

SELECTED SIMULATION ANALYSIS FOR USE IN DESIGNING OF SHEAR-FINGER CUTTING SECTIONS

Summary

In the article, a new, developed by the authors mathematical model of the process of plant material cutting with use of a shear – finger cutting section, has been presented. Innovatory nature of this model involves a new approach to the plant material to be cut. Other, so far developed models do not take into account the stalk stiffness changes along its length, which in the opinion of the authors is a too big simplification. The computer program named ŻDŹBŁO_1 was performed for needs of the simulation analysis. This program can be applied at the stage of design of the shear-finger cutting section. It should be observed that these mechanisms are widely used in agricultural machines.

WYBRANE OBLICZENIA SYMULACYJNE NA UŻYTEK PROJEKTOWANIA NOŻYCOWO-PALCOWYCH ZESPOŁÓW TNĄCYCH

Streszczenie

W pracy przedstawiono autorski matematyczny model procesu cięcia roślin żdźbłowych. Przedstawiony model uwzględnia skomplikowaną, zmienną budowę morfologiczną żdźbła, a także oddziaływanie środowiska zewnętrznego podczas ścinania rośliny. W pracy przedstawiono także wybrane wyniki obliczeń symulacyjnych na modelu matematycznym. Dla potrzeb obliczeń symulacyjnych opracowano program komputerowy ŻDŹBŁO_1, który może posłużyć do optymalizacji konstrukcji zespołów tnących na etapie projektowania oraz generowania nowych rozwiązań konstrukcyjnych.

1. Wprowadzenie

Nożycowo-palcowy zespół tnący jest jednym z najważniejszych zespołów roboczych stosowanych w maszynach rolniczych, z których na pierwszy plan wysuwają się kombajny zbożowe, siewczkarnie oraz kosiarki.

Istniejące rozwiązania konstrukcyjne tego typu zespołów tnących charakteryzują się dużą energochłonnością procesu cięcia, a co w efekcie się z tym wiąże ich układy napędowe wyposażone są w silniki o stosunkowo dużych mocach. Wskazuje to na fakt, że znane rozwiązania konstrukcyjne powstały w dużej mierze na podstawie intuicji konstruktorskiej. Związane to jest z brakiem istnienia modeli matematycznych procesu cięcia nożycowo-palcowym zespołem tnącym, dzięki którym mogą być prowadzone obliczenia symulacyjne, z których wyniki są podstawą do optymalizacji konstrukcji zespołów tnących oraz możliwości zwiększenia efektywności procesu cięcia.

Zdaniem autorów analiza teoretyczna procesu cięcia roślin żdźbłowych, a w szczególności zbóż, wymagała opracowania modelu, który w sposób najlepszy będzie odwzorowywał obiekt rzeczywisty. Tylko spełnienie tych wymagań daje pewność, że zamodelowany proces w sposób analityczny będzie odpowiadał rzeczywistości.

Dotychczas przeprowadzone symulacje matematyczne procesu cięcia roślin żdźbłowych, traktowały żdźbło jako element belkowy o przekroju kołowym i o jednakowych właściwościach fizykomechanicznych na całej długości. Żdźbło traktowano jako belkę jednostronnie utwierdzoną z ograniczeniem wszystkich punktów swobody w miejscu utwierdzenia. Przepisywano mu również stałą średnicę i stały moduł Younga na całej długości. Po wielu analizach stwierdzono jednoznacznie, że powyższe założenia nie odpowiadają rzeczywistości, gdyż żdźbło zboża jest elemen-

tem niezwykle skomplikowanym pod względem struktury oraz właściwości fizykomechanicznych.

Żdźbło roślin zbożowych składa się z elementów rurowych o różnych wymiarach geometrycznych połączonych międzywęzłami. Węzły, czyli kolanka, mają różną w stosunku do międzywęzła budowę. Charakteryzują się dużą twardością i sztywnością. Całe żdźbło zakończone jest kłosem, w którym skupiona jest największa masa w stosunku do pozostałej części żdźbła. Roślina jest utwierdzona w podłożu za pomocą systemu korzeniowego.

Zdaniem autorów na podstawie powyższych obserwacji można zaproponować całkowicie nowy model procesu cięcia.

2. Model matematyczny

Na podstawie obserwacji rzeczywistego cięcia żdźbła realizowanego nożycowo-palcowym zespołem tnącym zaproponowano model matematyczny odwzorowujący ten proces. Proces cięcia podzielono na trzy etapy:

- etap I – dosunięcie żdźbła do krawędzi przeciwnącej,
- etap II – odkształcenie przekroju żdźbła,
- etap III – rozdzielenie żdźbła.

Szczegółowy opis poszczególnych etapów cięcia został przedstawiony w pracy autorów [5].

W ramach prowadzonych działań na rzecz stworzenia procedury do obliczeń symulacyjnych na modelu, prace zostały zorientowane na najbardziej pracochłonne obliczenia związanych z etapem I i II procesu cięcia, tj. dosunięciem żdźbła do krawędzi przeciwnącej i odkształceniem przekroju żdźbła.

Uwzględniając zmienną, skomplikowaną budowę morfologiczną żdźbła, zmianę jego przekroju i sztywności oraz opór powietrza towarzyszący odchyłaniu się żdźbła, etap I procesu cięcia opisano równaniem:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + q \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -p, \quad (1)$$

gdzie:

- x - współrzędna długości żdźbła,
- y - współrzędna odchylenia pionowego,
- q - masa rozłożona żdźbła (gęstość liniowe żdźbła),
- E - moduł sprężystości Younga,
- J - moment bezwładności przekroju,
- t - czas,
- p - siła jednostkowa oddziaływania oporu powietrza.

Równanie (1) jest modelem matematycznym uwzględniającym:

- etap dosunięcia żdźbła do krawędzi przeciwnącej,
- etap ugięcia żdźbła podpartego na krawędzi przeciwnącej.

Przyjmując sztywność względną żdźbła, stałą w całym przedziale, równanie (1) można uprościć do postaci:

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + q \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -p. \quad (2)$$

Natomiast w miejscach zmiany sztywności żdźbła model matematyczny przyjmuje postać, bardziej złożoną, którą opisuje zależność:

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \frac{\partial EJ}{\partial x} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 EJ}{\partial x^2} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + q \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -p. \quad (3)$$

Do obliczeń na modelu matematycznym (1) niezbędne jest określenie jednostkowej siły oporu powietrza p , którą opisano zależnością [2]:

$$p = c_x \frac{\rho_p}{2} d_z v^2, \quad (4)$$

gdzie:

- c_x - współczynnik oporu powietrza,
- ρ_p - gęstość powietrza,
- d_z - średnica zewnętrzna żdźbła,
- v - prędkość żdźbła w określonym punkcie.

3. Obliczenia na modelu matematycznym

3.1. Program komputerowy

Do rozwiązania równania różniczkowego (2) posłużono się metodą różnic skończonych. Operatory różniczkowania funkcji ciągłych zastąpiono odpowiadającymi im operatorami różnic wartości funkcji w wybranych punktach. Wszystkie ciągłe funkcje, określono zbiorem ich wartości w punktach dyskretnych, dostatecznie gęsto pokrywających obszar zmienności funkcji. W ten sposób równanie różniczkowe cząstkowe (2) zastąpiono układem równań różnic skończonych, które przyjmuje postać:

$$\frac{EJ}{h^4} (y_{i-2} - 4y_{i-1} + 6y_i - 4y_{i+1} + y_{i+2}) + \frac{q}{\Delta t^2} (y_i - 2y_{1i} + y_{0i}) = -c_x \frac{\rho_p}{2} d_z \frac{v_p}{\Delta t} (y_i - y_{1i}), \quad (5)$$

gdzie:

- h - odległość między przedziałami całkowania,
- y_{1i} - współrzędna y_i dla czasu $t - \Delta t$,
- y_{0i} - współrzędna y_i dla czasu $t - 2\Delta t$,
- y_i - współrzędna y_i dla czasu t .

W celu uproszczenia zapisu podstawiono do wzoru (5) następujące zależności:

$$f = 6 \frac{EJ}{h^4} + \frac{q}{\Delta t^2} + c_x \frac{\rho_p}{2} d_z v_p, \quad (6)$$

$$c = \frac{EJ}{h^4 f}, \quad (7)$$

$$d = \frac{q}{\Delta t^2 f}, \quad (8)$$

$$e = \frac{1}{f} \left(\frac{2q}{\Delta t^2} + c_x \frac{\rho_p}{2} d_z v_p \right), \quad (9)$$

aby w efekcie otrzymać układ równań liniowych:

$$y_i = -cy_{i-2} + 4cy_{i-1} + 4cy_{i+1} - cy_{i+2} - dy_{0i} + ey_{1i}. \quad (10)$$

Do rozwiązania układu równań posłużono się metodą iteracyjną Seidla [3]. Po przekształceniu równanie (10) przyjmuje postać:

$$\Delta y_i = -y_i + c(-y_{i-2} + 4y_{i-1} + 4y_{i+1} - y_{i+2}) + d y_{0i} + e y_{1i}, \quad (11)$$

gdzie:

Δy_i - oznacza przyrost ugięcia y_i w kolejnym kroku iteracji.

Podczas rozwiązywania modelu wykorzystano metodę nadrelaksacji, przyjmując współczynnik nadrelaksacji równy $w=1,3$ [3].

Ostatecznie ugięcie żdźbła w punkcie (i) w kolejnym kroku iteracyjnym wynosi:

$$y_i = y_i^* + w \Delta y_i, \quad (12)$$

gdzie:

y_i^* - oznacza wartość ugięcia w poprzednim kroku iteracyjnym.

Równanie różniczkowe (3) obowiązujące w miejscach zmiany sztywności żdźbła zastępuje się analogicznie bardziej złożonym układem równań liniowych.

Do rozwiązania powyższego modelu napisano autorski program komputerowy o nazwie ŻDŻBŁO_1 w języku Turbo Pascal, który umożliwia obliczenie następujących wielkości:

- a) ugięcie żdźbła w dowolnym punkcie,
- b) siłę cięcia żdźbła,
- c) pracę cięcia żdźbła,
- d) reakcję krawędzi przeciwnącej.

3.2. Wybrane wyniki obliczeń symulacyjnych

Po licznych, wstępnych obliczeniach przyjęto następujące parametry sterujące programem komputerowym ŻDŻBŁO_1:

- przedział czasu (krok) całkowania $\Delta t = 10^{-6}$ s,
- dokładność obliczeń $\varepsilon = 10^{-10}$ m,
- maksymalna ilość kroków iteracji $\max_iter = 10\ 000$,
- współczynnik nadrelaksacji przyspieszający obliczenia w metodzie Seidla $w = 1,3$ [3].

Obliczenia symulacyjne prowadzone były dla następujących parametrów:

A. Parametry nożycowo-palcowego zespołu tnącego:

- podziałka nożowa 76,2 mm,
- podziałka palcowa 76,2 mm,
- skok listwy nożowej 76,2 mm,
- prędkość kątowna korby $\omega = 47,57 \text{ rad/s}$, co odpowiada średniej prędkości nożyka, $v_{n\dot{s}r} = 1,155 \text{ m/s}$,
- promień korby $r = 35,7 \text{ mm}$,
- długość targańca $l = 230 \text{ mm}$,
- odległość osi obrotu korby od płaszczyzny ruchu listwy nożowej $h = 80 \text{ mm}$,
- odległość podpór 10 mm,
- odległość nożyka od krawędzi przeciwnącej 1,85 mm,
- przemieszczenie podpór względem siebie 0 mm.

B. Parametry geometryczne źdźbła:

- długość pierwszego odcinka źdźbła $l_1 = 186 \text{ mm}$,
- długość drugiego odcinka źdźbła $l_2 = 278 \text{ mm}$,
- długość trzeciego odcinka źdźbła $l_3 = 368 \text{ mm}$,
- długość kłosa $l_k = 92 \text{ mm}$,
- średnica zewnętrzna pierwszego odcinka źdźbła $d_{z1} = 4,05 \text{ mm}$,
- średnica wewnętrzna pierwszego odcinka źdźbła $d_{w1} = 3,19 \text{ mm}$,
- średnica zewnętrzna drugiego odcinka źdźbła $d_{z2} = 3,62 \text{ mm}$,
- średnica wewnętrzna drugiego odcinka źdźbła $d_{w2} = 2,86 \text{ mm}$,
- średnica zewnętrzna trzeciego odcinka źdźbła $d_{z3} = 2,55 \text{ mm}$,
- średnica wewnętrzna trzeciego odcinka źdźbła $d_{w3} = 1,97 \text{ mm}$.

C. Parametry fizykomechaniczne źdźbła:

- moduł Younga wyznaczany z równania zgodnie z [4],
- siła rozdzielająca źdźbło wyznaczona ze wzoru zgodnie z [1],
- masa źdźbła $m_z = 5,2 \text{ g}$,
- masa kłosa $m_k = 4,3 \text{ g}$.

D. Oddziaływanie otoczenia na źdźbło:

- współczynnik oporu powietrza $c_x = 0,98$,
- gęstość powietrza $\rho_p = 1,191 \text{ kg/m}^3$.

Głównym celem obliczeń symulacyjnych było wyznaczenie średniej pracy dosuwu $L_{I\dot{s}r}$ w zależności od wysokości cięcia h_c , momentu bezwładności J przekroju poprzecznego oraz modułu Younga E źdźbła. Praca $L_{I\dot{s}r}$ wyznaczona została dla długości drogi dosuwu źdźbła do krawędzi przeciwnącej $y_{d\dot{s}r} = 34,5 \text{ mm}$.

Obliczenia prowadzono dla:

- dziesięciu różnych wysokości cięcia h_c z przedziału 60÷150 mm,
- pięciu różnych średnic, co odpowiadało:

- zmianom momentów bezwładności J z przedziału $(3,1187\div 16,796)\text{mm}^4$,

- zmianom modułu Younga E z przedziału $2883\div 6383\text{N/mm}^2$.

Badania symulacyjne prowadzono dla średnic źdźbeł różniących się o Δd (-1; -0,5; 0; 0,5; 1)mm.

Na rys. 1-4 przedstawiono wyniki obliczeń symulacyjnych energochłonności procesu cięcia za pomocą nożycowo-palcowego zespołu tnącego w oparciu o program obliczeniowy ŻDŹBŁO_1.

W wyniku obliczeń symulacyjnych okazało się, że na całkowitą wartość pracy cięcia L_{cj_m} opisanej równaniem:

$$L_{cj_m} = L_I + L_{IIa} + L_{IIb} + L_{III}, \quad (13)$$

gdzie:

L_I - praca dosunięcia źdźbła do krawędzi przeciwnącej,

L_{IIa} - praca zginania źdźbła podpartego na krawędziach przeciwnących,

L_{IIb} - praca spłaszczenia przekroju poprzecznego źdźbła,

L_{III} - praca rozdzielania źdźbła,

znaczący wpływ mają tylko dwie prace, tj.:

- praca dosunięcia źdźbła do krawędzi przeciwnącej L_I ,

- praca rozdzielania źdźbła L_{III} [1].

Mały wpływ pracy zginania L_{IIa} wynika z małej odległości podpór w układzie tnącym, dlatego zachodzi warunek $L_{IIb} \ll L_{IIa}$.

W związku z powyższym całkowita praca cięcia jest sumą dwóch prac, co można opisać równaniem:

$$L_{cj_m} = L_I + L_{III}, \quad (14)$$

Na rys. 1 przedstawiono wpływ drogi dosunięcia źdźbła do krawędzi przeciwnącej y_d na pracę cięcia źdźbła L_{cj_m} oraz pracę dosunięcia źdźbła do krawędzi przeciwnącej L_I .

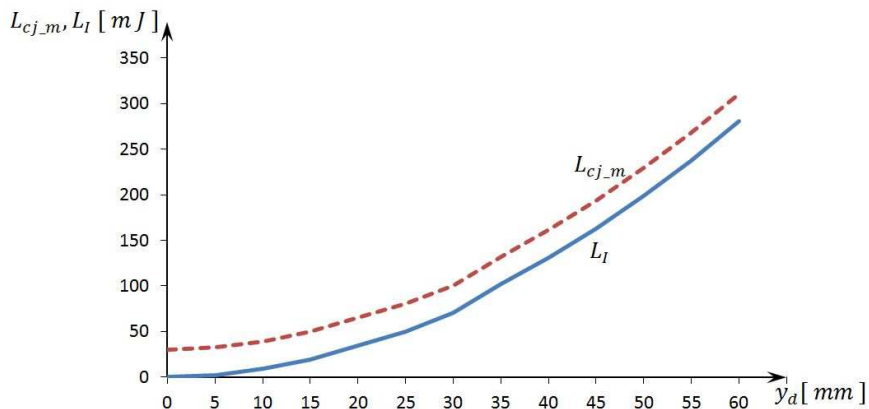
Program komputerowy ŻDŹBŁO_1 umożliwia dodatkowo przeprowadzenie obliczeń wpływu wysokości cięcia źdźbła h_c na pracę L_{cj_m} i L_I , co przedstawiono na rys. 2.

Obliczenia wykazały, że wraz ze wzrostem wysokości cięcia maleje energochłonność procesu cięcia źdźbła.

Na rys. 3 przedstawiono wpływ zmiany średnicy źdźbła Δd na pracę cięcia L_{cj_m} i L_I . Zmiana średnic o wartość Δd dotyczyła wszystkich odcinków źdźbła. Wraz ze zmianą średnicy zewnętrznej, zmieniano odpowiednio średnicę wewnętrzną zakładając stałą grubość ścianki źdźbła.

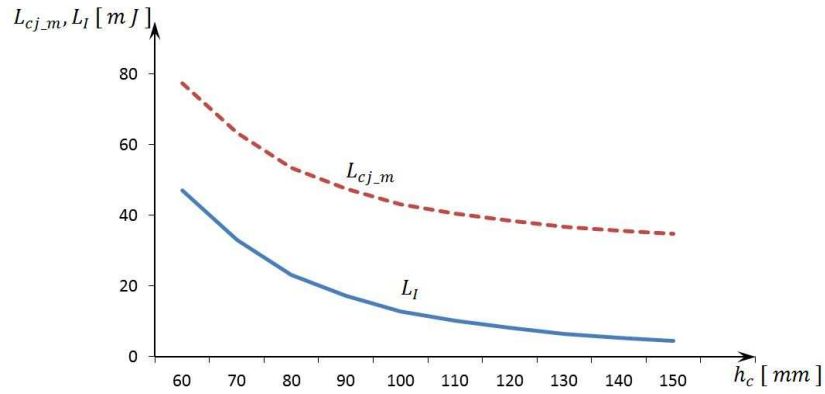
Wraz ze wzrostem średnicy źdźbła zauważono wzrost udziału pracy L_{III} rozdzielającej źdźbło.

Na rys. 4 przedstawiono wykres wychylenia źdźbła y w funkcji długości źdźbła x dla danej chwili czasu.



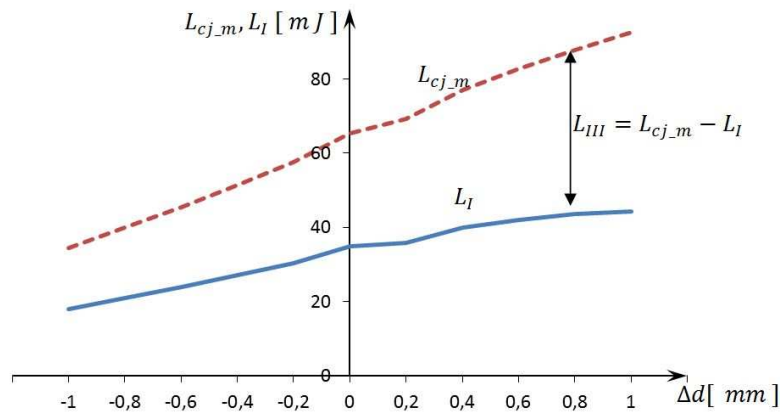
Rys. 1. Praca cięcia źdźbła L_{cj_m} i praca dosunięcia źdźbła do krawędzi przeciwnącej L_I w funkcji długości drogi dosunięcia źdźbła y_d dla wysokości cięcia $h_c = 70 \text{ mm}$.

Fig. 1. Work of plants stalk cutting L_{cj_m} and work of plants stalk pressing to the fingers side edge L_I in function of pressing the plants stalk distance length y_d for cutting height $h_c = 70 \text{ mm}$



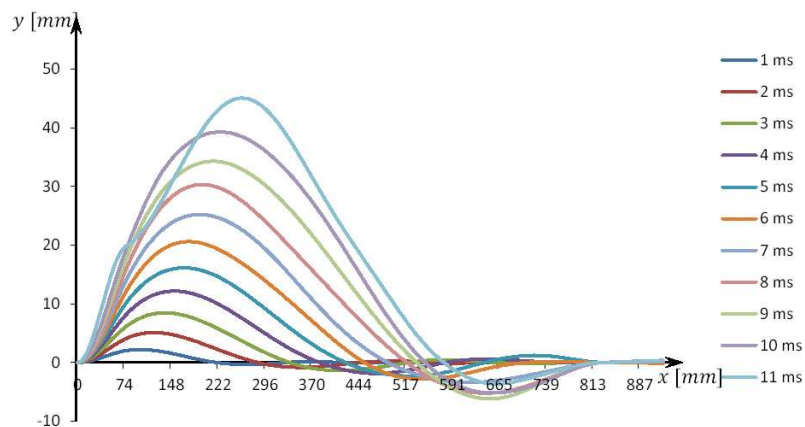
Rys. 2. Praca cięcia źdźbła L_{cj_m} i praca dosunięcia źdźbła do krawędzi przeciwnącej L_l w funkcji wysokości cięcia źdźbła h_c dla drogi dosuwu $y_d = 20\text{mm}$

Fig. 2. Work of plants stalk cutting L_{cj_m} and work of plants stalk pressing to the fingers side edge L_l in function of cutting height h_c for pressing the plants stalk distance length $y_d = 20\text{mm}$



Rys. 3. Praca cięcia źdźbła L_{cj_m} i praca dosunięcia źdźbła do krawędzi przeciwnącej L_l w funkcji zmiany średnicy źdźbła Δd_z dla wysokości cięcia $h_c = 70\text{mm}$ i drogi dosuwu $y_d = 20\text{mm}$

Fig. 3. Work of plants stalk cutting L_{cj_m} and work of plants stalk pressing to the fingers side edge L_l in function of plants stalk diameter changes Δd_z for cutting height $h_c = 70\text{mm}$ and pressing the plants stalk distance length $y_d = 20\text{mm}$



Rys. 4. Wychylenie źdźbła w danej chwili czasu pod działaniem noża

Fig. 4. Deflection of plants stalk in fixed term of time under influence of knife

Szczegółowa weryfikacja doświadczalna opracowanego modelu matematycznego zostanie zaprezentowana w następnej publikacji.

4. Wnioski

1. Przedstawiony w pracy model matematyczny, na bazie którego przeprowadzono obliczenia symulacyjne oceny energochłonności cięcia roślin źdźbłowych po pozytywnej

weryfikacji doświadczalnej, może być podstawą doboru optymalnych parametrów konstrukcyjnych, nożycowo-palcowych zespołów tnących.

2. Obliczenia symulacyjne prowadzone na modelu matematycznym wykazały, że istotny wpływ na pracę cięcia źdźbła realizowanego nożycowo-palcowym zespołem tnącym wywierają w kolejności:

- droga dosuwu źdźbła do krawędzi przeciwnącej,

- wysokość cięcia,
 - cechy geometryczne przekroju poprzecznego źdźbła.
3. Przeprowadzone obliczenia symulacyjne wykazały, że zdecydowanie mniejszy wpływ na pracę cięcia wywierają:
- masa źdźbła,
 - opór powietrza,
 - prędkość cięcia.

5. Literatura

- [1] Bochat A., Zastempowski M.: Identyfikacja quasi-statycznej siły cięcia źdźbeł pszenżyta na użytek projektowania noży-

- cowo-palcowych zespołów tnących, *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2009, Vol. 54 (2).
- [2] Bukowski J., Kijkowski P: Kurs mechaniki płynów. Warszawa: PWN, 1980.
- [3] Szmelter J.: *Metody komputerowe w mechanice*. Warszawa: PWN, 1980.
- [4] Zastempowski M., Bochat A.: Badania cech fizykomechanicznych źdźbeł pszenżyta dla potrzeb symulacji komputerowej procesu cięcia nożycowo-palcowym zespołem tnącym. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2009, Vol. 54 (1).
- [5] Zastempowski M., Bochat A.: Modeling of cutting process by shear-finger cutting block. (publikacja zgłoszona do druku 2010) *Applied Engineering in Agricultural*.