

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

## METODY MONITOROWANIA I MAPOWANIA PLONU ROŚLIN KUKURYDZY ZBIERANYCH SIECZKARNIĄ POŁOWĄ

### Streszczenie

Przedstawiono monitorowanie plonu roślin kukurydzy przez pomiar zapotrzebowania mocy efektywnej bazy sieczkarni (I), grubości warstwy roślin między tylną parą walców wciągająco-zgniatających (II) i siły naporu dynamicznego strumienia masy w kanale wyrzutowym (III) z uwzględnieniem ciągłego pomiaru wilgotności. Na bazie tych metod sporządzono mapy plonów kukurydzy z wykorzystaniem DGPS. Błąd pomiaru plonu w stosunku do plonu rzeczywistego, wyznaczony w odniesieniu do całkowitej masy zebranych roślin kukurydzy wynosił dla metody I – 2-4%, II – 0,5-2% i III – 0,4-2%.

**Słowa kluczowe:** monitorowanie, mapowanie, plon, kukurydza

### Wykaz oznaczeń

- $g_w$  – grubość warstwy materiału roślinnego między tylną parą walców wciągająco-zgniatających, mm,  
 $i_p$  – przełożenie między prędkości obrotową wału napędzającego WOM ciągnika i napędowego tarczy nożowej,  
 $M_p$  – moment obrotowy na WOM ciągnika, N·m,  
 $n_p, n_{wg}$  – prędkość obrotowa WOM ciągnika, górnego walca obr·min<sup>-1</sup>,  
 $n_t$  – prędkość obrotowa tarczy nożowej zespołu rozdrabniającego, obr·min<sup>-1</sup>,  
 $P_p, P_{ae}, P_{be}, P_{pe}$  – zapotrzebowanie mocy całkowitej na WOM ciągnika oraz efektywnej adaptera, zespołów bazy sieczkarni i na WOM ciągnika, kW,  
 $p_e, p_s$  – ciśnienie na wejściu i wyjściu silnika hydraulicznego, MPa,  
 $q$  – strumień masy roślin, kg·s<sup>-1</sup>,  
 $Q_h$  – natężenie strumienia oleju skierowanego do silnika hydraulicznego, l·min<sup>-1</sup>,  
 $Q_k$  – plon roślin kukurydzy, t·ha<sup>-1</sup>,  
 $v_s$  – prędkość jazdy agregatu ciągnik-sieczkarnia, m·s<sup>-1</sup>,

- w* – wilgotność roślin, %,  
*z* – liczba noży zainstalowanych na tarczy, szt.,  
*b, j, d, g* – indeksy, dotyczące pracy siewczarni pod obciążeniem i na biegu jałowym oraz silnika hydraulicznego dolnego i górnego napędzających walce wciągająco-zgniatające.

## **Wstęp**

Wdrożenie do praktyki rolniczej metody monitorowania strumienia masy roślin w czasie rzeczywistym podczas zbioru kukurydzy siewczarnią polową jest ciągle odraczane. Badane systemy pomiaru przepustowości siewczarni polowej charakteryzują się większą zawodnością, niż te, które są stosowane w kombajnach zbożowych. Jest to związane m.in. z większym zróżnicowaniem cech fizykochemicznych całych roślin ciętych na siewkę niż zbieranych ziaren. Prowadzone, w różnym zakresie, badania monitorowania przepustowości bazowały na pomiarze momentu obrotowego na bębnie rozdrabniającym i na rzutniku siewki [Vansichen, de Baerdemaeker 1993], szczeliny między walcami gładkimi i zgniatającymi, umieszczonymi tuż przed zespołem rozdrabniającym [Auernhammer i in. 1995, Ehlert, Schmidt 1995, Ehlert 1999, Schmittmann i in. 2000], objętości strumienia masy w kanale wyrzutowym [Schmittmann i in. 2000], siły wywieranej przez strumień siewki na czujnik tensometryczny [Auernhammer, Demmel 1996, Missotten i in. 1997, Schmittmann i in. 2000] i masy siewki na przyczepie, której skrzynię wsparto na czterech przetwornikach [Lee i in. 2002]. Przytoczone metody charakteryzowały się różną dokładnością pomiaru, która zależała od jakości zastosowanych czujników i równomierności rozkładu materiału roślinnego w zespołach roboczych maszyny. Ważne było utrzymanie jednakowej gęstości zagęszczanych roślin na długości walców, gęstości strumienia masy siewki w zakrzywieniu kanału wyrzutowego i równomiernego obciążenia czujników pomiarowych oraz konieczne było monitorowanie wilgotności roślin.

Celem badań była ocena metod monitorowania plonu roślin podczas zbioru kukurydzy przyczepianą siewczarnią polową przez jednoczesny pomiar zapotrzebowania mocy efektywnej bazy siewczarni (metoda I), grubości warstwy roślin między tylną parą walców wciągająco-zgniatających (metoda II) i siły naporu dynamicznego strumienia masy w kanale wyrzutowym (metoda III), z uwzględnieniem ciągłego pomiaru wilgotności roślin.

## **Metodyka badań**

Metodyka badań empirycznych obejmowała skalowanie aparatury pomiarowej oraz pomiary zapotrzebowania mocy efektywnej bazy siewczarni, grubości

warstwy materiału roślinnego między tylną parą walców wciągająco-zgniatających, prędkości obrotowej górnego walca, siły naporu dynamicznego strumienia siewki na płytkę tensometryczną w kanale wyrzutowym, wilgotności roślin i strumienia masy roślin w czasie rzeczywistym i została szczegółowo opisana w sprawozdaniu z grantu [Lisowski i in. 2004].

## Wyniki badań i dyskusja

W celu zmniejszenia wpływu czynników losowych, przeprowadzono badania stacjonarne. Stanowisko pomiarowe składało się z siewkarni przyczepianej wyposażonej w toporowy zespół rozdrabniający, napędzanej wałem odbioru mocy ciągnika Ursus 1234 o mocy silnika 85 kW. Całe rośliny kukurydzy (liście, łodygi, kolby, ich okrywy i ziarna) o średniej wilgotności 67, 57 i 44% oraz masie 10, 15 i 20 kg były układane na odcinku 4 m przenośnika taśmowego, którego prędkość zmieniano na trzech poziomach 0,5, 1,0 i 1,5 m·s<sup>-1</sup>. Uzyskano w ten sposób trzy poziomy masy jednostkowej roślin 2,50, 3,75 i 5,00 kg·m<sup>-1</sup> i siedem poziomów strumienia masy roślin 1,250, 1,875, 2,500, 3,750, 5,000, 5,625 i 7,500 kg·s<sup>-1</sup>. Rośliny zbierano ręcznie kosą spalinową w początku dojrzałości pełnej i w zależności od potrzeb poduszano je w warunkach naturalnych. W podstawowej konfiguracji parametrów stosowano 2, 5 i 10 noży, prędkość obrotową wału odbioru mocy ciągnika 540 i 1000 obr·min<sup>-1</sup> oraz różne przełożenie między wałem napędowym WOM a wałem napędzanym tarczy nożowej co w efekcie dawało 5 różnych prędkości obrotowych tej tarczy.

Metoda I. Ponieważ podczas badań stacjonarnych siewkarnia była połączona z podbieraczem, ze względu na łatwiejszą współpracę z przenośnikiem taśmowym, który stosowano do zasilania maszyny roślinami kukurydzy, a w czasie pracy na polu stosowano adapter do zbioru roślin wysokołodygowych, dlatego też, uwzględniając te różnice, od całkowitej mocy efektywnej pobieranej z WOM ciągnika odjęto moc potrzebną do napędu podbieracza. W ten sposób otrzymano zapotrzebowanie mocy efektywnej (użytecznej) do pracy zespołów roboczych bazy siewkarni – bez zespołów wymiennych (podbieracza lub adaptera):

$$P_{be} = P_{pe} - P_{ae}, \quad (1)$$

gdzie:

- $P_{pe}$  – zapotrzebowanie efektywnej mocy bazy siewkarni, kW,
- $P_{pe}$  – zapotrzebowanie efektywnej mocy na WOM ciągnika, kW,
- $P_{ae}$  – zapotrzebowanie efektywnej mocy adaptera, kW.

Zapotrzebowanie mocy efektywnej pracy sieczkarni, związanej z transportem roślin wewnątrz maszyny i ich cięciem, otrzymano z różnicy mocy całkowitej, zmierzonej na WOM ciągnika pod obciążeniem i na biegu jałowym:

$$P_{pe} = P_{pb} - P_{pj} = \frac{10^{-3}}{30} \pi (M_{pb} n_{pb} - M_{pj} n_{pj}), \quad (2)$$

gdzie:

$P_{pb}, P_{pj}$  – moc całkowita i moc biegu jałowego na WOM ciągnika, kW,  
 $M_{pb}, M_{pj}$  – całkowity moment obrotowy i moment biegu jałowego na WOM ciągnika, N·m,  
 $n_{pb}, n_{pj}$  – prędkość obrotowa WOM ciągnika, pod obciążeniem i na biegu jałowym, obr.·min<sup>-1</sup>.

Zapotrzebowanie mocy efektywnej do napędu podbieracza lub adaptera obliczono na podstawie różnicy mocy potrzebnej do pracy tych zespołów pod obciążeniem i na biegu jałowym:

$$P_{ae} = \frac{Q_{hdb}(p_{edb} - p_{sb}) - Q_{hgb}(p_{egb} - p_{sb}) - [Q_{hdj}(p_{edj} - p_{sj}) - Q_{hgj}(p_{egj} - p_{sj})]}{60}, \quad (3)$$

gdzie:

$Q_{hd}, Q_{hg}$  – natężenie strumienia oleju skierowanego do dolnego i górnego silnika hydraulicznego, l·min<sup>-1</sup>,  
 $p_{ed}, p_{eg}$  – ciśnienie na wejściu do dolnego i górnego silnika hydraulicznego, MPa,  
 $p_s$  – ciśnienie na wyjściu z silników hydraulicznych, MPa,  
 $b, j$  – indeksy, dotyczące pracy sieczkarni pod obciążeniem i na biegu jałowym.

Na podstawie przeprowadzonych badań empirycznych i wykazanego wpływu badanych czynników na zapotrzebowanie mocy efektywnej bazy sieczkarni oszacowano równanie regresyjne w postaci wielomianu. Moc efektywną powiązano ze strumieniem masy roślin ( $q$ ), prędkością obrotową tarczy nożowej ( $n_t$ ), wilgotnością roślin ( $w$ ) i liczbą noży zainstalowanych na tarczy ( $z$ ):

$$P_{be} = 10,634 + 4,576q + 0,015n_t - 0,391w + 0,633z, \quad (4)$$

gdzie:

$P_{be}$  – zapotrzebowanie efektywnej mocy bazy sieczkarni, kW,  
 $q$  – strumień masy roślin, kg·s<sup>-1</sup>,  
 $n_t$  – prędkość obrotowa tarczy nożowej zespołu rozdrabniającego, obr.·min<sup>-1</sup>,  
 $w$  – wilgotność roślin, %,  
 $z$  – liczba noży zainstalowanych na tarczy, szt.

Wszystkie współczynniki regresyjne w tej zależności są statystycznie istotne, a współczynnik determinacji wynosi  $R^2=89,4\%$ , natomiast prędkość obrotową tarczy nożowej  $n_t$  można obliczyć z zależności:

$$n_t = \frac{n_{pb}d_p}{d_t} = n_{pb}i_p, \quad (5)$$

gdzie:

$n_{pb}$  – prędkość obrotowa WOM ciągnika pod obciążeniem, obr. $\cdot$ min $^{-1}$ ,  
 $d_p, d_t$  – średnica podziałowa koła pasowego na wale napędzającym i napędzanym, m,  
 $i_p$  – przełożenie między prędkością obrotową wału napędzającego i napędzanego.

Metoda II. W równaniu regresyjnym na grubość warstwy materiału roślinnego między tylną parą walców wciągająco-zgniatających uwzględniono strumień masy roślin ( $q$ ), prędkość obrotową górnego walca ( $n_{wg}$ ) i wilgotność roślin ( $w$ ):

$$g_w = 73,180 + 9,100q - 0,526n_{wg} - 0,501w, \quad R^2=80,9\%, \quad (6)$$

gdzie:

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

Metoda III. O sile naporu dynamicznego strumienia siczki na płytkę tensometryczną zainstalowaną w kanale wyrzutowym siczekarni decydowały: strumień masy roślin ( $q$ ) prędkość obrotowa tarczy nożowej ( $n_t$ ), wilgotność roślin ( $w$ ) i liczba noży zainstalowanych na tarczy ( $z$ ):

$$F_n = 0,580 + 4,965q + 0,0229n_t - 0,166w - 0,313z, \quad R^2=86,8\%, \quad (7)$$

gdzie:

$F_n$  – siła naporu dynamicznego strumienia siczki, N,  
 $q$  – strumień masy roślin, kg $\cdot$ s $^{-1}$ ,  
 $n_t$  – prędkość obrotowa tarczy nożowej zespołu rozdrabniającego, obr. $\cdot$ min $^{-1}$ ,  
 $w$  – wilgotność roślin, %,   
 $z$  – liczba noży zainstalowanych na tarczy, szt.

Plon roślin można powiązać ze strumieniem masy, rozstawem rzędów, ich liczbą oraz prędkością jazdy agregatu ciągnik-sieczkarnia następującą zależnością:

$$Q_k = 10 \frac{q}{b_r i_r v_s}, \quad (8)$$

gdzie:

- $Q_k$  – plon roślin kukurydzy, t·ha<sup>-1</sup>,
- $q$  – strumień masy roślin, kg·s<sup>-1</sup>,
- $b_r$  – rozstaw rzędów kukurydzy, m,
- $i_r$  – liczba zbieranych rzędów, szt.,
- $v_s$  – prędkość jazdy agregatu ciągnik-sieczkarnia, m·s<sup>-1</sup>.

Rozwiązując odpowiednie układy równań, otrzymano ostateczną postać formuł półempirycznych, które wykorzystano do oszacowania plonu kukurydzy w badaniach polowych:

Metoda I. Pomiar zapotrzebowania mocy efektywnej bazy sieczkarni:

$$Q_k = \frac{3^{-1} \cdot 10^{-3} \pi (M_{pb} n_{pb} - M_{pj} n_{pj}) - 10P_{ae} - 106,34 - 0,15n_{pb} i_p + 3,91w - 6,33z}{4,576b_r i_r v_s}, \quad (9)$$

gdzie:

$$P_{ae} = \frac{Q_{hdb}(p_{edb} - p_{sb}) - Q_{hgb}(p_{egb} - p_{sb}) - [Q_{hdj}(p_{edj} - p_{sj}) - Q_{hgj}(p_{egj} - p_{sj})]}{60}. \quad (10)$$

Metoda II. Pomiar grubości warstwy materiału roślinnego między tylną parą walców wciągająco-zgniatających:

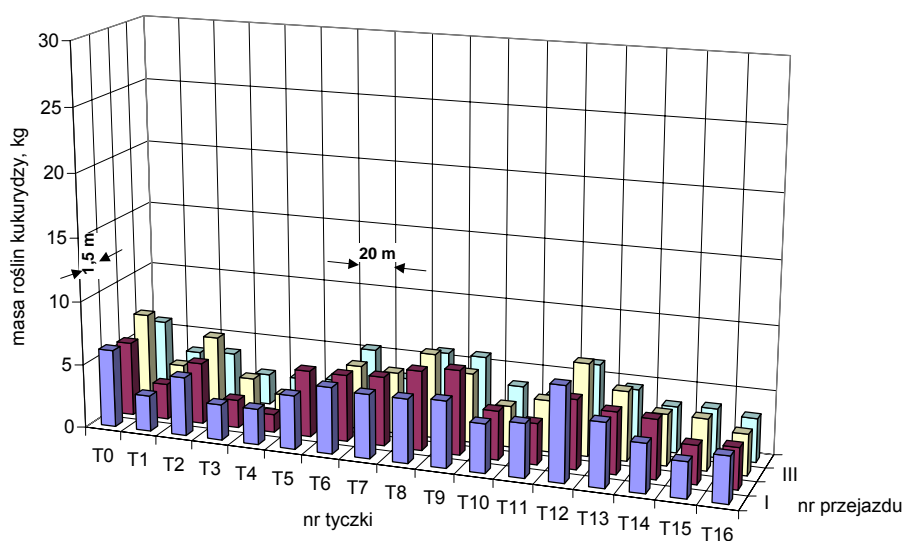
$$Q_k = \frac{10g_w - 731,80 + 5,26n_{wg} + 5,01w}{9,100b_r i_r v_s}. \quad (11)$$

Metoda III. Pomiar siły naporu dynamicznego strumienia pociętego materiału roślinnego na płytkę tensometryczną w kanale wyrzutowym sieczkarni:

$$Q_k = \frac{10F_n - 5,80 - 0,229n_{pb} i_p + 1,66w + 3,13z}{4,965b_r i_r v_s}. \quad (12)$$

Opracowane formuły półempiryczne zweryfikowano w badaniach polowych podczas zbioru kukurydzy przyczepianą sieczkarnią polową wyposażoną w ten sam zestaw aparatury pomiarowej, który stosowano podczas badań stacjonarnych.

Na zaplanowanej powierzchni pola roślin kukurydzy i sporządzonej siatce pomiarowej, w punktach węzłowych, odległych od siebie w kierunku równoległym do ruchu agregatu ciągnik-sieczkarnia 20 m i w kierunku prostopadłym - 1,5 m (co drugi rząd roślin) ścięto ręczną kosą spalinową rośliny kukurydzy z 1 rzędu na odcinku 2 m i zważono je na wadze elektronicznej. Z otrzymanych wartości mas roślin sporządzono histogram (rys. 1).



Rys. 1. Masa roślin kukurydzy w punktach węzłowych siatki pola o długości 360 m i szerokości 6 m (8 rzędów roślin)

Fig. 1. Green maize mass in the nodes of field net of length 360 m and width 6 m (8 crop rows)

Masę próbek roślin kukurydzy przeliczono na plon, dzieląc wartość masy przez powierzchnię, z której zebrano próbki, utworzoną z odcinka, z którego ścięto rośliny (2 m) i rozstawu rzędów (0,75 m).

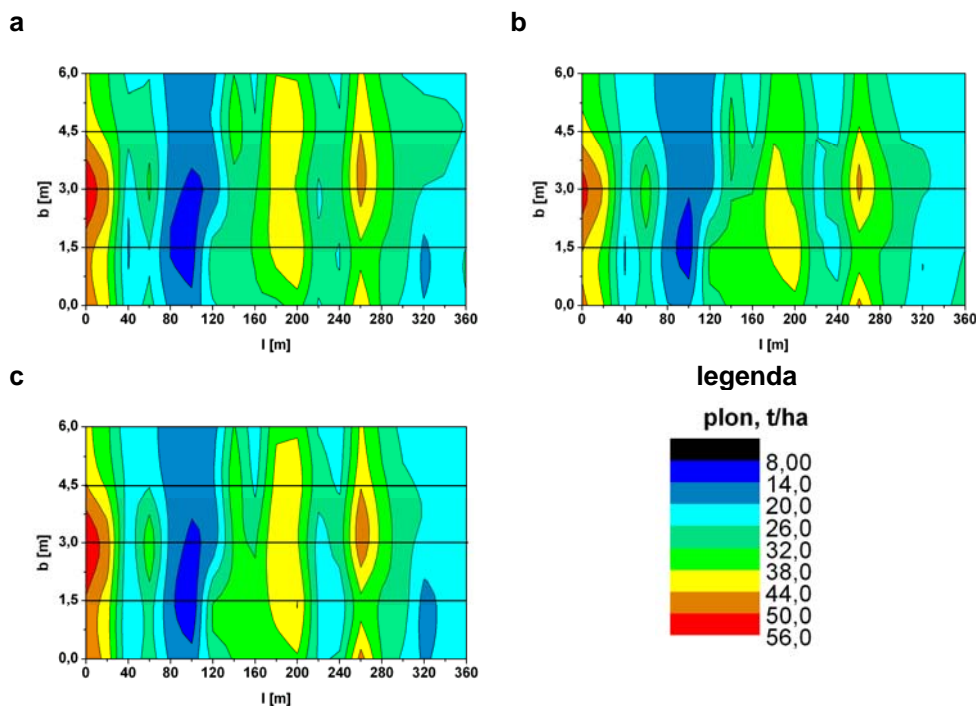
Uwzględniając warunki zbioru roślin kukurydzy oraz parametry robocze sieczkarni i agregatu ciągnik-maszyna oraz wykorzystując opracowane zależności na plon roślin trzema metodami, obliczono plony roślin kukurydzy w tych samych punktach węzłowych powierzchni pola, w których wyznaczono plon z pobranych próbek – w pomiarach bezpośrednich. Występujące w równaniach na plon zmienne

niezależne były rejestrowane ciągle podczas pracy agregatu ciągnik-sieczkarnia, ale do weryfikacji metod monitorowania plonu wybrano sygnały mierzonych wielkości pochodzące z obszarów punktów węzłowych pola (2 m). Położenie na polu agregatu ciągnik-sieczkarnia było rejestrowane przez DGPS i zgodnie z metodyką badań punkty węzłowe pola były osobno zapisane do pliku konfiguracyjnego w globalnym układzie współrzędnych, co pozwoliło na ich synchronizację. Na podstawie analizy statystycznej, przyjmując poziom istotności  $\alpha = 0,05$ , stwierdzono, że we wszystkich przypadkach, przy zastosowaniu testu t-Studenta, nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o zerowej wartości różnicy między wynikami pomiarowymi i obliczeniowymi. Obliczone wartości krytyczne poziomu istotności nie były mniejsze od przyjętej wartości 0,05. Statystyczna spójność wartości plonu kukurydzy obliczonego badanymi metodami z wartością plonu rzeczywistego wynosiła: I – 89%, II – 98% i III – 97%.

Pozytywna weryfikacja sformułowanych matematycznych modeli plonu roślin kukurydzy, pozwala na ich wykorzystanie do sporządzenia map plonu z zastosowaniem systemu globalnego pozycjonowania (DGPS) agregat ciągnik-sieczkarnia.

Zgodnie z opracowaną metodyką badań [Lisowski i in. 2004], wykorzystując program komputerowy OriginLab v.7, sporządzono trzy mapy plonu roślin kukurydzy monitorowanego jednocześnie trzema różnymi metodami (rys. 2). Rozpatrując otrzymane mapy można stwierdzić, że warstvice plonów dla każdej z metod mają silnie zbliżony układ i są spójne z rozkładem masy roślin kukurydzy w punktach węzłowych powierzchni pola (rys. 1). Błąd pomiaru plonu, w stosunku do plonu rzeczywistego, wyznaczony w odniesieniu do całkowitej masy zebranych roślin kukurydzy, dla metody bazującej na pomiarze zapotrzebowania mocy efektywnej bazy sieczkarni wynosił 2-4%, grubości warstwy roślin między tylną parą walców wciągająco-zgniatających – 0,5-2% i siły naporu dynamicznego strumienia masy sieczki – 0,4-2%. Stwierdzono, że maksymalny plon roślin był 5-krotnie większy od minimalnego, a wartość średnia wynosiła  $28,7 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Przy tak silnym zróżnicowaniu plonu celowe jest zbadanie przyczyn i zastosowanie odpowiedniej agrotechniki, aby wyrównać plon roślin kukurydzy na całej powierzchni pola i jednocześnie w pełni wykorzystać plonotwórcze możliwości gleby. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że w tym zakresie istnieją duże rezerwy, gdyż zmienność plonu roślin, nawet na niewielkiej powierzchni pola jest znacząca.





Rys. 2. Mapy plonu roślin kukurydzy sporządzone przez pomiar: a - mocy efektywnej bazy sieczkarni (bez adaptera), b - grubości warstwy materiału roślinnego między walcami wciągająco-zgniatającymi, c - siły naporu dynamicznego masy sieczki w kanale wyrzutowym (liniami poziomymi odznaczono szerokości robocze sieczkarni)

Fig. 2. Silage corn yield maps based on measurements on: a - efficient power requirement of silage harvester base (without adapter), b - plant material layer thickness between the couple of rear feeding rolls, c - mass flow rate impact force in spout (working width of silage harvester was marked with horizontal lines)

## Wnioski

1. Statystyczna spójność wartości plonu wyznaczonego badanymi metodami z wartością polonu rzeczywistego była wysoka i dla metody bazującej na pomiarze zapotrzebowania mocy efektywnej bazy sieczkarni wynosiła 89%, grubości warstwy roślin między tylną parą walców wciągająco-zgniatających – 98% i siły naporu dynamicznego strumienia masy sieczki w kanale wyrzutowym – 97%.

Błąd pomiaru plonu w stosunku do plonu rzeczywistego, wyznaczony w odniesieniu do całkowitej masy zebranych roślin kukurydzy wynosił dla metody I – 2-4%, II – 0,5-2% i III – 0,4-2%.

2. Stwierdzono, że podczas monitorowania plonu roślin kukurydzy zbieranej siewkarnia połową potrzebny jest ciągły pomiar wilgotności roślin.

## **Bibliografia**

Auernhammer H., Demmel M., Pirro P.J. M. 1995. Yield measurement on self propelled forage harvesters. ASAE Paper No. 951757. St. Joseph, Mich.

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.

Lee W.S., Burks T.F., Schueller J.K. 2002. Silage yield monitoring system. ASAE Paper No. 021165. St. Joseph, Mich.

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.

Missotten B., Broos B., Stubbe G., de Baerdemaeker J. 1997. A yield sensor of forage harvesters. In J.V. Stafford, ed. Precision Agriculture '97. Vol. II: Technology, IT, and Management. Oxford: BIOS Scientific Publisher. pp. 529-536.

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

Vansichen R., de Baerdemaeker J. 1993. A measurement technique for yield mapping of corn silage. Journal of Agricultural Engineering Research. 55: 1-10

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

**YIELD MONITORING AND MAPPING METHODS  
FOR GREEN MAIZE HARVESTING WITH  
THE TRAILED FORAGE HARVESTER**

**Summary**

The were presented the yield monitoring methods for green maize, based on efficient power requirement measurements of silage harvester base (I), plant material layer thickness between the couple of rear feeding rolls (II), and mass flow rate impact force in the spout (III). The moisture content of silage being harvested was considered too. Using DGPS, the silage corn yield maps based on these methods were created. The yield error calculated between measurements values and real yield was related to the whole mass of green maize harvested and amounted for particular methods to: method I – 2-4%, method II – 0,5-2% and method III – 0,4-2%.

**Key words:** monitoring, mapping, yield, corn