

## ANALIZA DYNAMIKI ŁADOWARKI DLA ROZDZIELNEGO NAPEŁNIANIA CZERPAKA MATERIAŁEM ZIARNISTYM

### Streszczenie

Przedstawiono sposób modelowania oraz wyniki komputerowej symulacji ruchu ładowarki czołowej T426 podczas rozdzielnego napełniania czerpaka materiałem ziarnistym. Proces napełniania czerpaka podzielono na fazę zagłębiania i obrotu. Jako składowe opory zagłębiania uwzględniono opór wcinania krawędzi poziomej, opór tarcia materiału o dno czerpaka oraz napór na tylną ściankę. Jako składowe opory obrotu uwzględniono natomiast opór ścinania na płaszczyźnie czołowej pryzmy oraz nacisk materiału na dno czerpaka. Wyniki przedstawiono w postaci czasowych przebiegów zmian wybranych kinematycznych i dynamicznych charakterystyk ruchu.

**Słowa kluczowe:** materiał ziarnisty, opory ruchu, dynamika, symulacja, ładowarka czołowa

### Oznaczenia

$A$	- współczynnik zależny od grubości i stępienia krawędzi tnącej
$K_x$	- jednostkowy opór wcinania krawędzi poziomej, $\text{kN/m}^2$
$L_0, b, L$	- długość, szerokość, głębokość czerpaka, m
$x$	- głębokość wcięcia czerpaka w zwal, m
$\rho$	- kąt usypowy materiału sypkiego, rad
$\varphi$	- kąt tarcia zewnętrznego, rad
$\gamma$	- ciężar objętościowy złoża, $\text{kN/m}^3$
$x_{s3}, y_{s3}$	- współrzędne położenia środka masy czerpaka w lokalnym układzie współrzędnych, m
$m_{cz}$	- masa czerpaka (bez materiału), kg
$G_{cz}$	- ciężar czerpaka (bez materiału), kN
$m_1, m_2, m_3$	- masa odpowiednio ciągnika, wysięgnika i czerpaka z materiałem, kg
$k_{3z}$	- promień bezwładności czerpaka z materiałem m
$W_{zi}, W_{oi}$	- składowe opory zagłębiania i obrotu kN
$R_{ij}$	- siła reakcji w parze kinematycznej ogniw „i” oraz „j”, kN
$M_{ijz}$	- moment w parze kinematycznej ogniw „i” oraz „j”, Nm

### Wprowadzenie

Dla każdego układu empirycznego można budować różne modele, zależne od przyjętego sposobu opisu, założeń i zastosowanych uproszczeń.

Najistotniejszym kryterium przy doborze modelu jest uwzględnienie tych właściwości układu rzeczywistego, które w rozważanym przypadku mają decydujący wpływ na analizowane zjawisko. Opracowanie modelu polega na przyjęciu szeregu założeń upraszczających, które umożliwiają opis matematyczny i analizę procesów zachodzących w badanym obiekcie. Wnikliwość, z jaką wprowadzane są uproszczenia ma zasadniczy wpływ na uzyskane wyniki. Przyjęcie zbyt dużych uproszczeń może spowodować pominięcie istotnych cech układu rzeczywistego, natomiast nadmierna złożoność modelu prowadzi zazwyczaj do skomplikowanego opisu matematycznego, zwiększenia czasu obliczeń itd. Jednym z częściej stosowanych uproszczeń podczas modelowania procesów dynamicznych jest pomijanie mało istotnych oddziaływań zewnętrznych. Na badany obiekt działa zazwyczaj znaczna liczba różnych czynników zewnętrznych, z których część można pominąć. Istnieją jednak oddziaływania wewnętrzne, których pominięcie wymaga głębokiej analizy. Jednym z nich jest opór ośrodka, w którym odbywa się ruch [Brach, Tyro 1986].

Celem pracy jest wyznaczenie wpływu sił oporu na obciążenie czerpaka ładowarki czołowej podczas rozdzielnego napełniania czerpaka materiałem ziarnistym. Wyznaczone, na podstawie równań Newtona – Eulera oraz równań równowagi sił i momentów sił, równania ruchu rozwiązano na drodze numerycznej, wykorzystując środowisko Matlab (Simulink). Wyniki przedstawiono w postaci czasowych przebiegów zmian wybranych kinematycznych i dynamicznych charakterystyk ruchu.

## Metodyka

Wypadkową siłę i wypadkowy moment sił bezwładności poszczególnych ogniw łańcucha kinematycznego ładowarki T426 wyznaczono według równań dynamiki Newtona. Równania równowagi dynamicznej członów utworzono przy wykorzystaniu zasady d’Alamberta [Boryga, Graboś 2003]. Na ich podstawie wyprowadzono następujące zależności analityczne:

- różniczkowe równanie ruchu ładowarki w fazie zagłębienia czerpaka w pryzmę materiału sypkiego (oznaczonej w dalszej części pracy – I)

$$R_{43x}s_{23} + R_{43y}c_{23} - \ddot{x}(m_1 + m_2 + m_{cz}) = R_{01z} \quad (1)$$

- równanie momentu obrotowego w parze kinematycznej obrotu czerpaka (dla fazy I oraz fazy obrotu oznaczonej w dalszej części pracy – III)

$$[(y_{s3}c_{23} - (x_{s3} + L_0)s_{23})G_{cz} - L_0R_{43y} - M_{43z} + \\ - m_3(k_{3z}^2 + L_0^2 + 2l_3x_{s3})\ddot{\theta}_3 + (x_{s3} + L_0)c_{23}m_3\ddot{x} = M_{23z} \quad (2)$$

- równania reakcji w parze kinematycznej obrotu czerpaka dla fazy I i III:

$$-R_{43x}c_3 + R_{43y}s_3 + m_3[(x_{s3} + L_0)c_3 - y_{s3}s_3]\dot{\theta}_3^2 -$$

$$m_3 s_2 \ddot{x} - m_3 [(x_{s3} + L_0) s_3 - y_{s3} c_3] \ddot{\theta}_3 + G_{cz} c_2 = R_{23x} \quad (3)$$

$$- R_{43x} s_3 - R_{43y} c_3 + m_3 [(x_{s3} + L_0) s_3 + y_{s3} c_3] \dot{\theta}_3^2 -$$

$$m_3 c_2 \ddot{x} - m_3 [(x_{s3} + L_0) c_3 - y_{s3} s_3] \ddot{\theta}_3 + G_{cz} s_2 = R_{23y} \quad (4)$$

gdzie:  $s_i = \sin(\theta_i)$ ,  $c_i = \cos(\theta_i)$ ,  $s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$ ,  $c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$ .

W równaniu (1) uwzględniono stałe wartości położeń kątowych wysięgnika  $\theta_2$  oraz czerpaka  $\theta_3$ . W równaniach (2), (3), (4) stałą wartość przyjmuje położenie kątowe wysięgnika  $\theta_2$ . Dodatkowo podczas fazy III uwzględniono stałą wielkość wcięcia czerpaka  $x$  w złożę, wyznaczoną po dwukrotnym całkowaniu równania (1).

Opory występujące podczas zaczerpywania ośrodka ziarnistego za pomocą czerpaka nazywa się oporem czerpania. W procesie urabiania występuje wciskanie krawędzi czerpaka w zwał materiału i obracanie w obszarze złoża [Pieczonka 1988]. Opór czerpania zależy od trajektorii krawędzi roboczej w obszarze złoża. W celu określenia oporu czerpania przyjęto najbardziej niekorzystny, rozdzielny sposób napełniania, wyodrębniając: zagłębianie – faza I, przestój – faza II, obrót czerpaka w przymie – faza III oraz po wyjściu z przymy – faza IV.

Jako składowe oporu zagłębiania  $W_z$  wyodrębnia się: opór wcinania krawędzi poziomej i pionowej  $W_{z1}$ ,  $W_{z2}$ , opór tarcia materiału o dno czerpaka  $W_{z3}$ , opór tarcia materiału o boczną ścianę czerpaka  $W_{z4}$ , opór tarcia dna łyżki o podłoże  $W_{z5}$  oraz napór na tylną ściankę  $W_{z6}$  (rys. 1). Wartość niektórych składowych stanowi niewielki procent w stosunku do całkowitego oporu zagłębiania (tab. 1).

Stąd do obliczeń przyjęto uproszczoną zależność na wypadkową oporów zagłębiania w której uwzględniono składowe  $W_{z1}$ ,  $W_{z3}$ ,  $W_{z6}$ . Pomimo istotnego udziału procentowego pominięto składową  $W_{z5}$  w związku z konfiguracją ogniów łańcucha kinematycznego, przy której nie występuje tarcie dna łyżki o podłoże.

Wypadkowa oporu zagłębiania ma zatem postać:

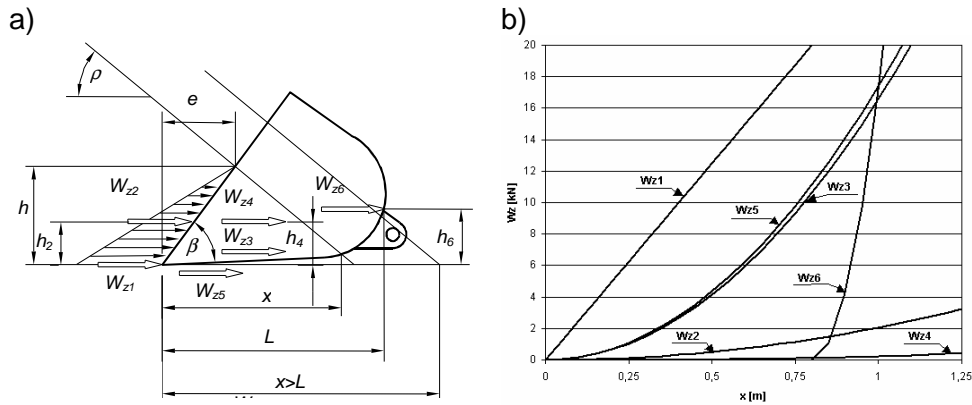
- w przypadku gdy  $x \leq L$

$$W_z = W_{z1} + W_{z3} = bx[AK_x + \frac{1}{2} x \gamma \text{tg} \phi \text{tg} \rho (1 + \sin^2 \rho)] \quad (5)$$

- w przypadku gdy  $x > L$

$$W_z = W_{z1} + W_{z3} + W_{z6} =$$

$$= b\{x[AK_x + \frac{1}{2} x \gamma \text{tg} \phi \text{tg} \rho (1 + \sin^2 \rho)] + 2(x - L)^2 \gamma \text{tg}^2 \rho \text{tg}^2 (45^\circ + \frac{\rho}{2})\} \quad (6)$$



Rys. 1. Faza zagłębienia czerpaka w pryzmę materiału ziarnistego a) rozkład sił oporu, b) przebieg składowych sił oporu zagłębienia w funkcji głębokości wcięcia dla tłucznia

Fig. 1. Phase of the bucket penetration into granular material heap: (a) distribution of the resistance forces, (b) the course of penetration resistance force components in function of the cutting depth for breakstone

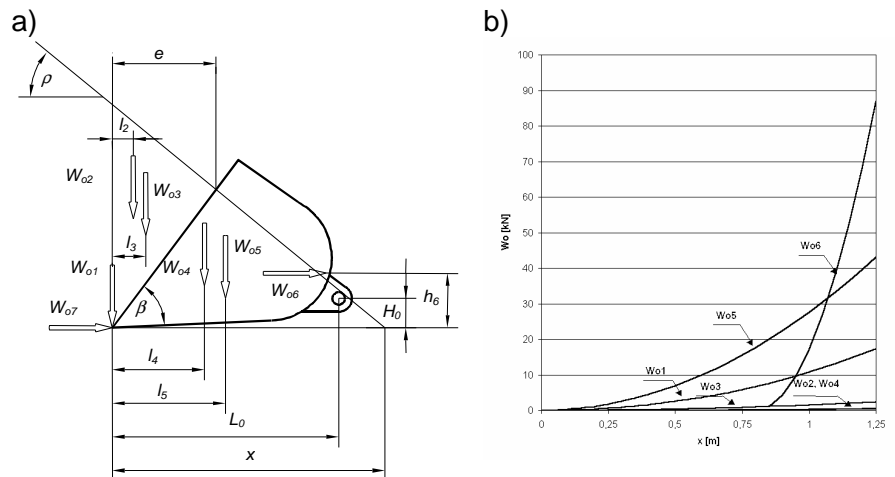
Tabela 1. Procentowe udziały składowych oporu zagłębienia dla tłucznia

Table 1. Percentage shares of penetration resistance components for breakstone

x m	Procentowy udział składowych oporu zagłębienia (%)					
	W <sub>z1</sub>	2·W <sub>z2</sub>	W <sub>z3</sub>	4·W <sub>z4</sub>	W <sub>z5</sub>	W <sub>z6</sub>
0,3	68,5	3,4	13,6	0,2	14,3	0
0,6	51,9	5,2	20,6	0,6	21,7	0
0,9	38,6	5,7	23,0	1,1	24,2	7,4

Jako składowe oporu obrotu  $W_0$  wyodrębni się: opór ścinania na płaszczyźnie czołowej pryzmy wrywanej czerpakiem ze zwałę materiału  $W_{01}$ , opór ścinania na płaszczyznach bocznych pryzmy  $W_{02}$ , opór wcinania krawędzi pionowych czerpaka  $W_{03}$ , opór tarcia materiału o zewnętrzne boczne ścianki czerpaka  $W_{04}$ , nacisk materiału na dno czerpaka –  $W_{05}$  oraz napór na tylną ściankę  $W_{06}$  (rys. 2). Analogicznie jak dla fazy zagłębienia, wartość niektórych składowych stanowi niewielki procent w stosunku do całkowitego oporu obrotu (tab. 2). Do dalszych obliczeń przyjęto zatem uproszczoną zależność na wypadkową oporów obrotu w której uwzględniono opór ścinania na płaszczyźnie czołowej pryzmy oraz nacisk materiału na dno czerpaka [Boryga 2000]. Zależność ta ma postać:

$$W_0 = W_{01} + W_{05} = \frac{1}{2} x^2 \gamma \operatorname{tg} \rho \left\{ b + \sin^2 \rho [2b + x \operatorname{tg} \rho \cdot \operatorname{tg}(45^\circ - \frac{\rho}{2})] \right\} \quad (7)$$



Rys. 2. Faza obrotu czerpaka w pryzmie materiału ziarnistego: a) rozkład sił oporu, b) przebieg składowych sił oporu obrotu w funkcji głębokości wcięcia dla tłucznia  
 Fig. 2. Phase of bucket turn in the heap of granular material: (a) distribution of resistance forces, (b) the courses of turn resistance force components in function of the cutting depth for breakstone

Tabela 2. Procentowe udziały składowych w całkowitym oporze obrotu dla tłucznia  
 Table 2. Percentage shares of the components in total turn resistance for breakstone

x m	Procentowy udział składowych oporu obrotu (%)					
	$W_{o1}$	$2 \cdot W_{o2}$	$2 \cdot W_{o3}$	$2 \cdot W_{o4}$	$W_{o5}$	$W_{o6}$
0,3	23,7	0,4	7,7	0,3	67,9	0
0,6	24,4	0,8	7,5	0,6	66,6	0
0,9	22,3	1,0	6,6	0,8	58,1	11,2

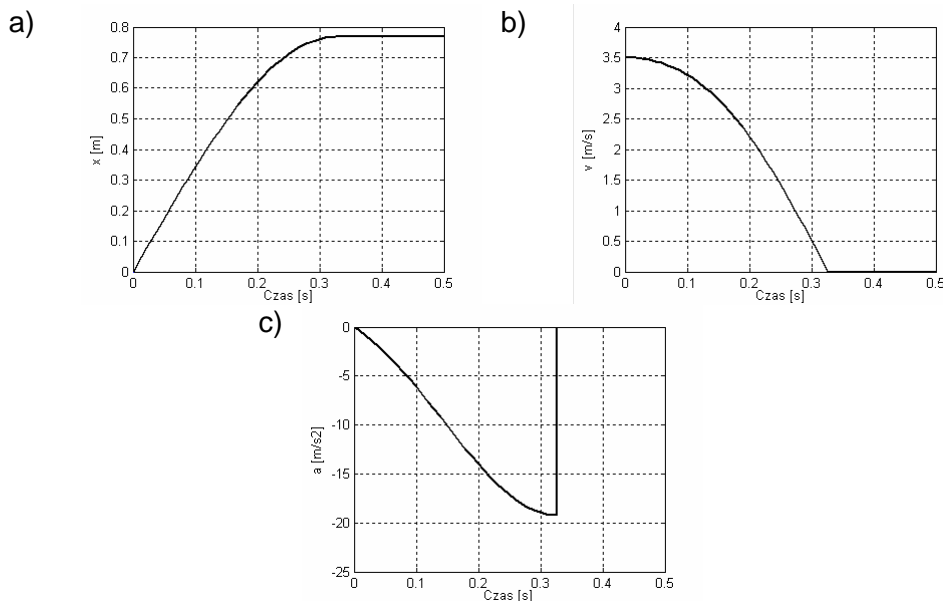
Zależność (7) obowiązuje do momentu wyjścia czerpaka z pryzmy, po którym wartość oporu ścinania na płaszczyźnie czołowej pryzmy wrywanej czerpakiem  $W_{o1}$  wynosi zero.

### Wyniki badań i ich analiza

Program symulacyjny zbudowano w środowisku Matlab (Simulink) i podzielono na dwa moduły. W module pierwszym (zagłębianie czerpaka – I faza) wyznaczono obciążenia zewnętrzne  $M_{43z}$ ,  $R_{43x}$ ,  $R_{43y}$  w układzie współrzędnych związanym z czerpakiem, przemieszczenie  $x$ , prędkość  $v$ , przyspieszenie  $a$  ładowarki oraz moment obciążający czerpak  $M_{23z}$  i składowe reakcje  $R_{23x}$  i  $R_{23y}$  w parze kinematycznej obrotu czerpaka. Natomiast w module drugim (obrót czerpaka – III faza) wyznaczono, podobnie jak w module pierwszym, przemieszczenie kątowe  $\theta_3$ , prędkość kątową  $\dot{\theta}_3$  i przyspieszenie kątowe  $\ddot{\theta}_3$  czerpaka oraz ponownie reakcje i moment obciążające czerpak [Graboś 2003].

W przeprowadzonej symulacji ruchu przyjęto następujące dane i założenia:

- ładowarka czołowa T-426 współpracowała z ciągnikiem Ursus 1212,
- prędkość początkowa ciągnika  $v_0 = 3,5$  m/s,
- wartość kąta podnoszenia wysięgnika jest stała i wynosi  $\theta_2 = 245^\circ$  natomiast początkowa wartość kąta wywrotu czerpaka  $\theta_{3p} = -3^\circ$ , zaś końcowa  $\theta_{3k} = 66,9^\circ$ ,
- materiał pryzmy – tłuczeń, dla którego:  $K_x = 10$  kN/m<sup>2</sup>,  $\rho = 45^\circ$ ,  $\gamma = 14,715$  kN/m<sup>3</sup>,  $\varphi = 31^\circ$ ,



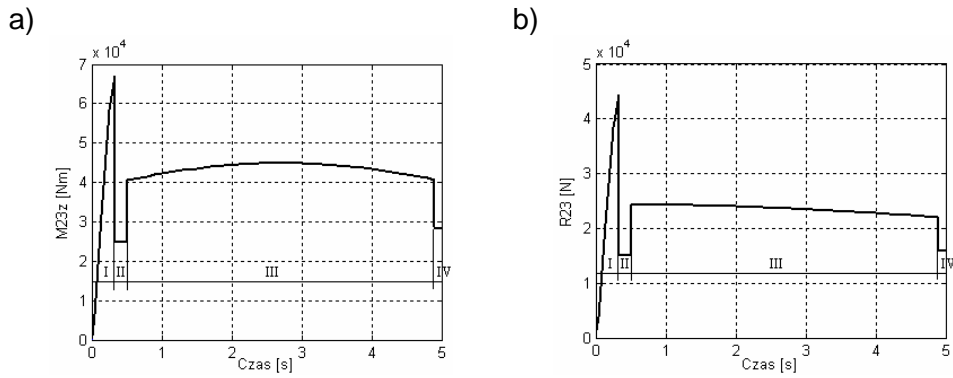
Rys. 3. Przebieg kinematycznych charakterystyk ruchu dla fazy zagłębienia

a) przemieszczenie –  $x$ , b) prędkość –  $v$ , c) przyspieszenie –  $a$

Fig. 3. Course of kinematic motion characteristics in penetration phase: (a) displacement –  $x$ ; (b) velocity –  $v$ ; (c) acceleration –  $a$

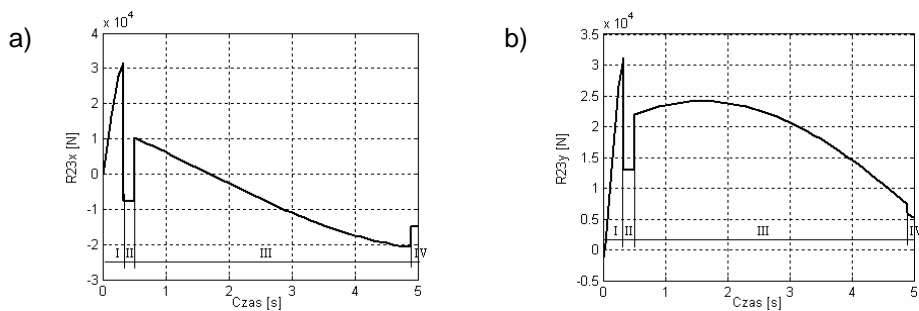
Przebieg kinematycznych charakterystyk ruchu ładowarki w pierwszej fazie napełniania czerpaka uzyskane w wyniku całkowania różniczkowego równania ruchu (1) przedstawia rysunek 3.

Dla fazy III (obrotu) założono trapezowy przebieg prędkości kątowej obrotu czerpaka przy czym  $\dot{\theta}_{3\max}$  wynosiła 0.2 rad/s, zaś przyspieszenie kątowe  $\ddot{\theta}_{3\max} = 0.4$  rad/s<sup>2</sup>. Wyniki symulacji uzyskane z rozwiązania równań (2), (3), (4) przedstawiono w postaci przebiegów zmian w czasie momentu obciążającego czerpak  $M_{23z}$  i składowych oraz wypadkowej reakcji  $R_{23}$  w parze kinematycznej obrotu czerpaka (rys. 4 i 5).



Rys. 4. Przebieg zmian w czasie a) momentu  $M_{23z}$  oraz b) reakcji  $R_{23}$  dla poszczególnych faz ruchu

Fig. 4. Course of time-dependent changes in (a) the moment  $M_{23z}$  and (b) reaction  $R_{23}$ , for particular motion phases



Rys. 5. Przebieg zmian w czasie składowych reakcji  $R_{23}$ : a)  $R_{23x}$ , b)  $R_{23y}$ , dla poszczególnych faz ruchu

Fig. 5. Course of time-dependent changes in the components of  $R_{23}$  reaction (a)  $R_{23x}$ , (b)  $R_{23y}$ , for particular motion phases

## Wnioski

W fazie zagłębienia ruch ładowarki jest niejednostajnie opóźniony. Dla prędkości początkowej  $v_0 = 3,5$  m/s maksymalne opóźnienie ruchu wynosi około  $19$  m/s<sup>2</sup>, zaś zatrzymanie ładowarki następuje po wcięciu na odległość  $x=0,768$  m. W związku z dużym opóźnieniem ruchu obciążenie czerpaka jest związane nie tylko z dużymi oporami ruchu zagłębienia, ale także z istotną składową obciążenia wynikającego z działania sił bezwładności. Wskazane jest zatem, by ruch zagłębienia odbywał się przy mniejszych prędkościach najazdu.

W fazie obrotu, charakterystyki kinematyczne wynikają z założonego trapezowego prawa prędkości. Maksymalne przyspieszenie kątowne obrotu czerpaka wynosi  $0,4$  rad/s<sup>2</sup>, maksymalna prędkość kątowa  $0,2$  rad/s

natomiast zakres położenia kąтового od  $-3^\circ$  do  $66,9^\circ$ , przy czym wyjście czerpaka z przymy następuje dla  $50,2^\circ$ . Największą wartość momentu obciążającego parę kinematyczną obrotu czerpaka  $M_{23z}$  stwierdzono dla położenia kąтового czerpaka  $25,1^\circ$  dla którego ramię siły oporu obrotu jest największe. Stwierdzono znacznie mniejsze obciążenia czerpaka w fazie obrotu w porównaniu z fazą zagłębienia. Związane jest to ze znacznie mniejszymi momentami i siłami bezwładności które zależą od wartości przyspieszeń.

## **Bibliografia**

*Boryga M. 2000. Analiza sił oporu ładowarek czołowych. VIII Międzynarodowe Sympozjum im. Prof. Czesława Kanafojskiego, Płock, tom I, s. 99-107*

*Boryga M., Graboś A. 2003. Analiza dynamiki ładowarki czołowej w warunkach zmiennych obciążeń zewnętrznych. Inżynieria Systemów Bioagrotechnicznych - Zeszyty Naukowe. Zeszyt 2-3 (11-12): 15-22*

*Brach I., Tyro G. 1986. Maszyny ciągnikowe do robót ziemnych. WNT, Warszawa*

*Graboś A. 2003. Analiza osobliwych konfiguracji maszyn manipulacyjnych. Rozprawa doktorska. Płock*

*Pieczonka K. 1988. Maszyny urabiające. Podstawy urabiania i przemieszczania. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej*

## **ANALYSIS OF FRONT LOADER DYNAMICS DURING SEPARATED FILLING OF THE BUCKET WITH GRANULAR MATERIAL**

### **Summary**

Paper presented the modeling procedure and computer simulation results of the T-426 front loader motion during separated filling of the bucket with granular material. The process of filling was divided into penetration and turn phases. The cutting resistance of horizontal edge, resistance of the material – bucket friction and the thrust on back wall of bucket, were assumed as the components of penetration resistance. On the other hand, the cutting resistance in front heap plane as well as the material pressure on bucket bottom were the components of turn resistance. The results were presented in form of the time-dependent courses of changes in some kinematic and dynamical motion characteristics.

**Key words:** granular material, motion resistances, dynamics, simulation, front loader

*Recenzent – Adam Krysztofiak*