engine

Dodatkowo na rys. 2 naniesiono średnią ważoną uzyskiwanej w ciągu roku mocy silnika (29 kW), która stanowi 51% mocy znamionowej tego typu silnika.

Szacunkowy bilans ekonomiczny przeprowadzonej symulacji przedstawia się następująco. Ciągnik U 912 pracuje w podanym gospodarstwie rolnym przez 478 godzin w roku ze średnią mocą 29 kW. Przy uwzględnieniu jednostkowego zużycia paliwa w obszarze B charakterystyki uniwersalnej silnika na poziomie ok. 280 g/kWh zużycie paliwa wynosi odpowiednio 8,12 kg/h oraz 3900 kg/rok.

Zachowując tę samą moc średnią i czas trwania poszczególnych obciążeń w zoptymalizowanym obszarze A pracy silnika, w którym jednostkowe zużycie paliwa wynosi ok. 230 g/kWh, godzinowe zużycie paliwa 6,67 kg, a roczne 3200 kg i jest o 18% mniejsze od wartości uzyskanej w obszarze B.

Po uwzględnieniu gęstości oleju napędowego można oszacować, że różnica w zużyciu paliwa jest równa 844 litry w roku. Przyjmując średnią cenę oleju napędowego w województwie zachodniopomorskim (ok. 3,65 zł za 1 litr na początku roku) obliczono, że oszczędności wynikające z procesu optymalizacji pracy ciągnika U 912 w analizowanym gospodarstwie mogą sięgnąć nawet do 3080 zł w roku.

Do wdrożenia metody optymalizacji pracy ciągnika, polegającej na ograniczeniu prędkości obrotowej silnika przy jednoczesnym przejściu na wyższy bieg, szczególnie przy mniejszych niż znamionowe obciążeniach, potrzebne jest duże doświadczenie praktyczne operatora ciągnika. Ciągła konieczność kontroli obciążenia ciągnika oraz częsta zmiana przełożeń spowodować mogą ograniczenie percepcji kierowcy, a w konsekwencji spadek skuteczności jego działania.

Jeśli nawet korzyści wynikające z tak prowadzonego procesu optymalizacji są tylko częściowe, to ostateczny bilans ekonomiczny proponowanej metody będzie zawsze dodatni.

Przedstawiona symulacja uświadamia jak duże oszczędności w zużyciu paliwa mogą zostać osiągnięte w rocznej eksploatacji jednego ciągnika. W skali całego Pomorza Zachodniego, przy ogólnej tendencji do wzrostu mocy ciągników, efekty proponowanej metody optymalizacji mogą przyczynić się do wskazania rezerw w zużyciu paliwa, co przy obecnym poziomie cen paliw ma bardzo istotne znaczenie.

Aby jednak możliwe było wykonanie kompleksowej optymalizacji pracy ciągnika rolniczego w skali makroregionu, należy wykonać szereg badań pozwalających na stworzenie modelu procesu eksploatacji ciągnika, który byłby przedmiotem analiz szczegółowych [Dobrzycki, Koniuszy 2005].

WNIOSKI

1. Optymalizacja pracy ciągnika rolniczego przyczynia się do polepszenia wskaźników ekonomiki pracy silnika.
2. W każdym z rozpatrywanych zabiegów agrotechnicznych istnieją minimum dwa możliwe ustawienia w skrzyni przekładniowej i odpowiadające im prędkości obrotowe silnika, spełniające założone warunki obciążeń silnika.
3. Oszczędności w zużyciu paliwa ciągnika U 912 eksploatowanego wg optymalnego zakresu obciążeń mogą wynieść nawet do 18% w porównaniu z zakresem obciążeń najczęściej występujących.

PIŚMIENNICTWO

- Błażczak P., Przybył J. 1997: Metoda harmonogramowania procesów produkcji rolniczej. *Prace Przemysłowego Instytutu Maszyn Rolniczych*, Poznań (42) 3, 34–36.
- Bręczewski J., Krysztofiak A. 1999: Metoda optymalizacji typoszeregu ciągników rolniczych w aspekcie obniżenia energo- i materiałochłonności prac ciągnikowych. *Prace Przemysłowego Instytutu Maszyn Rolniczych*, Poznań 4, 54–57.
- Dajniak H., 1985: Ciągniki. Teoria ruchu i konstruowanie. WKiŁ, Warszawa.
- Dobrzycki J., Koniuszy A. 2005: Modelowanie procesu eksploatacji ciągnika rolniczego w warunkach województwa zachodniopomorskiego. *Inżynieria Rolnicza* 3 (63), 141–147.
- Domżał H., Słowińska-Jurkiewicz A., Turski R. 1980: Gleboznawstwo z elementami geologii i mechaniki gleby. Akademia Rolnicza, Lublin.
- Golka W. 1998: Rozmieszczenie ciągników rolniczych w makroregionach gospodarczych Polski, w zależności od wieku, mocy silnika i wielkości gospodarstw. *Problemy Inżynierii Rolniczej* 2, 113–123.
- Grisso R., Pitman R. 2001: Gear Up and Throttle Down-Saving Fuel. Virginia Cooperative Extension. Virginia Polytechnic Institute and University, Publication 442–450, 6 page.
- Kim J. H., Kim K. U., Wu Y. G. 2000: Analysis of transmission load of agricultural tractors. *Journal of Terramechanics* 37, 113–125.
- Koniuszy A. 2005: Proces eksploatacji ciągników w gospodarstwach rolnych Pomorza Zachodniego. *Motrol*, t. 7, 105–113.
- Kuczewski J. 1974: Podstawy eksploatacji agregatów rolniczych. PWRiL, Warszawa.
- Siekacz W., Wiśniewski A. 1993: Próba zbudowania modelu eksploatacji silnika ciągnika U 912 i C 360 dla przeciętnego gospodarstwa rolnego na Pomorzu Zachodnim. Praca magisterska niepublikowana, AR Szczecin.
- Skrobacki A. 1980: Wpływ czynników przyrodniczych i organizacyjnych na zużycie paliw silnikowych w procesach trakcyjnych w gospodarstwie rolnym. SGGW – AR, Warszawa.
- Souza E. G., Santa Catarina A. 1999: Optimum Working Curve for Diesel Engines. *Trans. ASAE*, 42 (3), 559–563.
- Wang G., Zoerb G. C. 1989: Determination of Optimum Working Points for Diesel Engines. *Trans. ASAE*, 32 (5), 1519–1522.

OPTIMIZATION OF THE U 912 TRACTOR'S WORK

Summary. The aim of the article is to present a method of optimization for U 912 tractor on the example of ploughing in Western Pomerania farm. The computer simulation was used in the process of optimization. As limiting conditions were taken the performance of the tractor engine Z 8401.12 and the required ploughing speed. The output data have been shown on the time density graph. The optimal rpm and gear selection have been compared with the agricultural practice.

Key words: tractor, exploitation, optimization, gear ratio, time density of engine

Recenzent: prof. dr hab. Zbigniew Burski