

Andrzej TOMPOROWSKI¹, Marek OPIELAK², Izabela PIASECKA³, Marek JANKOWSKI⁴

e-mail: a.tomprowski@utp.edu.pl

¹ Zakład Systemów Technicznych i Ochrony Środowiska, Instytut Technik Wytwarzania, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz² Zakład Inżynierii Procesowej, Bezpieczeństwa i Ekologii, Instytut Transportu, Silników Spalinowych i Ekologii, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska, Lublin³ Wydział Rolnictwa i Biotechnologii, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz⁴ WERTHER International Polska, Sp. z o.o.

Analiza nierównomierności rozdrabniania biomasy. Część II: Badania maszynowe

Wprowadzenie

Formalizacja przebiegów nierównomierności rozdrabniania, przeprowadzona na przykładzie biomateriałów, dla wybranych parametrów funkcji losowej wykazuje słusność przyjętych założeń. Jak stwierdzono w części I pracy [Tomprowski i in., 2013] takie postępowanie powinno obejmować szczegółową weryfikację ergodyczności i stacjonarności charakterystyk momentu obrotowego, prędkości kątowej wydajności i mocy na wale rozdrabniacza.

Analiza przebiegów stochastycznych

Otrzymane wartości momentu obrotowego, czy też prędkości obrotowej wału rozdrabniacza jako wartości losowe można uśrednić względem czasu lub kąta obrotu wału roboczego. Warunkiem jest zbieżność do zera funkcji korelacji zarejestrowanej krzywej względem czasu. Analizę i badanie krzywej losowej nierównomierności można prowadzić rejestrując proces rozdrabniania w różnych przedziałach czasu lub jego przebieg w bardzo długim zakresie czasu [Kowalik 2011, Sykut 2007].

W analizie przebiegów stochastycznych niezbędne jest sprawdzenie, czy w badanym procesie nierównomierności pracy maszyny rozdrab-

niającej nie występują statystyczne prawidłowości, które wskazywałyby na proces przynajmniej częściowo zdeterminowany.

Procedura badawcza

Prowadzono wielokrotną rejestrację nierównomierności procesu. Otrzymane wyniki porównano ze sobą w kilku jednakowych odstępach i przedziałach czasowych lub w zależności od prowadzonego zapisu kąta obrotu wału roboczego.

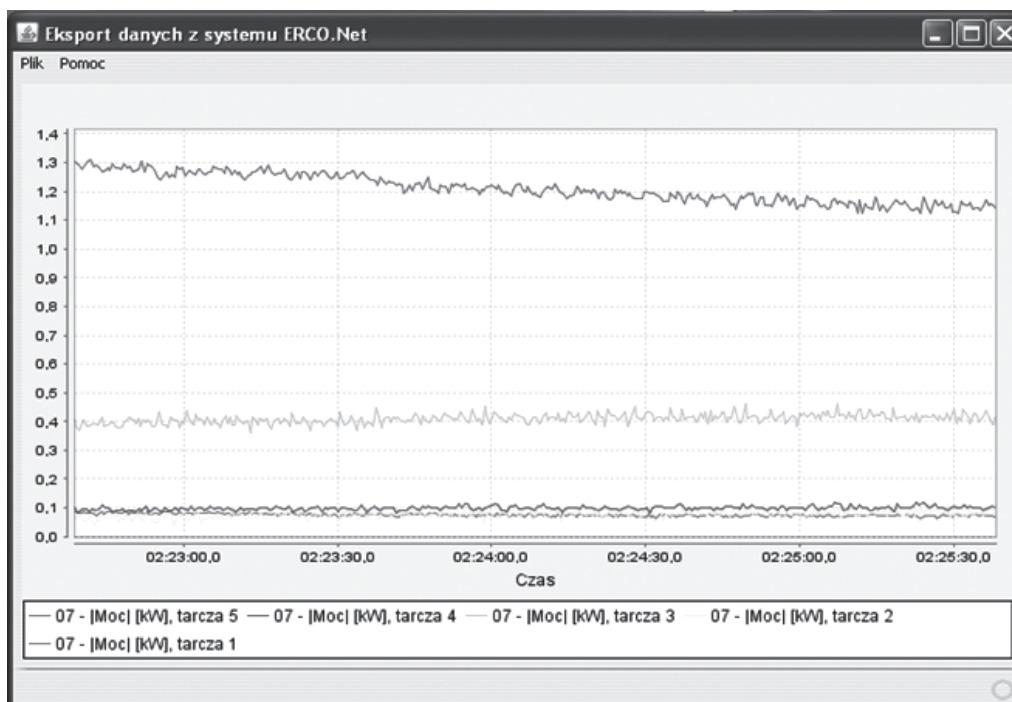
Porównano i poddano analizie odczytane w wybranych przedziałach rejestrowanego przebiegu wartości momentu obrotowego dla zapisu dynamicznego i prędkości kątowej dla zapisu kinematycznego, od $M_1(t_1)$ do $M_n(t_n)$. Aby wykluczyć zależność otrzymanej funkcji od przyjętych wartości czasu, powtórzono postępowanie sprawdzające dla przesuniętych czasów. W konsekwencji wykonano wykresy dystrybuanty zmiennej losowej $E(M, \omega)$, o postaci:

$$\begin{cases} E_t(M) = P(M(t) < x) \\ E_{t+\Delta t}(M) = P(M(t + \Delta t) < x) \end{cases} \quad (1)$$

gdzie M oznacza moment obrotowy na wale rozdrabniacza.

Podczas badań eksperymentalnych rejestrowano na stanowisku badawczym przebiegi nierównomierności mocy. Przykładowy wykres pokazano na rys. 1.

Proces jest stacjonarny, gdy otrzymane dystrybuanty są równe:



Rys. 1. Przebiegi nierównomierności zapotrzebowania mocy rozdrabniacza pięciotarczowego wielootworowego RWT-5KZ

$$E_i(M, \omega) = F_{t=At}(M, \omega) \quad (2)$$

Przebiegu nierównomierności rozdrabniania materiałów biologicznych nie da się do końca przewidzieć – jest zjawiskiem stochastycznym. Prawdopodobnie zaprojektowany proces technologii rozdrabniania wielokrawędziowego pozwala jednak przewidywać niektóre właściwości statystyczne rejestrowanego zapisu nierównomierności [Macko i in., 2011].

Weryfikacja eksperymentalna opisanej procedury aproksymacyjnej

Prezentowane rozważania teoretyczne poddano weryfikacji za pomocą badań maszynowych, na urządzeniach stanowiących wyposażenie laboratorium badawczego *Zakładu Systemów Technicznych i Ochrony Środowiska UTP* w Bydgoszczy.

Charakterystyka materiałów

Jako materiał wsadowy do badań stosowano ziarna zbóż: pszenżyta i kukurydzy. Materiał badawczy ustabilizowano pod względem zawartości wilgoci na poziomie 14,2% dla pszenżyta i 13,9% dla kukurydzy. Przygotowano próbki o masie 10 g każda z dokładnością do 0,1 g. Cechy materiału rozdrobnionego są pochodną własności rozdrabnianego medium oraz działań technologicznych wielokrawędziowego rozdrabniania: geometrii narzędzia i parametrów procesu [Flizikowski, 2011a,b; Tomporowski, 2011; 2012].

Opis układu badawczego

Badania przeprowadzono stosując następujące rozdrabniacze wielotarczowe, wielootworowe:

- pięciotarczowy nowej generacji RWT-5KZ (Rys. 2). Zespół napędowy składa się z pięciu trójfazowych, jednakowych silników elektrycznych. Każdy z nich sprzęgnięty jest za pośrednictwem przekładni pasowo zębatej z jedną z pakietu pięciu tarcz roboczych. Silniki napędowe sterowane są poprzez zespół indywidualnie przyporzadkowanych falowników.

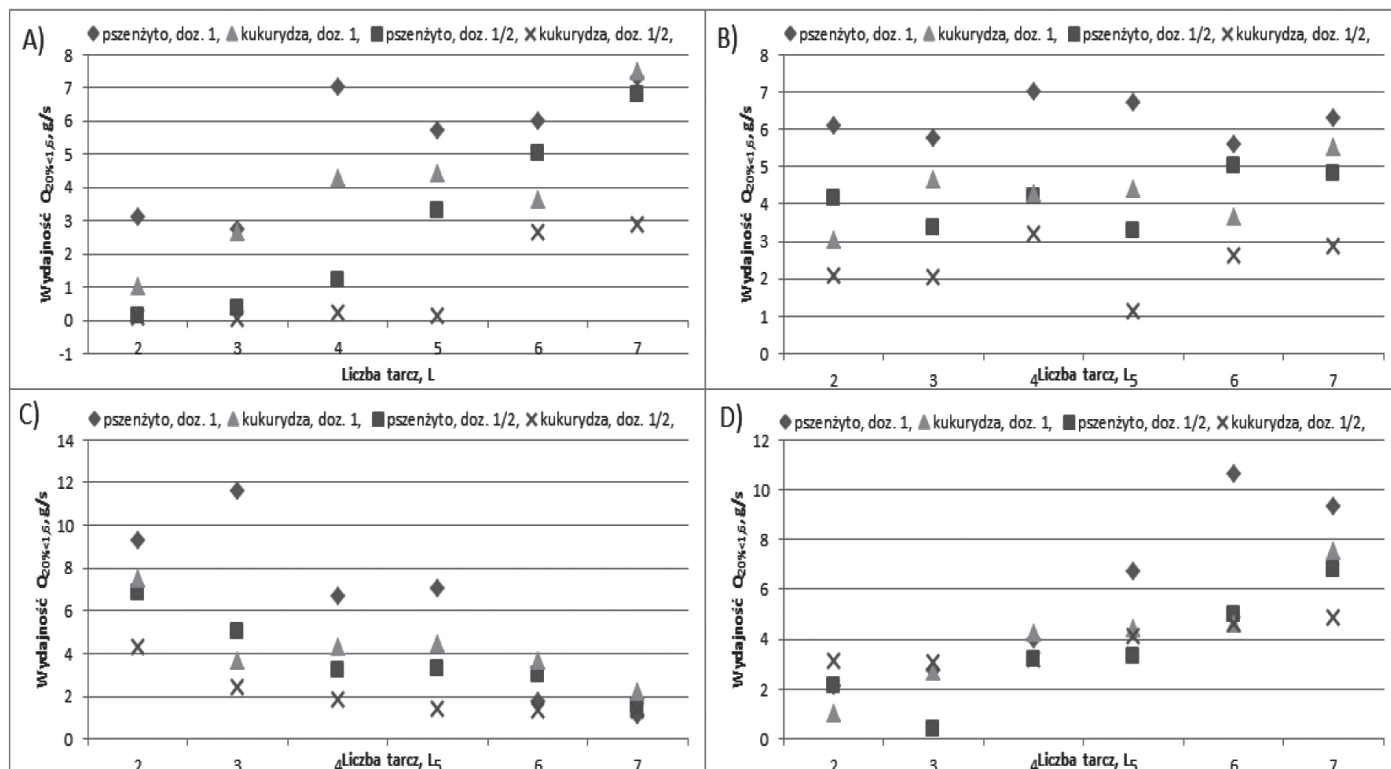


Rys. 2. Stanowisko badawcze wielotarczowego rozdrabniacza ziaren biomasy z rozdrabniaczem pięciotarczowym RWT-5KZ

- siedmiotarczowy RWT-7JA. Działa podobnie jak RWT-5KZ na zasadzie quasi-ścianienia (ścianienia technologicznego) materiału wsadowego. Przestrzeń roboczą tworzy siedem poziomych tarcz rozdrabniających osadzonych współosiowo i naprzemiennie: trzy na wale roboczym a cztery w korpusie. Wszystkie tarcze posiadają cylindryczne otwory rozdrabniające, a różnią się między sobą ich liczbą, średnicą i rozmieszczeniem.

Wyniki badań

Otrzymane wyniki badań nierównomierności wydajności celowej rozdrabniania ziaren zbóż analizowano pod kątem minimalizacji tego zjawiska. Zarejestrowane dane obejmowały: rodzaj, gatunek ziarna użytego do rozdrabniania, liczbę tarcz użytych w rozdrabnianiu, prze-



Rys. 3. Nierównomierność wydajności celowej dla zmiennej liczby tarcz (2,7) i dozowania pełnego i połowicznego ziaren pszenżyta i kukurydzy: A) dla rosnącej prędkości kątowej tarcz $\omega = 10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ i $\omega_1 = 20 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, B) dla naprzemiennie rosnąco-malejącej prędkości kątowej tarcz $\Delta\omega = \pm 10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ i $\omega_1 = 40 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, C) dla malejącej prędkości kątowej tarcz $\omega = -10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ i $\omega_1 = 80 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, D) dla wartości wypadkowej z badań wcześniej przedstawianych

krój dozowania, czas rozdrabniania, masę całkowitą rozdrobnionego ziarna, średnią wielkość ziarna przed rozdrobnieniem, napięcie i natężenie prądu pobieranego przez silnik elektryczny podczas różnych etapów rozdrabniania (zależnych od rodzaju ziarna, sposobu dozowania, liczby zastosowanych tarcz), wydajność ogólną rozdrabniania Q , wydajność celową $Q_{<0,8}$, wydajność celową $Q_{0,8+1,6}$, wydajność celową $Q_{>1,6}$, moc czynną P_j , pobieraną podczas pracy jałowej, moc czynną P_{j+r} , pobieraną podczas pracy roboczej rozdrabniania, moc czynną P_r , pobieraną podczas pracy przeznaczonej na „czyste” rozdrabnianie, pobór jednostkowego zużycia energii na ruch jałowy E_j , pobór jednostkowego zużycia energii na ruch roboczy rozdrabniania E_{j+r} . W obszernym zestawie danych wyróżniono wartości obliczone, które spełniały warunek wydajności celowej $Q_{20\%<1,6}$.

Na rys. 3 przedstawiono zależność wpływu gradientu prędkości – (rosnącej, rosnąco-malejącej, malejącej, wypadkowej) przemieszczania się współpracującej pary krawędzi tnących jako warunku koniecznego quasi-ścinania, dla zmiennej liczby tarcz (2,7) oraz dozowania pełnego i połowicznego ziaren pszenżyta i kukurydzy na wydajność masową.

Z otrzymanych danych wynika, że stopień nierównomierności biegu maszyny podczas rozdrabniania ziaren biomasy waha się w przedziałach od 0,05 do 0,08, natomiast nierównomierność obciążeń poszczególnych napędów rozdrabniacza RWT-5KZ (Rys. 1) przyjmuje wartość od 0,03 do 0,11. Dane te dotyczą oczywiście przebiegu procesu rozdrabniania bez zakłóceń typu np. zakleszczenie się rozdrabnianego medium w przestrzeni międzyczarowej, które niestety krótkotrwale mogą się pojawić.

Analiza wyników badań

Przebieg nierównomierności poboru mocy, momentu obrotowego i nierównomierności biegu maszyny stanowi podstawę do wyznaczenia wskaźników nierównomierności wydajności i niesprawności działania proponowanej koncepcji konstrukcyjnej, również – miarę użyteczności procesu rozdrabniania [Flizikowski i Bieliński, 2013; Tomporowski i Opielak, 2011]. Niejednorodność struktury, postaci i wymiarów ziarna wskazuje na potrzebę prowadzenia badań z ziarnem selekcyjnym, stabilizowanym [Komsta i Opielak 2010].

O dynamice obciążeń quasi-ścinania decyduje prędkość robocza. Rozpatrywano zatem wpływ względnej prędkości w poszczególnych parach roboczych (sąsiednich tarczach). W warunkach maszynowych badano też wpływ prędkości rozdrabniania na charakterystyki sprawnościowe rozdrabniacza: moc, wydajność i jednostkowe zużycie energii.

Prędkość jako cecha charakteryzująca konstrukcyjne wskaźniki energetyczne ma duże znaczenie dla równomiernego i sprawnego procesu rozdrabniania. W rozdrabniaczach wielootworowych wielotarczowych, podobnie jak w rozdrabniaczach nożycowych prędkość wpływa na wartość siły cięcia oraz moment siły na wale. Otrzymane wyniki wskazują, że rozdrabnianie możliwe jest dla pewnych prędkości, przy których zapotrzebowanie na moc i jednostkowe zużycie energii jest minimalne, a wydajność maksymalna.

Wnioski

Dotychczasowe badania maszyn przemysłu rolno-spożywczego skierowane na doświadczalne rozpoznanie wartości przebiegów i charakterystyk wykazują potrzebę analizy nierównomierności. Nierównomierność rozdrabniania analizowano na przykładzie biomateriałów, dla wybranych parametrów funkcji losowej i wyników badań rzeczywistego procesu, które wykazują słuszność przyjętych założeń. Postępowanie obejmowało szczegółową weryfikację założeń ergodyczności i stacjonarności charakterystyk momentu obrotowego, prędkości kątowej, rzeczywistej wydajności i mocy na wale rozdrabniacza. Prezentowane w pracy postępowanie, zmierzające do wyznaczenia modelu i jego doświadczalnej weryfikacji, daje szansę zapanowania nad trudnymi do przewidzenia, ze względu na kolejno następujące po sobie zmiany stanów, przemian i przemieszczeń w procesie wielotarczowego, wielootworowego, wielokrawędziowego rozdrabniania anizotropowych materiałów pochodzenia biologicznego.

LITERATURA

- Flizikowski J., 2011a. *Micro- and Nano- energy grinding*. PANSTANFORD Pub. Singapore, (ISBN-10 9814303534)
- Flizikowski J., 2011b. Levels of intelligent grinding system. *Inż. Ap. Chem.* **50**, nr 3, 24-26
- Flizikowski J., Bieliński K., 2013. *Technology and energy sources monitoring. Control, efficiency and optimization*. IGI Global, US (ISBN 978-1-4666-2664-5)
- Komsta H., Opielak M., 2010. *Rozdrabnianie [w:] Wojdalski J. (red.). Użytkowanie maszyn i aparatury w przetwórstwie rolno-spożywczym. Wybrane zagadnienia*. Wyd. SGGW, Warszawa, 41-59 (ISBN 978-83-7583-166-5)
- Kowalik K., 2011. *Wpływ technologii cięcia wybranych produktów spożywczych na energochłonność procesu*. Praca doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin
- Macko M., Boniecka M. Drop A., Grabińska D., Grzelczak B., 2011. Oszacowanie cyklu życia rozdrabniaczy przy wykorzystaniu aplikacji SolidWorks Sustainability. *Inż. Ap. Chem.* **50**, nr 3, 49-50
- Sykut B., 2007. *Badania wpływu wybranych parametrów na opory cięcia i energochłonność produktów spożywczych*. Praca doktorska. Politechnika Lubelska, Lublin
- Tomporowski A., 2011a. Rozwój konstrukcji rozdrabniaczy. Część I. Model obiektu badań. *Inż. Ap. Chem.* **50**, nr 3, 75-76
- Tomporowski A., 2011b. Rozwój konstrukcji rozdrabniaczy. Część II. Opis badań. *Inż. Ap. Chem.* **50**, nr 3, 77-78
- Tomporowski A., 2012. Stream of efficiency of rice grains multi-disc grinding. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*; **14**, nr 2, 150-153
- Tomporowski A., Opielak M., 2011. Structural features versus multi-hole grinding efficiency. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*; **14**, nr 3, 223-228

Praca badawcza finansowana z funduszy Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w latach 2010/2013 jako projekt rozwojowy.

The scientific and technological journal

INŻYNIERIA I APARATURA CHEMICZNA

Chemical Engineering and Equipment

published since 1961

The journal is regularly abstracted in CAS (Chemical Abstracts Service – a division of the American Chemical Society, Columbus, Ohio, USA) and indexed on SciFinder® platform:

<http://www.cas.org/products/scifindr/index.html>

in BazTech, i.e. Base of Polish Technical Periodicals:

<http://baztech.icm.edu.pl/wysz.html>

and a base of scholarly literature:

<http://scholar.google.com>

Journal homepage:

<http://chemical-engineering-equipment.eu>