

Zbigniew Kogut, Czesław Pintara
Instytut Budownictwa, Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa
Oddział Kłodzianko

ENERGOCHŁONNOŚĆ PROCESU KOSZENIA ZIELONEK KOSIARKAMI ROTACYJNYMI NA PRZYKŁADZIE WYBRANYCH KONSTRUKCJI

Streszczenie

Podczas badań empirycznych stosowano kosiarki o różnej szerokości roboczej, pracujące w trzech technikach koszenia: tarczowej, bębnowej i bębnowej ze spulchniaczem pokosów. Energochłonność porównano w aspekcie wyboru mocy współpracującego ciągnika. Wykorzystano zapotrzebowanie na moc w procesie koszenia w przeliczeniu na jednostki: skoszonej masy, szerokości roboczej kosiarek i czasu ich pracy efektywnej, w trzech etapach procesu: fazie rozruchu, biegu jałowego i pracy efektywnej. Stwierdzono istotne różnice w energochłonności badanych kosiarek w fazie rozruchu i pracy efektywnej. Dla pracy jałowej większość kosiarek potrzebuje ok. $2 \cdot 10^3$ W/m. Do rozruchu najmniejsze zapotrzebowanie mocy jednostkowej występuje w kosiarkach tarczowych ($2,5 \cdot 10^3$ W/m), a największe w kosiarce 4-bębnowej ($18 \cdot 10^3$ W/m) i wzrasta w zależności od liczby tarcz lub bębnow. Całkowita jednostkowa moc pracy efektywnej wynosi od ok. 400 W's/m²kg dla kosiarek 5-tarczowych do 1000 W's/m²kg dla bębnowych, przy czym stosowanie spulchniacza palcowego zwiększa tę wartość o dodatkowe 200 W's/m²kg (tj. o 20%). Zwiększanie szerokości lub zmniejszanie prędkości roboczych powoduje wzrost tej mocy. Dla kosiarek bębnowych energochłonność fazy rozruchu decyduje o wyborze mocy ciągnika biorącego udział w procesie koszenia, a energochłonność etapu pracy efektywnej o zużyciu paliwa w tym procesie, natomiast dla kosiarek tarczowych zarówno o wyborze mocy jak i zużyciu paliwa decyduje energochłonność etapu pracy efektywnej.

Słowa kluczowe: kosiarki rotacyjne, proces koszenia, badania porównawcze, moc jednostkowa

Wstęp

Produkcja pasz zielonych wymusza na producentach, m.in. kosiarek, dostarczanie rolnictwu maszyn niezawodnych w eksploatacji, o wysokiej jakości koszenia w różnych warunkach pracy, a przede wszystkim wysokowydajnych. W efekcie na rynku krajowym dostępne są różne rozwiązania kon-

strukcyjne kosiarek [Olszewski, Roszkowski 2001; Gach, Lisowski 1998; Pintara i in. 2002], w większości rotacyjnych zawieszanych, mniej lub bardziej spełniające stawiane im wymagania. Jednym z takich wymagań jest niska energochłonność procesu koszenia, rozumiana jako zapotrzebowanie na moc, głównie w kontekście wyboru współpracującego ciągnika, na realizację procesu koszenia w przeliczeniu na jednostki: skoszonej masy, szerokości roboczej kosiarki i czasu jej pracy efektywnej [Kogut, Pintara 2002].

Celem pracy jest porównanie różnych energochłonności procesu koszenia zielonek kosiarkami rotacyjnymi o wybranych rozwiązaniach konstrukcyjnych.

Metodyka badań

Badania wykonano podczas koszenia pierwszego pokosu trawy łąkowej, stosując kosiarki pracujące w trzech technikach koszenia: tarczowej, bębnowej i bębnowej ze spulchniaczem pokosów, zawieszane na tylnym układzie zawieszenia ciągnika (tab. 1). Badania prowadzono w naturalnych warunkach eksploatacji, przejeżdżając określoną kosiarką z ustaloną prędkością roboczą odcinek pomiarowy 100 m w dwóch powtórzeniach.

Nastawiana teoretyczna wysokość koszenia wynosiła 50 mm, a średni poślizg współpracującego ciągnika $\delta = 3\%$. Prędkość przemieszczania kosiarek dobrano tak, aby w danych warunkach pracy jakość koszenia była możliwie najlepsza. Dla kosiarek tarczowych, jako mniej wrażliwych na wielkość plonu, stosowano jedną prędkość roboczą ok. 3,5 m/s (12,5 km/h). Dla kosiarek bębnowych stosowano dwie wartości (tab. 2).

Tabela 1. Charakterystyka techniczna badanych kosiarek rotacyjnych
Table 1. Technical characteristic of investigated rotary mowers

Wyszczególnienie	Badane kosiarki rotacyjne (symbol)						
	Z184	ta- arup 2020	Z064	Z154/1	Z125/2k	Z010/3	Z010/4
Technika procesu koszenia	Tarczowa		Bębnowa		Bębnowa ze spulchniaczem		
Szerokość robocza teoretyczna, m	2,4	2,0	1,35	2,65	1,84	1,85	2,1
Liczba tarcz / bębnow, szt.	6	5	2	4	2	2	2
Liczba noży na tarczy/bębnie, szt.	2	2	2	3	3	3	4
Prędkość obrotowa tarcz/bębnow, obr./min.	2900	3000	2353	2564	1835	1813	1639
Prędkość liniowa noża, m/s	72,8	77,0	83,7	81,8	86,4	89,2	91,8
Prędkość liniowa palców, m/s	-	-	-	-	20,1	20,7	19,5
Masa kosiarki, kg	480	415	360	720	510	500	550

Energochłonność procesu koszenia...

Tabela 2. Zestawienie wybranych wyników dla etapu pracy efektywnej z badań kosiarek (średnie z powtórzeń)

Table 2. List of selected results for full load running of tested mowers (means for replications)

Wyszczególnienie	Badane kosiarki rotacyjne (symbol)											
	Z184	taarup 2020	Z064		Z154/1		Z125/2k		Z010/3		Z010/4	
Prędkość robocza rzeczywista wartość średnia, km/h	V_{m3}	V_{m3}	V_{m2}	V_{m3}	V_{m2}	V_{m3}	V_{m1}	V_{m2}	V_{m1}	V_{m2}	V_{m1}	V_{m2}
	12,3	12,3	10,1	12,4	10,0	11,6	8,0	10,3	7,9	10,5	7,9	10,3
wskaźnik nierówn., %	2,5	2,9	1,9	2,8	1,1	5,2	2,3	2,0	2,3	4,7	1,5	3,6
Szerokość robocza rzeczywista wartość średnia, m												
	2,15	1,73	1,00	0,98	2,42	2,44	1,74	1,70	1,54	1,64	1,83	1,96
wskaźnik nierówn., %	2,9	3,1	3,8	4,6	3,3	3,9	2,6	3,1	2,7	3,3	3,6	4,0
Masa średnia plonu na 100 m [kg]	519	560	254	230	525	515	442	380	385	398	368	364
Moc całkowita N_c wartość średnia, kW	20,79	14,34	7,20	8,70	31,60	35,41	21,00	21,50	18,40	22,72	23,45	24,55
wskaźnik nierówn., %	16	20	35	34	21	27	14	23	17	23	18	20
w tym: 4.1. moc na WOM, N_o wartość średnia, kW	14,55	7,95	5,25	6,35	21,00	23,50	13,00	12,50	12,80	14,35	16,20	16,60
wskaźnik nierówn., %	17	34	49	41	28	24	21	36	26	29	22	26
4.2. moc uciążu N_u wartość średnia, kW	6,22	6,38	1,95	2,35	10,62	11,91	7,95	8,93	5,60	8,38	7,31	7,95
wskaźnik nierówn., %	47	19	39	49	25	39	19	32	27	29	39	36

Podczas pomiarów z pojedynczego próbkowania co 0,05 s uzyskiwano następujące wielkości:

- czas próbkowania T w stosunku do rozpoczęcia pomiaru, z maks. błędem 0,01 s,
- przebyta droga S w chwili pobrania próbki, z maks. błędem 0,01 m,
- prędkość robocza rzeczywista ciągnika z kosiarką V_m , w m/s, z maks. błędem 0,5%,
- prędkość kątowna WOM ciągnika ω , w rad/s, z maks. błędem 2,2%,
- moment siły M na WOM ciągnika, z maks. błędem 4,5 Nm,

- poziome siły F_{XG} , F_{XL} i F_{XP} występujące w punktach zawieszenia kosiarki (górnym, lewym dolnym i prawym dolnym), z maks. błędem odpowiednio: 120, 65 i 125 N.

Równolegle określone były zgodnie z metodyką badań [PN-90/R-55003 i PN-90/R-55004]:

- średnia masa m skoszonego plonu na odcinku długości 100 m, z maks. błędem 0,01 kg,
- rzeczywista szerokość L_r robocza kosiarek, z maks. błędem 0,01 m.

Na podstawie zmierzonych wielkości pierwotnych określono rzeczywistą całkowitą moc procesu koszenia w trzech charakterystycznych etapach pracy kosiarek: rozruchu, pracy jałowej i pracy efektywnej, jako wartości ciągłe w funkcji czasu T lub drogi S (przykładowo zilustrowane na rys.1) oraz jako wartości uśrednione z określonym rozrzutem (dla etapu pracy efektywnej zamieszczone w tab. 2). Do porównania energochłonności procesu koszenia badanymi kosiarkami zastosowano transformację wartości ciągłych do wartości jednostkowych wg następującej zależności [Kogut, Pintara 2002]:

$$\frac{N_C}{L_r \cdot P} = \frac{F_{XG} \cdot F_{XL} \cdot F_{XP}}{L_r \cdot P} \cdot (1 + \delta) \cdot V_m + \frac{M \cdot \omega}{L_r \cdot P}$$

$$i \ P = \frac{m \cdot V_m}{d_p},$$

gdzie:

N_C – moc całkowita procesu koszenia, W,

F_{XG} , F_{XL} , F_{XP} – poziome siły występujące w punktach zawieszenia kosiarki, N,

δ – średni poślizg kół napędowych ciągnika,

V_m – prędkość robocza ciągnika z kosiarką, m/s,

M – moment siły na WOM ciągnika, Nm,

ω – prędkość kątowa WOM, rad/s,

L_r – szerokość robocza kosiarki, m,

P – przepustowość agregatu na odcinku pomiarowym długości d_p

($d_p = 100$ m), kg/s,

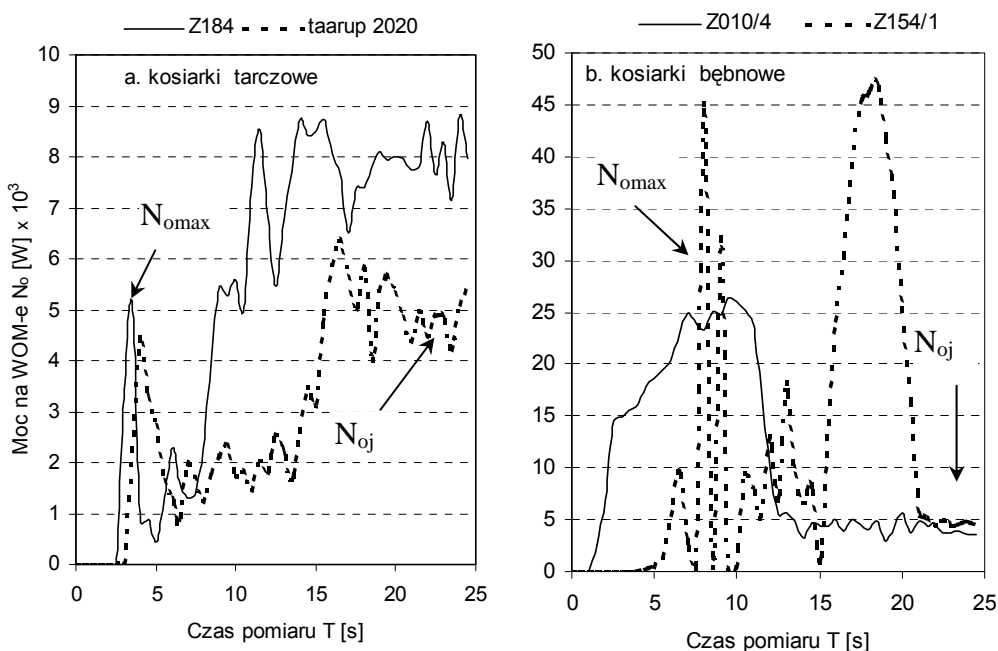
m – masa zielonki skoszonej na odcinku pomiarowym d_p , kg.

Pierwszy człon prawej strony równania przedstawia moc jednostkową uciagu, konieczną do przemieszczenia pracują kosiarki natomiast drugi człon – moc jednostkową na WOM niezbędną do pracy jej aktywnych elementów. W dwóch pierwszych etapach procesu koszenia – gdzie prędkość postępową agregatu $V_m = 0$ m/s – pierwszy człon równania nie występuje, podobnie jak przepustowość P , a moc jednostkowa odnoszona jest tylko do jednostki teoretycznej szerokości roboczej kosiarki. Maksymalny względny błąd z dokładności odczytu wielkości pierwotnych wystąpił przy najmniejszych wartościach i wynosi $\delta_{Nu} = 14\%$ dla mocy jednostkowej uciagu i $\delta_{No} = 6\%$ dla mocy jednost-

kowej na WOM. Wartości średnie określono jako średnią arytmetyczną wartości z próbkowania, a wskaźnik nierównomierności jako ich współczynnik zmienności. Przy porównywaniu średnich wartości mocy jednostkowych korzystano przy 95% poziomie ufności z przedziałów ufności $\pm U$: Neymana przy ocenie wyników i LSD przy analizie różnicowania wartości. W pierwszym przypadku wprowadzono założenie jednakowej wariancji analizowanej mocy jednostkowej tylko w obrębie danego rozwiązania konstrukcyjnego kosiarki. W drugim przypadku założenie jednakowej wariancji analizowanej mocy jednostkowej wprowadzono w pierwszej kolejności w odniesieniu do wszystkich stosowanych technik koszenia a dopiero w drugiej kolejności – w przypadku potwierdzenia istotnego różnicowania – w odniesieniu do pojedynczej techniki. Do oceny istotności różnicowania wartości średnich zastosowano analizę wariancji z klasyfikacją pojedynczą metodą ANOVA w pakiecie statystycznym STATGRAPHICS [Luszniewicz, Słaby 1997].

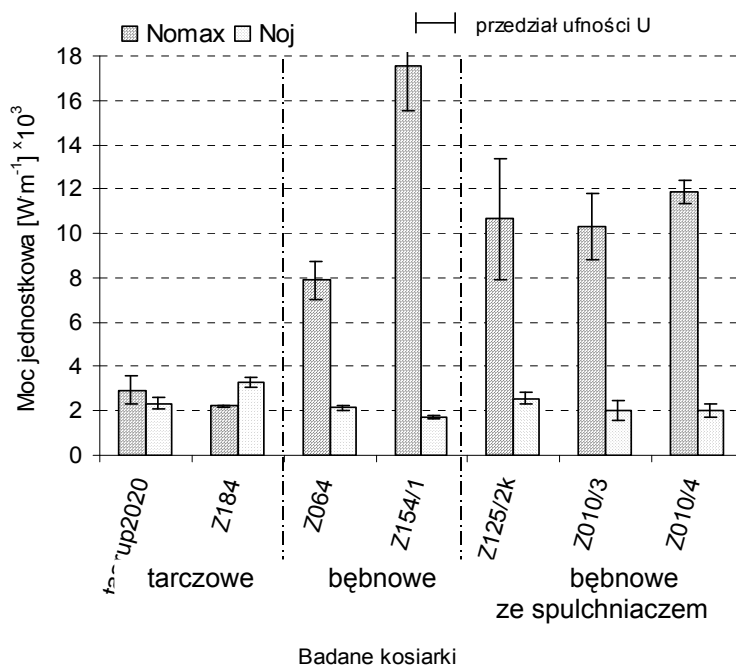
Analiza wyników

Etap rozruchu kosiarek cechuje się w funkcji czasu przy zerowej prędkości roboczej jednym wyraźnym wzrostem (tzw. „pikiem”) zapotrzebowania na moc do wartości ekstremalnej zwanej maksymalną mocą rozruchową (rys. 1). Zapotrzebowanie to trwa od ok. 0,5 s (dla tarczowej) do 10 s (dla 2-bębnowych), a nawet do 15 s (dla 4-bębnowej) i zależy od stosunku tej wartości maksymalnej do mocy współpracującego ciągnika. Im wyższy stosunek, tym czas ten jest dłuższy. Następuje wówczas dławienie ciągnika niekorzystnie wpływające na jego trwałość.



Rys. 1. Moc rozruchowa N_{omax} i jałowa N_{oj} kosiarek tarczowych (a) i bębnowych (b)
 Fig. 1. Starting N_{omax} and idling N_{oj} power of the disc mowers (a) and drum mowers (b)

Po etapie rozruchu następuje spadek zapotrzebowania na moc do ustabilizowanego poziomu wartości, zwanego mocą biegu luzem (tzw. mocą jałową). Zarówno wartość maksymalnej mocy rozruchowej, jak i wartość mocy jałowej są wielkościami niezależnymi od warunków eksploatacji kosiarek i charakteryzują wyłącznie ich konstrukcję. Porównując ich wartości jednostkowe, odniesione do teoretycznej szerokości roboczej poszczególnych kosiarek (rys. 2), podczas pracy luzem większość uwzględnionych w badaniach kosiarek cechuje się porównywalnym zapotrzebowaniem na moc. Wynosi ono ok. $2 \cdot 10^3$ W/m. Jedynie dla kosiarki tarczowej Z184, o szer. roboczej 2,4 m, to zapotrzebowanie mocy przekracza $3 \cdot 10^3$ W/m.



Rys. 2. Porównanie jednostkowych mocy: rozruchowej maksymalnej N_{omax} i jałowej N_{oj} kosiarek

Fig. 2. Comparison of unit powers: maximal starting N_{omax} and idling N_{oj} of the investigated mowers

Podczas fazy rozruchu kosiarek maksymalna jednostkowa moc rozruchowa jest wyraźnie zróżnicowana, szczególnie w zależności od realizowanej techniki koszenia (przy poziomie istotności w analizie wariancji $\alpha = 0,0000$). Najmniejsze i najbardziej wyrównane wartości – ok. $2,5 \cdot 10^3$ W/m – występują dla kosiarek tarczowych i są zbliżone do wyżej wspomnianego zapotrzebowania mocy podczas ich pracy jałowej. Również mało zróżnicowane, ale wyraźnie wyższe wartości – ok. $11 \cdot 10^3$ W/m – występują dla kosiarek bębnowych ze spulchniaczem pokosów. Wartości te ponad 5-krotnie przewyższają energochłonność pracy jałowej. Największe zróżnicowanie wartości jednostkowej mocy rozruchowej występuje w kosiarkach bębnowych: od

$8 \cdot 10^3$ W/m dla kosiarki Z064 (o szerokości roboczej 1,35 m) do prawie $18 \cdot 10^3$ W/m dla kosiarki Z154/1 o szerokości roboczej 2,65 m. Dla tej najszerszej kosiarki, 4-bębnowej, zapotrzebowanie jednostkowej mocy do rozruchu jest prawie 9-krotnie większe od jej zapotrzebowania na moc do pracy jałowej.

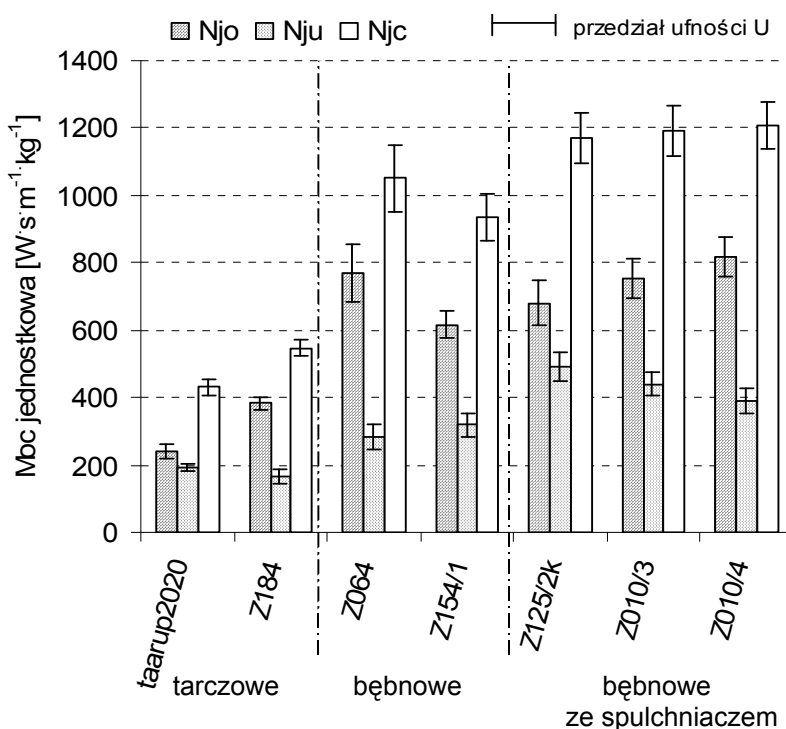
Etap efektywnej pracy kosiarek w aspekcie energochłonności procesu koszenia cechuje się dużą zmiennością wartości ciągłych mocy całkowitej, zarówno w odniesieniu do badanych rozwiązań, jak i w obrębie jednego egzemplarza. Obliczone wartości średnie (tab. 2) wahają się od 7 kW dla kosiarki o najmniejszej szerokości roboczej (1,35 m) do ponad 35 kW dla kosiarki największej szer. rob. (2,65 m) przy równoczesnym istotnym rozrzucie wartości: wskaźnik nierównomierności mocy całkowitej wynosi 15-35%. Wynika to z faktu, że zapotrzebowanie na moc podczas efektywnej pracy kosiarek zależy zarówno od ich cech konstrukcyjnych (stałych dla poszczególnych typów), jak też zmiennych warunków ich pracy.

Porównując (podczas efektywnej pracy) zapotrzebowanie na jednostkową moc, odniesioną do rzeczywistej szerokości roboczej, masy skoszonej zielonki i czasu koszenia (rys. 3), można zauważyć, że moc wynikająca z uciągu – zużywana na przemieszczenie pracującej kosiarki – jest najmniej zróżnicowana dla typów kosiarek pracujących w tej samej technice koszenia: najmniejsza (ok. 200 W·s/m·kg) występuje dla kosiarek tarczowych (przy poziomie istotności $\alpha < 0,05$), a największa (ok. 400 W·s/m·kg) dla kosiarek bębnowych ze spulchniaczem (przy poziomie istotności $\alpha < 0,005$). Dla kosiarek bębnowych różniących się szerokością roboczą (1,35 m i 2,65 m) nie stwierdzono istotnego zróżnicowania jednostkowej mocy uciągu (poziom istotności wynosi $\alpha < 0,2$). Natomiast moc na WOM, zużywana do pracy aktywnych elementów roboczych kosiarki w tym także spulchniaczy, cechuje się wyraźnym zróżnicowaniem wartości pomiędzy kosiarkami tarczowymi a bębnowymi oraz w grupie typów tych kosiarek.

Najmniejsza jednostkowa moc na WOM występuje dla kosiarki 5-tarczowej (taarup 2020) i wynosi 200 W·s/m·kg. Zwiększenie liczby tarcz do 6 szt. (dla kosiarki Z184) i teoretycznej szerokości roboczej do 2,4 m powoduje wzrost wspomnianej mocy do 400 W·s/m·kg. Największa jednostkowa moc na WOM występuje dla kosiarki 2-bębnowej o szer. roboczej 1,35 (Z064) i wynosi ok. 800 W·s/m·kg. Wartość ta jest zbliżona do jednostkowej mocy na WOM dla kosiarek bębnowych ze spulchniaczem, cechujących się najmniejszym jej zróżnicowaniem. Dla kosiarki 4-bębnowej (Z154/1) powyższa moc maleje do wartości 600 W·s/m·kg.

Moc jednostkowa całkowita jest najniższa dla kosiarek tarczowych i wynosi 400-550 W·s/m·kg w zależności od typu badanej kosiarki, przy czym wzrasta wraz ze wzrostem ich szerokości roboczej. Najwyższe wartości tej mocy – ok. 1200 W·s/m·kg – stwierdzono dla kosiarek bębnowych ze spulchniaczem, natomiast kosiarki bębnowe bez spulchniacza cechują się energochłonno-

ścią pracy efektywnej na poziomie $1000 \text{ W/s/m}^2\text{kg}$. Wraz ze wzrostem szerokości roboczej (w wyniku wzrostu liczby bębnow) jednostkowa moc całkowita tylko nieznacznie maleje. Z różnicy wynika, że obecność palcowego spulchniacza pokosów na wyposażeniu kosiarek powoduje dodatkowy wzrost jednostkowej mocy całkowitej o ok. $200 \text{ W/s/m}^2\text{kg}$. W przypadku kosiarek bębnowych ze spulchniaczem, szczególnie o większej szerokości roboczej, praca z mniejszą prędkością przemieszczania agregatu powoduje wyraźny wzrost całkowitej energochłonności jednostkowej nawet do $1600 \text{ W/s/m}^2\text{kg}$. Uzasadnia to celowość prowadzenia prac zmierzających do osiągania wyższych prędkości roboczych podczas koszenia tą techniką.



Rys.3. Porównanie jednostkowej mocy całkowitej N_{jc} i jej składowych: na WOM N_{jo} i z uciągu N_{ju} .

Fig. 3. Comparison of total unit power N_{jc} and its components: no the power take-off shaft N_{jo} and from towing N_{ju} .

Wnioski

1. Przeprowadzone badania wykazały istotne zróżnicowanie energochłonności procesu koszenia zielonek w zależności od zastosowanych rozwiązań kosiarek rotacyjnych w dwóch etapach ich pracy: fazy rozruchu i pracy efektywnej. Podczas pracy jałowej (bez obciążenia) większość badanych kosiarek cechuje się porównywalnym zapotrzebowaniem jednostkowej mocy na poziomie $2 \cdot 10^3 \text{ W/m}$.

2. Podczas etapu rozruchu jednostkowa moc rozruchowa jest najmniejsza dla kosiarek tarczowych i wynosi $2,5 \cdot 10^3$ W/m. Dla kosiarek 2-bębnowych moc ta jest znacznie większa i wynosi $8 \cdot 10^3$ W/m podczas ich pracy samodzielnej i $11 \cdot 10^3$ W/m podczas pracy razem z palcowym spulchniaczem pokosów. Najwyższa moc jednostkowa – $18 \cdot 10^3$ W/m – występuje dla kosiarki 4-bębnowej.
3. Dla kosiarek tarczowych jednostkowa moc całkowita pracy efektywnej wynosi ok. 400 W·s/m·kg dla konstrukcji 5-tarczowej i 550 W·s/m·kg dla 6-tarczowej. Różnica wynika jedynie z wartości składowej mocy na WOM. Dla kosiarek bębnowych bez spulchniacza jednostkowa moc całkowita tego etapu wynosi ok. 1000 W·s/m·kg i nieznacznie maleje wraz ze wzrostem szerokości roboczej. Zastosowanie na wyposażeniu tych kosiarek spulchniacza palcowego powoduje dodatkowy wzrost mocy o ok. 20%, wynikający zarówno ze wzrostu składowej mocy na WOM, jak i składowej z uciagu.
4. Największa moc jednostkowa w procesie koszenia zielonek występuje podczas rozruchu kosiarek bębnowych, przy czym dla konstrukcji 4-bębnowych wzrasta prawie o 100% w stosunku do 2-bębnowych. Energochłonność tego etapu decyduje o wyborze mocy ciągnika współpracującego z kosiarką bębnową, natomiast etapu pracy efektywnej o zużyciu paliwa w procesie koszenia tymi kosiarkami. Odmiennie przebiegają relacje dla kosiarek tarczowych, gdzie energochłonność etapu pracy efektywnej decyduje zarówno o wyborze ciągnika, jak i zużyciu paliwa w procesie koszenia.
5. Stwierdzone zróżnicowanie energochłonności procesu koszenia, odniesione do szerokości roboczej, pozwala wnioskować, iż rozwojową konstrukcją jest tarczowa technika koszenia. Uzyskiwane wartości jednostkowej mocy rozruchowej, wraz z czasem ich trwania, są barierą dalszego zwiększania szerokości roboczych dla bębnowej techniki koszenia.

Bibliografia

- Gach S., Lisowski A. 1998. Analiza rozwiązań konstrukcyjnych kosiarek i maszyn do obróbki trawy po koszeniu. Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej, 1: 11-13 i 16
- Kogut Z., Pintara C. 2002. Analiza wielkości dynamicznych w aspekcie energochłonności wybranych technik koszenia zielonek. Problemy Inżynierii Rolniczej, 4: 27-34
- Luszniewicz A., Słaby T. 1997. Statystyka stosowana. PWE, Warszawa
- Pintara C., Mosch G., Józefowicz J. 2002. Test czterech kosiarek rotacyjnych. Top Agrar Polska, 10: 78-85
- Olszewski T., Roszkowski A. 2001. Technika rolnicza XXI wieku. Cz. III. Techniki zbioru i przygotowania zielonek do konserwacji. Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej, 6: 2-5