

METODA SYMULACYJNEGO BADANIA RUCHU WARSTWY ZIARNA NA POWIERZCHNI SITA

Stefan Feder, Włodzimierz Kęska, Zdzisław Kośmicki

Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Politechnika Poznańska

Wprowadzenie

Optimalizacja konstrukcji maszyn do zbioru zbóż wymaga poznania wpływu czynników konstrukcyjnych na efekty procesu technologicznego i obciążenia technologiczne elementów maszyny. W przypadku sit i transporterów wibracyjnych, spotykanych w wielu maszynach rolniczych do zbioru ziemiopłodów i ich obróbki po zbiorze, ważne jest wyznaczenie wpływu takich czynników, jak: kąt nachylenia sita, amplituda i kierunek jego ruchu, właściwości sprężyste transportowanego materiału – na średnią prędkość transportu, intensywność separacji oraz siły wywierane przez materiał na powierzchnię roboczą sita.

Ruch materiału na sicie drgającym był już wielokrotnie opisywany w literaturze [m.in. GROCHOWICZ 1971; KĘSKA 1999], a prawa mechaniki rządzące tym ruchem są dokładnie poznane. Problemem wciąż pozostaje jednak rozwiązywanie równań tegoż ruchu i techniczna interpretacja uzyskiwanych wyników. Z istoty problemu wynika, że równania te są silnie nieliniowe, jako że wchodzą tu w grę takie zjawiska jak tarcie, odkształcenie plastyczne i zagadnienia kontaktowe. Rozwiązania analityczne, jakie mogłyby być tu formułowane, wymagają linearyzacji równań, a przez to będą ze swej natury zatracać istotę problemu. Rozwiązania numeryczne, czyli w praktyce symulacja komputerowa, mogą być realizowane na wiele różnych sposobów, przy pomocy uniwersalnych lub specjalizowanych procedur komputerowych. Procedury te mogą się różnić sposobem matematycznego opisu danego zagadnienia, zakresem niezbędnych uproszczeń i idealizacji, metodami całkowania równań ruchu i zadawania parametrów wejściowych, metodami analizy i interpretacji oraz prezentacji wyników obliczeń. Obecnie można spotkać na rynku kilka programów komputerowych do rozwiązywania zagadnień mechaniki układu brył sztywnych i odkształcalnych, takich jak np.: Adams, WM czy NASTRAN 4D. Przy pomocy tych systemów można badać również zachowanie się cząstek materialnych na powierzchniach drgających. Są to jednak programy bardzo kosztowne, których zakup i opanowanie dla rozwiązania jednego szczegółowego zagadnienia nie jest ekonomicznie uzasadnione. W niniejszej pracy zdecydowano się na opracowanie własnego programu komputerowego do symulacji ruchu ziarna na powierzchni sita. Jakkolwiek pracochłonność opracowania własnego programu jest większa niż nakład pracy potrzebny na opanowanie obsługi programu gotowego i utworzenie w nim własnego modelu obliczeniowego, to jednak własny

program daje pełną kontrolę nad tokiem obliczeń, a także pozwala zautomatyzować przygotowanie danych do symulacji i opracowanie ich wyników, w stopniu trudno osiągalnym przy wykorzystywaniu gotowych programów. Program ten stanowi pewne rozwinięcie i kontynuację wcześniejszych prac prowadzonych w Zakładzie Maszyn Roboczych Politechniki Poznańskiej, których celem było rozwijanie zastosowania metod symulacji komputerowej do badania procesów zachodzących w przestrzeniach technologicznych maszyn do zbioru zbóż, a dalej matematycznej optymalizacji konstrukcji tychże maszyn [KĘSKA 1992, 1999].

Założenia teoretyczne

Ruch materiału ziarnistego na drgającej powierzchni sita owiewanego strumieniem powietrza jest zagadnieniem o dużej złożoności. Pojedyncze cząstki tego materiału wykonują w pewnych chwilkach swobodny lot w powietrzu, następnie podlegają zderzeniom, przede wszystkim z ruchomą powierzchnią sita, a następnie między sobą. Poszczególne fazy ruchu są opisywane różnymi równaniami. W najbardziej skomplikowanej fazie zderzenia występują zjawiska tarcia pomiędzy powierzchniami, odkształcenie sprężyste i plastyczne powierzchni sita oraz cząstek materiału, a nawet może dochodzić do podziału tychże cząstek.

Punktem wyjścia do badania tego ruchu może być ruch pojedynczej cząstki (ziarna) lub warstwy złożonej z ziaren, ale traktowanej jako ośrodek ciągły.

W fazie swobodnego lotu na warstwę materiału działają dwie siły:

$$\begin{aligned} \text{siła grawitacji } P &= m \cdot g^{-1} \text{ (N)}, \\ \text{siła oporu aerodynamicznego } S &= k \cdot \rho \cdot (v/v_0)^n \text{ (N)}, \end{aligned}$$

gdzie:

- m – masa warstwy (kg),
- g – przyspieszenie grawitacyjne ($m \cdot s^{-2}$),
- k – współczynnik oporu aerodynamicznego ($m^4 \cdot s^{-2}$),
- ρ – gęstość powietrza ($kg \cdot m^{-3}$),
- v – prędkość powietrza ($m \cdot s^{-1}$),
- $v_0 = 1 \text{ (} m \cdot s^{-1} \text{)}$ – prędkość odniesienia (ze względu na poprawność wymiarową wzorów),
- n – wykładnik (-) dla przepływu turbulენტnego $n = 2$.

W fazie zderzenia z powierzchnią sita na warstwę działa siła normalna do powierzchni sita N i siła styczna T , ustalana według zależności o następującej strukturze:

$$\begin{aligned} N &= A \cdot y^s + B, & \text{gdy } dy/dt < 0 \text{ i } y < 0; \\ N &= A \cdot y^p, & \text{gdy } dy/dt > 0 \text{ i } y < 0; \\ N &= 0, & \text{gdy } y > 0; \\ T &= N \cdot \mu, \end{aligned}$$

gdzie: y – odległość teoretycznego spodu warstwy materiału od powierzchni teoretycznej sita (m). Wartości mniejsze od zera określają sumaryczne odkształcenie sita i materiału. Wartości większe od zera określają luz pomiędzy sitem a spodem warstwy.

A , B , s , p , μ – oznaczają współczynniki charakteryzujące właściwości fizyczne materiału dobierane na podstawie eksperymentów. Wyniar tych współczynni-

ków powinien być tak dobrany, by zapewniać zgodność wymiarową wzorów. Nie ma on fizycznego uzasadnienia, jako że podane formuły mają jedynie znaczenie prototypów zależności aproksymujących dane empiryczne, a nie ścisłych praw fizycznych.

Przedstawione wyżej zależności wchodzą do różniczkowego równania ruchu warstwy materiału wyprowadzonego z drugiej zasady dynamiki Newtona o postaci ogólnej:

$$m \cdot d^2x/dt^2 = \Sigma P.$$

W modelu pominięto w obecnej fazie pracy zmianę porowatości warstwy w różnych fazach ruchu i jej odkształcenie postaciowe.

Przyjęto, że sito wykonuje ruch płaski opisany równaniami:

$$x = r \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\alpha),$$

$$y = r \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin(\alpha),$$

gdzie:

- ω – prędkość kątowna (s^{-1}),
- α – kąt nachylenia toru sita (rad),
- t – czas (s),
- r – amplituda ruchu (m).

Równania ruchu warstwy materiału całkowano metodą Rungego-Kutty 4 rzędu. Krok całkowania różnicowano w różnych fazach ruchu. W trakcie zderzenia krok ten jest o rząd wartości skracany. W wyniku całkowania uzyskuje się trajektorię ruchu punktów warstwy materiału oraz przebieg sił działających pomiędzy warstwą a sitem. Symulacja pozwala ustalić średnie prędkości transportu materiału oraz liczbę kontaktów materiału z sitem w przypadku podrzucania. Można też ustalić wartości graniczne parametrów zapewniających prawidłowy transport materiału na sicie.

Program komputerowy

Potrzebny program do symulacji napisano w systemie Delphi (Pascal). Główną częścią programu jest moduł symulacji, całkujący równania ruchu warstwy. Oprócz tej części w programie występują następujące elementy:

- rozwijane menu do wybierania i uruchamiania poszczególnych funkcji programu,
- procedury do wizualizacji ruchu sita i warstwy materiału,
- procedury do wprowadzania danych początkowych,
- procedury do generowania i uruchamiania programów badań symulacyjnych,
- procedury do graficznej prezentacji wyników badań symulacyjnych.

Badania symulacyjne umożliwiają wyznaczenie wpływu poszczególnych parametrów geometryczno-kinematycznych przesiewacza, takich jak: amplituda, prędkość kątowna (częstotliwość), kierunek ruchu sita, kąt jego pochylenia itp. na wartości dynamicznego obciążenia sita, prędkość transportu, wysokość podrzutów itp. Można też realizować proste programy badań, pozwalające na wyznaczenia wpływu jednej wielkości wejściowej na wielkości wyjściowe, albo program złożony, w pełnym układzie czynnikowym dla czterech najważniejszych wielkości

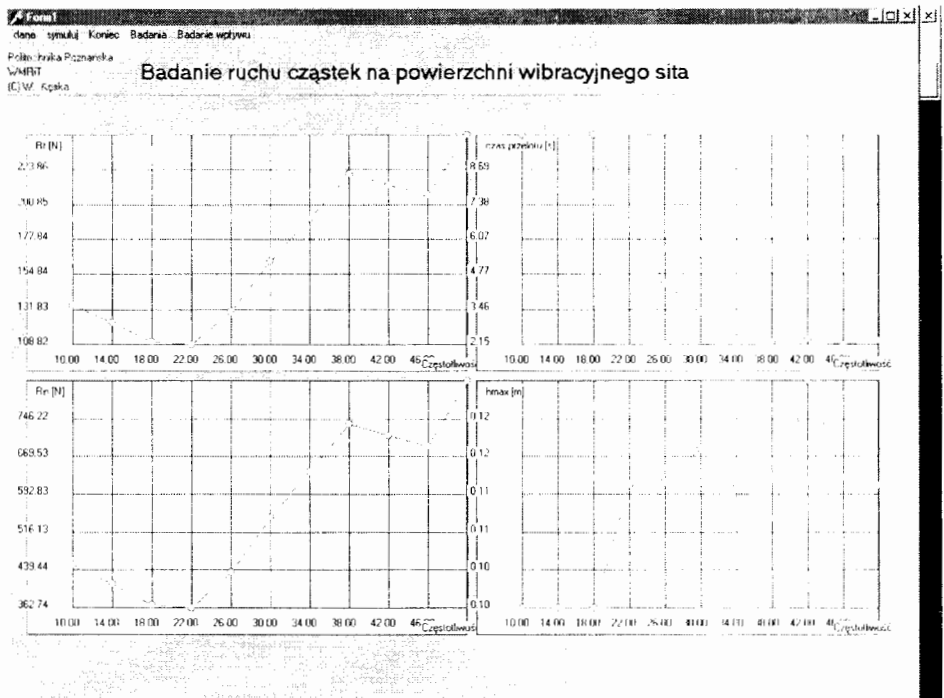
wejściowych. Wyniki symulacji są zapisywane do plików dyskowych w formie tekstowej i prezentowane na ekranie monitora w formie wykresów.

Przykładowe wyniki badań symulacyjnych

Wykorzystując utworzony program komputerowy przeprowadzono badania symulacyjne, w których wyznaczono wpływ amplitudy, częstotliwości i kąta nachylenia sita przesiewcza na wartości szczytowego obciążenia pionowego sita średniej prędkości transportu i maksymalnej wysokości podrzutu. W badaniach tych wielkość wejściowa jest zmieniana w pewnych granicach, przyjmując w tym przedziale 10 poziomów swej wartości. Po obliczeniu trajektorii ruchu cząstki i przebiegu sił na nią działających, obliczane są parametry wyjściowe. Wyniki tych obliczeń są zapisywane w pliku tekstowym, który jest podstawą do utworzenia wykresów zależności wybranych wielkości wyjściowych od wielkości wejściowej.

Ze względu na brak miejsca nie jest możliwe zaprezentowanie i omówienie w ramach tego artykułu wszystkich wyników badań symulacyjnych, jakie uzyskano przy pomocy tego programu. Zilustrowano jedynie niektóre wybrane wyniki badań.

Na rysunku 1 zilustrowano wpływ częstotliwości drgań sita na wybrane wielkości wyjściowe.

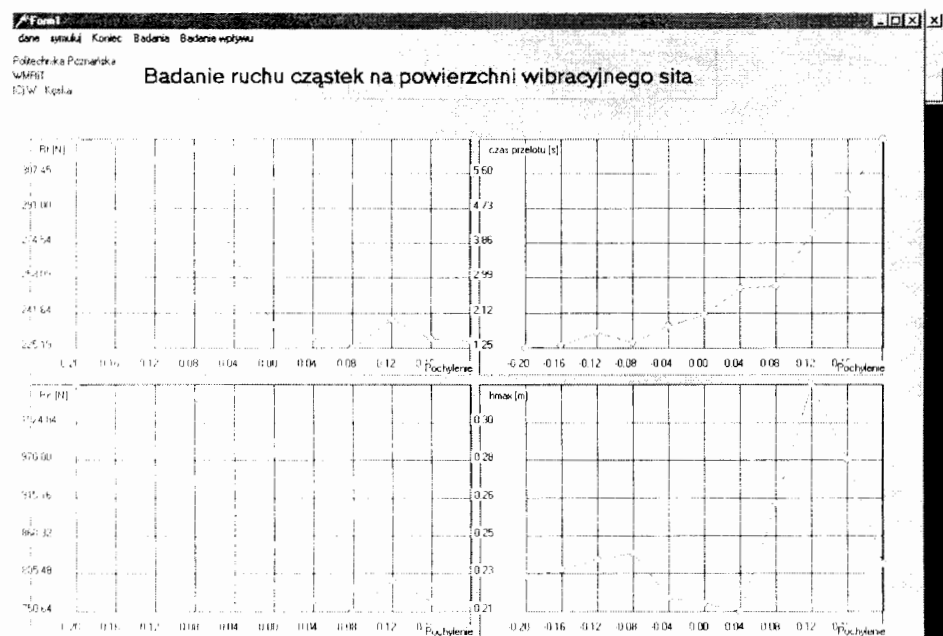


Rys. 1. Wpływ częstotliwości ruchu sita na siły normalną i styczną oraz czas przelotu i wysokość podrzutu

Fig. 1. Impact of the sieve swinging frequency on the normal and tangent contact force, travelling time and extreme jump height of the grains

Wpływ ten jest jak widać analogiczny jak wpływ amplitudy. Uzasadnia to charakteryzowanie stanu dynamicznego sita wibracyjnego poprzez iloczyn amplitudy i częstotliwości (lub kwadratu częstotliwości, określający średnie przyspieszenie sita). Przy małych częstotliwościach ruch materiału na sicie ustaje, co przejawia się zmierzaniem czasu przelotu do nieskończoności.

Na rys. 2 ukazano wpływ kąta nachylenia sita na wybrane wielkości wyjściowe.



Rys. 2. Wpływ kąta pochylenia sita przesiewacza na reakcje dynamiczne, czas przelotu i maksymalną wysokość podrzutu

Fig. 2. Impact of the sieve inclination angle, on the dynamic reactions, travelling time and extreme jump height of the grains

Wzrost kąta nachylenia sita wywołuje spadek reakcji dynamicznych, wzrost czasu przelotu, spadek średniej prędkości transportu oraz nieregularny wzrost wysokości podrzutu. Wysokość podrzutu, mająca bezpośredni związek z siłami wywieranymi przez materiał na sito oraz intensywnością mieszania warstwy materiału związaną z intensywnością separacji przy podsiewaczach, wykazuje szczególnie silne efekty nieliniowe i niestabilne zachowanie.

W tej sytuacji wyciągnięcie praktycznych wniosków z badań symulacyjnych wymaga ich prowadzenia metodami statystycznymi.

Podsumowanie i wnioski

1. Symulacja komputerowa ruchu cząstek materiału na sicie wykonywana przy pomocy przedstawionego programu komputerowego może być cennym na-

rzędziem do optymalizacji konstrukcji przesiewaczy, pozwalając na obliczenie sił działających na sito od strony przesiewanego materiału, jak również intensywności separacji zależnej od prędkości transportu i wysokości podrzutów.

2. Silna nieliniowość procesu, nadająca mu charakter deterministycznego chaosu, wymaga wielokrotnego powtarzania badań symulacyjnych przy losowych fluktuacjach parametrów wejściowych, podobnie jak to ma miejsce w badaniach doświadczalnych.
3. Niniejsze badania przeprowadzono przy upraszczających założeniach dotyczących oddziaływania pomiędzy cząstkami materiału w jego warstwie. Oddziaływania te w zasadzie pominięto, przyjmując że warstwa ta jest nieodkształcalna. W dalszym rozwoju programu należy uwzględnić spulchnienie warstwy materiału w czasie podrzutu.

Literatura

GROCHOWICZ J. 1971. *Maszyny do czyszczenia i sortowania ziarna*. PWRiL, Warszawa: 72–83.

KĘSKA W. 1992. *Proces omłotu zbóż*. Politechnika Poznańska, Seria Rozprawy 262, Poznań: 62–91.

KĘSKA W., FEDER S. 1999. *Komputerowa symulacja ruchu ziarna w przestrzeniach technologicznych maszyn rolniczych – możliwości i ograniczenia*. Prace PIMR 1, Poznań: 15–17.

Słowa kluczowe: symulacja komputerowa, czyszczenie ziarna, sito, transporter wibracyjny

Streszczenie

W pracy przedstawiono opis matematyczny i program komputerowy do badania ruchu warstwy ziarna na powierzchni sita lub transportera wibracyjnego. W modelu uwzględniono swobodny lot ziarna i ukośne zderzenie z powierzchnią sita, a także siły aerodynamiczne wywołane przepływem powietrza. Program komputerowy do symulacji pracy sita pozwala na obliczanie przebiegu sił oddziaływania materiału na sito oraz trajektorii jego ruchu. Na tej podstawie możliwe jest określenie intensywności separacji ziarna, a przez to i wskaźników jakości i wydajności procesu czyszczenia i sortowania ziarna. W pracy zaprezentowano przykładowe wyniki badania wpływu parametrów geometryczno-kinematycznych sita na przebieg sił działających na sito i prędkość transportu ziarna.

A METHOD FOR SIMULATIVE INVESTIGATION OF THE GRAIN MOTION ON THE SIEVE SURFACE

Włodzimierz Kęska, Stefan Feder, Zdzisław Kośmicki

Institute of Working Machines and Vehicles, Poznań University of Technology

Key words: computer simulation, grain cleaning, vibrational transportation

Summary

A mathematical description and computer program for investigating the grain material motion on the surface of cleaning sieve or vibration conveyor is presented in this paper. The free motion of grain and cross impact with the sieve surface as well the aerodynamic forces were taken into account in this model. The computer procedure for simulating the sieve work is capable to compute the forces acting between the sieve surface and grain material as well as the trajectory of material motion. This can be used as a base for computing the factors of separation intensity and separation quality. Some examples of the results obtained from the simulation are presented in the paper.

Dr hab. inż. **Włodzimierz Kęska**

Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych

Politechnika Poznańska

ul. Leszczyńska 113

61-417 POZNAŃ

e-mail: keska@sol.put.poznan.pl