

Aleksander Lisowski, Jacek Klonowski  
Katedra Maszyn Rolniczych i Leśnych  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

## MONITOROWANIE PLONU ROŚLIN TRAWY PRZEZ POMIAR GRUBOŚCI WARSTWY MATERIAŁU ROŚLINNEGO MIĘDZY WALCAMI WCIĄGAJĄCO-ZGNIATAJĄCYMI SIECZKARNI POŁOWEJ

### Streszczenie

Przedstawiono metodę monitorowania plonu trawy zbieranej sieczkarnią polową przez pomiar grubości warstwy materiału roślinnego między walcami wciągająco-zgniatającymi. Stwierdzono, że podczas pomiaru grubości tej warstwy potrzebne jest również ciągle monitorowanie prędkości obrotowej górnego walca, prędkości ruchu agregatu ciągnik-sieczkarnia i wilgotności roślin. Wymagana jest także informacja o rozstawie wałków trawy.

**Słowa kluczowe:** monitorowanie, plon, trawa

### Wykaz oznaczeń

- $b_{rw}$  – rozstaw wałków roślin, m,
- $g_w$  – grubość warstwy materiału roślinnego między tylną parą walców wciągająco-zgniatających, mm,
- $n_{wg}$  – prędkość obrotowa górnego walca wciągająco-zgniatającego, obr·min<sup>-1</sup>,
- $q$  – strumień masy roślin, kg·s<sup>-1</sup>,
- $Q_t$  – plon roślin zgrabionych w wałki, t·ha<sup>-1</sup>,
- $v_s$  – prędkość jazdy agregatu ciągnik-sieczkarnia, m·s<sup>-1</sup>,
- $w$  – wilgotność roślin, %.

### Wstęp

Ustalenie plonu trawy i innych zielonek w czasie rzeczywistym jest ciągle problematyczne, ze względu na brak niezawodnej metody pomiaru przepustowości sieczkarni polowej. Ehlert i Schmidt [1995] i Ehlert [1999] stwierdzili, że monitorowanie

plonu zielonek przez ciągły pomiar szczeliny między walcami gładkimi i zgniatającymi, umieszczonymi tuż przed bębnem z nożami tnącymi, daj najlepsze wyniki. Podobnie Schmittmann i in. [2000] wykazali, że spośród trzech metod pomiaru przepustowości bazujących na: wychyleniu walca wciągająco-zgniatającego, objętości strumienia masy siewki w kanale wyrzutowym i siły wywieranej przez strumień masy siewki na czujnik, ta pierwsza metoda charakteryzuje się 89-98% dokładnością pomiaru i najniższymi kosztami związanymi z zainstalowaniem systemu (2000 DM). O dokładności pomiaru decyduje m.in. możliwość utrzymania jednakowej gęstości zgniatanej masy na całej długości walców.

Nasze doświadczenia wskazują, że strumień masy, wilgotność roślin i parametry techniczne siewkarni polowej mają wpływ na stopień zagęszczenia roślin przez walce wciągająco-zgniatające, a zatem decydują również o grubości warstwy roślin między tymi walcami [Lisowski i in. 2004].

Celem badań była ocena metody monitorowania plonu roślin podczas zbioru trawy siewkarnią polową przez pomiar grubości warstwy materiału roślinnego między walcami wciągająco-zgniatającymi z uwzględnieniem strumienia masy, wilgotności roślin i parametrów technicznych maszyny.

### **Metodyka badań**

Metodyka badań empirycznych obejmowała skalowanie aparatury pomiarowej oraz pomiary grubości warstwy materiału roślinnego między walcami wciągająco-zgniatającymi, wilgotności roślin, prędkości obrotowej walców wciągająco-zgniatających i strumienia masy roślin w czasie rzeczywistym.

Skalowanie przyrządów pomiarowych miało na celu określenie stałej cechowania oraz błędów pomiarów, gdyż obie wartości nie są znane i stanowią charakterystyczną cechę zastosowanego przetwornika. Największy błąd względny wystąpił podczas pomiaru grubości warstwy roślin między walcami wciągająco-zgniatającymi i wynosił 3,8%.

Grubość warstwy materiału roślinnego między dwiema parami walców wciągająco-zgniatających mierzono pośrednio przez pomiar wychylenia tych walców. Zastosowano transformatorowe przetworniki przemieszczeń typu CL-70-500, o zakresie pomiarowym  $\pm 250$  mm (walce przednie) i typu CL-70-200, o zakresie pomiarowym  $\pm 100$  mm (walce tylne) firmy ZEPWN. Przetworniki te bezpośrednio mierzyły zmiany położenia górnych – ruchomych walców wciągająco-zgniatających. Górny walec przedniej pary walców porusza się w płaszczyźnie pionowej w prowadnicach, a górny walec tylnej pary – z pewną swobodą,

ograniczoną bocznymi łącznikami, które łączą obudowy łożysk przedniego i tylnego wału napędowego tych walców. Ruchy obu walców w płaszczyznach pionowych są niezależne. Wykorzystując tę właściwość, talerzyki stykowe trzpieni przetworników przemieszczeń oparto na zewnętrznych powierzchniach walcowych piast łożysk kulkowych. W wyniku takiego kontaktu wypukłe powierzchnie talerzyków stykowych mogły się swobodnie przesuwać po powierzchniach walcowych piast. Stały kontakt tych powierzchni zapewniono przez zamocowanie sprężyn dociskających trzpienie w prowadnicach. Dokładność pomiaru wynosiła 1 mm.

Siłę nacisku sprężyn na walce wciągająco-zgniatające mierzono tensometrycznymi czujnikami sił typu CL 14, o zakresie pomiarowym 2 kN, które zamocowano szeregowo w mechanizmach napinających sprężyny, dociskające górne – ruchome walce. Dolne walce, zarówno przedniej, jak i tylnej pary nie zmieniają swojego położenia. Dokładność pomiaru 1 N.

Wilgotność roślin trawy pociętych na siewkę mierzono czujnikiem pojemnościowym zamontowanym w kanale wyrzutowym i dodatkowo kontrolowano metodą suszarkowo-wagową. Dokładność pomiaru wilgotności roślin czujnikiem pojemnościowym wynosiła 1%, metodą suszarkowo-wagową 0,1%.

Prędkość obrotową wałów napędzających walce wciągająco-zgniatające mierzono za pomocą tachometrów mikroprocesorowych typu CL146p z wyjściem analogowym firmy ZEPWN i indukcyjnych czujników zbliżeniowych z dokładnością 1 obr. $\cdot$ min<sup>-1</sup>. Czujniki zbliżeniowe zamocowano we wspornikach przytwierdzonych do podstawy silników hydraulicznych.

Pomiary masy materiału siewki w czasie rzeczywistym przeprowadzono za pomocą wagi elektronicznej typu CLP 500/LC510, o zakresie pomiarowym 500 kg, na której zamocowano konstrukcję nośną zbiornika brezentowego, do którego spadał pocięty materiał roślinny z kanału wyrzutowego siewkarni. Pomiary masy każdej próbki wykonywano metodą różnicową z dokładnością 0,1 kg i próbkowano z częstotliwością 5 Hz.

Wszystkie sygnały uzyskiwane z przetworników były rejestrowane w komputerze laptop poprzez cyfrowy system pomiarowo-rejestrujący DMCPlus firmy Hottinger, który umożliwił wykonanie pomiarów z zaprogramowaną liczbą kanałów i częstotliwością próbkowania.

Wyniki badań opracowano metodami analizy statystycznej, wykorzystując w tym celu komputerowy pakiet statystyczny Statgraphics v.4.1.

## Wyniki badań i dyskusja

W celu zmniejszenia wpływu czynników losowych, przeprowadzono badania stacjonarne. Stanowisko pomiarowe składało się z siewczarki przyczepianej wyposażonej w toporowy zespół rozdrabniający, napędzanej wałem odbioru mocy ciągnika Ursus 1234 o mocy silnika 85 kW. Rośliny trawy o średniej wilgotności 64, 54 i 44% oraz masie 10, 15, 20 i 30 kg były układane na odcinku 4 m przenośnika taśmowego, którego prędkość zmieniano na dwóch poziomach 0,5 i 1,0 m·s<sup>-1</sup>. Uzyskano w ten sposób cztery poziomy masy jednostkowej roślin 2,50, 3,75, 5,00 i 7,50 kg·m<sup>-1</sup> i sześć poziomów strumienia masy roślin 1,250, 1,875, 2,500, 3,750, 5,000 i 7,500 kg·s<sup>-1</sup>. Trawę zbierano kosiarką rotacyjną górnapędową w fazie początku kwitnienia i kwitnienia oraz w zależności od potrzeb poduszano ją w warunkach naturalnych.

Prędkość obrotową walców wciągająco-zgniatających zmieniano w sposób pośredni przez zmianę prędkości obrotowej wału odbioru mocy ciągnika i przełożenia między wałem napędowym a napędzanym tarczy nożowej. Dla prędkości obrotowej wału odbioru mocy ciągnika 1000 obr·min<sup>-1</sup> stosowano dwa przełożenia 1:1 i 1:1,551, a dla 540 obr·min<sup>-1</sup> – jedno 1:0,645. Ponieważ pompa układu hydraulicznego napędzającego walce wciągająco-zgniatające otrzymuje napęd od wału tarczy nożowej, dlatego też w efekcie uzyskano trzy różne poziomy prędkości obrotowej tych walców: 51,8, 58,5 i 58,3 obr·min<sup>-1</sup> (walec górny) i 87,4, 98,2 i 101,6 obr·min<sup>-1</sup> (walec dolny), które odpowiadają prędkościom obrotowym tarczy nożowej 645, 838 i 1000 obr·min<sup>-1</sup>. Średnica walca górnego wynosi 230 mm, a dolnego – 177 mm, co oznacza, że różnice w prędkościach obwodowych walców zmieniały się w zależności od zakresu ich prędkości obrotowych. Zmniejszenie się prędkości obrotowej walca górnego z 58,5 do 58,3 obr·min<sup>-1</sup>, przy zwiększającej się prędkości obrotowej tarczy nożowej z 838 do 1000 obr·min<sup>-1</sup> wynika z charakterystyki sprawnościowej silnika hydraulicznego zastosowanego do napędu tego walca. Dla tego silnika hydrostatycznego jego sprawność objętościowa zmniejsza się znacząco po przekroczeniu prędkości obrotowej 850 obr·min<sup>-1</sup>.

Analiza statystyczna wykazała, że wpływ czynników na grubość warstwy materiału roślinnego mierzona między przednią parą walców wciągająco-zgniatających daje około 20% gorsze wyniki niż na grubość warstwy mierzona między tylną parą walców. Walce przednie są poddawane zmiennym wahaniom w większym stopniu niż walce tylne, gdyż wciągają i wstępnie zagęszczają rośliny podawane przez zwoje przenośnika ślimakowego. Strumień masy roślin w większym stopniu wyrównuje się dopiero między tylną parą walców wciągająco-zgniatających i dlatego też dalszą analizę ograniczono do tego parametru.

Grubość warstwy materiału roślinnego między tylną parą walców wciągająco-zgniatających podczas rozdrabniania trawy była statystycznie istotnie zróżnicowana dla prędkości obrotowej tarczy nożowej, masy jednostkowej i wilgotności roślin (przy przyjętym poziomie istotności  $\alpha = 0,01$ ). Nie stwierdzono istotnego zróżnicowania tego parametru dla prędkości zasilania, mimo zaobserwowanego rosnącego trendu wraz z jej zwiększaniem się. Zwiększenie prędkości zasilania z  $0,5$  do  $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  spowodowało zwiększenie grubości warstwy roślin z  $47,92$  do  $50,10 \text{ mm}$  (o  $4,5\%$ ). Ten nieznaczny wpływ prędkości zasilania na grubość warstwy materiału między walcami wynikał ze zmiany wartości współczynnika kinematycznego prędkości, który jest stosunkiem prędkości obwodowej przenośnika ślimakowego do prędkości zasilania. Po usunięciu oddziaływania innych czynników, średnia prędkość obwodowa przenośnika ślimakowego wynosiła  $0,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Dla prędkości zasilania  $0,5$  i  $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  stosunek tych prędkości wynosił odpowiednio  $1,64$  i  $0,82$ . Przy prędkości zasilania  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  zwoje ślimaka w znacznym stopniu wyciągały materiał roślinny ze strumienia materiału podawanego przez przenośnik taśmowy. Wpłynęło to na zwiększenie nierównomierności grubości warstwy roślin, o czym świadczy również większy błąd standardowy ( $1,72 \text{ mm}$ ). W przypadku zastosowania prędkości zasilania  $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , stosunek analizowanych prędkości miał mniejsze różnice ( $0,82$ ) i materiał roślinny był transportowany do zespołu walców bardziej równomiernie (błąd standardowy grubości warstwy roślin wynosił  $1,02 \text{ mm}$ ).

Stwierdzono, że dynamika zmian grubości warstwy roślin między walcami wciągająco-zgniatającymi w funkcji masy jednostkowej roślin była degresywna. Oznacza to, że coraz grubsze warstwy roślin zagęszczaly się coraz trudniej. Zwiększenie wilgotności roślin wpłynęło jednoznacznie na zmniejszenie grubości warstwy trawy między walcami wciągająco-zgniatającymi, przy czym dynamika spadku była również degresywna. Oznacza to, że wilgotniejsze rośliny było łatwiej zagęścić, ale podatność na zagęszczenie malała wraz ze zwiększaniem się tej wilgotności. Zjawiska te zachodziły przy liniowej charakterystyce sprężyn dociskających walce, których wstępne napięcie wynosiło  $519 \text{ N}$ . Statystyczna siła spójności między wartościami grubości warstwy materiału roślinnego a napięcia sprężyn wynosiła  $99\%$ .

Wykazany wpływ badanych czynników na przebieg grubości warstwy roślin między walcami wciągająco-zgniatającymi podczas pracy sieczkarni polowej przy rozdrabnianiu trawy pozwolił na próbę sformułowania równania regresyjnego wiążącego analizowane zmienne. Przy czym, w celu zmniejszenia liczby zmiennych niezależnych, iloczyn masy jednostkowej roślin (w  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ ) i prędkości zasilania (w  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) zastąpiono strumieniem masy (w  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ), który wyznaczono z pomiaru masy sieczki na wadze elektronicznej i czasu trwania ważenia dla każdej próbki eksperymentalnej. Analizowano różne postacie równań. Ostateczna formuła

była dobierana na podstawie największej wartości współczynnika determinacji i istotności współczynników regresyjnych. Dążąc do uzyskania jak najprostszej formy równania i uwzględniając przebieg zmian grubości warstwy roślin dla poszczególnych czynników zaproponowano równie regresyjne w postaci wielomianu, która jest również wygodna do interpretacji fizycznej poszczególnych współczynników regresyjnych:

$$g_w = 94,113 + 9,456q - 0,836n_{wg} - 0,607w, \quad (1)$$

gdzie:

- $g_w$  – grubość warstwy materiału roślinnego między tylną parą walców wciągająco-zgniatających, mm,
- $q$  – strumień masy roślin,  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ,
- $n_{wg}$  – prędkość obrotowa górnego walca wciągająco-zgniatającego,  $\text{obr}\cdot\text{min}^{-1}$ ,
- $w$  – wilgotność roślin, %.

W powyższej formule poszczególne cechy są silnie z sobą związane, a współczynnik determinacji wynosi  $R^2 = 80,3\%$ . Wysoce istotne są również poszczególne współczynniki regresji (tab. 1).

*Tabela 1. Wartości współczynników regresji i testów istotności dla modelu grubości warstwy trawy między tylnymi walcami wciągająco-zgniatającymi*  
*Table 1. Values of regression coefficients and significance tests for the empirical model of grass layer thickness between the rear feeding rolls*

Zmienna niezależna	Współczynnik regresji	Błąd standardowy	Wartość t-Studenta	Krytyczny poziom istotności
stała	94,113	9,825	9,58	<0,0001
q	9,456	0,474	19,95	<0,0001
$n_{wg}$	-0,836	0,135	-6,19	<0,0001
w	-0,607	0,050	-12,17	<0,0001

Interpretacja fizyczna oszacowanego równania regresyjnego, określającego Grubość warstwy materiału roślinnego między tylnymi walcami wciągająco-zgniatającymi siewkarni polowej podczas rozdrabniania trawy jest następująca.

Jeśli strumień masy trawy zwiększy się o  $1 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ , to przy nie zmieniających się pozostałych zmiennych (prędkości obrotowej górnych walców i wilgotności roślin) grubość warstwy materiału roślinnego między walcami wciągająco-zgniatającymi zwiększy się w przybliżeniu o 9,5 mm, a w przypadku gdy zwiększy się prędkość obrotowa górnych walców i wilgotność roślin o jednostkę, przy zachowaniu stosownych warunków, grubość tej warstwy zmniejszy się odpowiednio około 0,8 i 0,6 mm.

Przedstawiona interpretacja jest logiczna i odpowiada rzeczywistym zjawiskom. Plon trawy zgrabionej w wałki można powiązać ze strumieniem masy, rozstawem wałków oraz prędkością jazdy agregatu ciągnik-sieczkarnia następującą zależnością:

$$Q_t = 10 \frac{q}{b_{rw} v_s}, \quad (2)$$

gdzie:

- $Q_t$  – plon roślin zgrabionych w wałki, t·ha<sup>-1</sup>,
- $q$  – strumień masy roślin, kg·s<sup>-1</sup>,
- $b_{rw}$  – rozstaw wałków roślin, m,
- $v_s$  – prędkość jazdy agregatu ciągnik-sieczkarnia, m·s<sup>-1</sup>.

Rozwiązując układ równań, otrzymano ostateczną postać formuły półempirycznej, która może być wykorzystana do oszacowania plonu trawy:

$$Q_t = \frac{10}{b_{rw} v_s} \cdot \frac{g_w - 94,113 + 0,836n_{wg} + 0,607w}{9,456}. \quad (3)$$

Z otrzymanej zależności wynika, że w celu monitorowania plonu roślin trawy w czasie rzeczywistym przez pomiar grubości warstwy materiału roślinnego między tylną parą walców wciągająco-zgniatających potrzebna jest znajomość prędkości obrotowej górnego walca, prędkości jazdy agregatu ciągnik-sieczkarnia, wilgotności zbieranych roślin i rozstawu zgrabionych wałków. W komputerze pokładowym, wspomagającym pracę agregatu ciągnik-sieczkarnia powinien być zainstalowany program użytkowy, w którym operator będzie wprowadzał jedynie gatunek zbieranej rośliny i rozstaw wałków. Na bieżąco, w czasie rzeczywistym, należy mierzyć wychylenie tylnych walców, prędkość obrotową górnego walca, prędkość jazdy i wilgotność roślin. W tym celu na wale napędowym górnego walca wciągająco-zgniatającego należy zainstalować czujnik do pomiaru prędkości obrotowej. Prędkość jazdy można mierzyć za pomocą radaru lub przetwornika prędkości obrotowej zamontowanego na kole ciągnika lub maszyny. Wilgotność roślin może być mierzona czujnikiem pojemnościowym zainstalowanym w kanale wyrzutowym sieczkarni. W metodzie tej ujęto najważniejsze procesy związane z transportem i zagęszczaniem materiału roślinnego przez zespół walców wciągająco-zgniatających.

## **Wnioski**

1. Na podstawie otrzymanego równania regresyjnego można stwierdzić, że zwiększenie strumienia masy roślin trawy o jednostkę, przy nie zmieniających się pozostałych zmiennych (prędkości obrotowej walców wciągająco-zgniatających i wilgotności roślin), spowodowało zwiększenie grubości warstwy materiału roślinnego między tylną parą walców w przybliżeniu o 9,5 mm. Zwiększenie prędkości obrotowej górnych walców i wilgotności roślin o jednostkę, przy zachowaniu stosownych warunków, spowodowało zmniejszenie grubości tej warstwy odpowiednio około 0,8 i 0,6 mm.
2. Monitorowanie plonu roślin trawy zbieranej sieczkarnią polową jest możliwe przez pomiar grubości warstwy materiału roślinnego między tylną parą walców wciągająco-zgniatających, z uwzględnieniem bieżącego pomiaru prędkości obrotowej górnego walca, prędkości jazdy agregatu ciągnik-sieczkarnia i wilgotności roślin. Potrzebna jest również informacja o rozstawie wałków trawy.

## **Bibliografia**

Ehlert D., Schmidt H. 1995. Ertragskartierung mit Feldhäckslern. Landtechnik, Jg.50(4): 204-205.

Ehlert D. 1999. Ertragskartierung in selbstfahrenden Feldhäckslern. Landtechnik, Jg.54(2): 84-85.

Lisowski A., Klonowski J., Buliński J., Sypuła M., Nowakowski T., Gach S., Kotecki L., Kijoch J. 2004. Badania przepływu strumienia masy w maszynach do zbioru materiałów roślinnych dla potrzeb monitorowania i mapowania plonu. Sprawozdanie z grantu 3 P06R 023 23. Zakład Maszyn Rolniczych, SGGW, Warszawa.

Schmittmann O., Osman A.M., Kromer K-H. 2000. Durchsatzmessung bei Feldhäckslern. Landtechnik, Jg.55(4): 286-287.

*Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2002-2004, jako projekt badawczy 3P06R 023 23*



**YIELD MONITORING OF GRASS BASED  
ON PLANT MATERIAL LAYER THICKNESS MEASURED  
BETWEEN THE REAR FEEDING ROLLS  
OF THE TRAILED FORAGE HARVESTER**

**Summary**

The method for yield monitoring during grass harvesting with the trailed forage harvester, based on plant material layer thickness measured between the rear feeding rolls is presented. It was found that the layer during thickness measurements it was essential to monitor constantly the upper roll rotational speed, tractor-harvester aggregate speed and plant moisture content. The information on the grass swath spacing was also needed.

**Key words:** monitoring, yield, grass