

## Józef FLIZIKOWSKI

e-mail: fliz@utp.edu.pl

Institut Technik Wytwarzania, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz

# Metodyka inteligentnego rozwoju procesów rozdrabniania

## Wprowadzenie

Znane są systemy do wspomaganie rozwoju energomechanicznego produkcji oparte o osiągnięcia informatyczne, metodykę badań naukowych, planowanie i programowanie działań produkcyjnych, sensory stanu jakości produktu, efektywności, nieszkodliwości działania procesu i produktu, wizualizację oraz intuicyjne, przypadkowe wnioski o stanach, przemianach i prognozach charakterystyk użytkowych, jak również uwzględniające odpowiednie decyzje gospodarcze.

Systemy inteligentnego, technologicznego działania (również częściowej samoregulacji rozdrabniania, pulweryzacji, granulowania, mielenia, skrawania), wspomaganie rozwoju energomechanicznego produkcyjnych działań technicznych są omówione w licznych publikacjach krajowych i zagranicznych [Pahl, 1993; Flizikowski, 2002; 2005; Armstrong in., 2007; Jankowski i in., 2009; Hoffman i in., 2010; Macko, 2011a; 2011b; 2011c; Flizikowski i Bieliński, 2013; Sadkiewicz, 2014].

Znaczenie mają również priorytety współczesnego otoczenia gospodarczo-społecznego przedstawiane w raportach strategicznych rozwoju obszaru wspólnoty europejskiej 2020:

1. *Rozwój inteligentny*: rozwój gospodarki opartej na wiedzy i innowacji.
2. *Rozwój zrównoważony*: wspieranie gospodarki efektywniej korzystającej z zasobów bardziej przyjaznej środowisku i bardziej konkurencyjnej.
3. *Rozwój sprzyjający włączeniu społecznemu*: wspieranie gospodarki o wysokim poziomie zatrudnienia, zapewniającego spójność społeczną i terytorialną.

W świetle powyższych ustaleń za cele pracy przyjęto opracowanie modelu procesu technologicznego dla potrzeb samo-rozwoju wielootworowego (wielotarazowego) rozdrabniania; eksperymentalne wyznaczenie funkcji jakości wybranych wskaźników: jakości produktu, efektywności procesu, nieszkodliwości oddziaływania produktu i procesu wielotarazowego, wielootworowego, auto-monitorowanego rozdrabniania materiałów uziarnionych.

## Cele, stany postulowane rozdrabniania

Przyczyną poszukiwania nowych warunków technicznych (nWk) są postulowane społecznie, lepsze wartości, czyli lepsze charakterystyki użytkowe, stany postulowane SPR(Q,e,nS,t) rozdrabniania [Flizikowski, 2005; 2013; Tomporowski, 2011; Śmigielski i in., 2013].

W procesie oceny osobnika/rozdrabniania wykorzystywana jest analiza ekstremów funkcji (charakterystyk użytkowych) estymatorów procesu rozdrabniania.

Jakość potencjalnego rozwiązania określana jest na podstawie tzw. funkcji przystosowania – oznaczającej, np. również wartość standardowego odchylenia dla określonego estymatora: przekroju rozdrabniania lub efektywności energetycznej, która może mieć następującą postać [Tomporowski, 2012; Tomporowski i Opielak, 2012; Tomporowski i Flizikowski, 2013]:

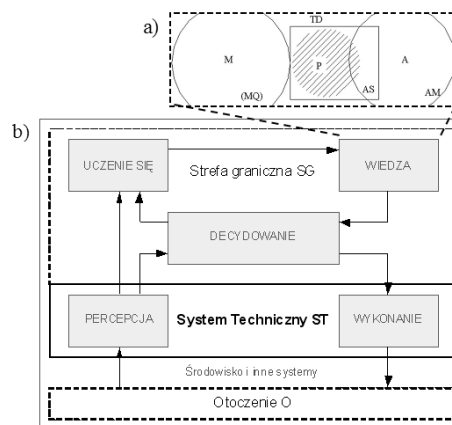
$$\Delta F_R = \sqrt{\frac{n \sum_i F_{R,i}^2 - \left( \sum_i F_{R,i} \right)^2}{n(n-1)}} \quad (1)$$

gdzie:

$\Delta F_R$  – odchylenie standardowe przekroju rozdrabniania,  
 $F_{R,i}$  – wartość przekroju rozdrabniania w i-tej iteracji algorytmu symulującego, mierzącego proces rozdrabniania,

$n$  – liczba obserwacji (liczba próbek czasowych).

Zastosowanie odchylenia standardowego pozwala odczytać przydatność osobnika/rozdrabniania w kategoriach stabilnej pracy, a jednocześnie małe odchylenia od średniej gwarantują małą zmienność zapotrzebowania na energię.



Rys. 1. Ogólna struktura, elementy i relacje inteligentnego rozwoju procesu rozdrabniania: a) - powstawanie wiedzy; b) - rozwojowe sterowanie kognitywne; M - model, MQ - jakościowy model matematyczny, A - analiza, AS - analiza statystyczna, AM - analiza erytoryczna, TD - teoria doświadczenia, P- plan badań

Do oceny efektywności, sprawności quasi – ścinania materiałów biologicznych na cele energetyczne stosuje się z reguły następujący wskaźnik (funkcję przystosowania):

$$e_{RP} = \frac{(\eta_{q-s} - \eta_o) \cdot E_{brutto} \cdot \eta_s \cdot \eta_p}{(k_j \cdot v_r + \tau_{q-s} \cdot F_{q-s} + \varepsilon \cdot F'_R \cdot v_r^2) \cdot M_k \cdot v_r \cdot t} \quad (2)$$

gdzie:

- $\eta_{q-s}$  – sprawność spalania produktu rozdrabniania podczas prób,
- $\eta_o$  – sprawność spalania całych, nie rozdrobnionych ziaren podczas prób,
- $E_{brutto}$  – energia zawarta w przetwarzanych ziarnach,  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,
- $\eta_s, \eta_p$  – sprawność układu napędowego rozdrabniacza (silnika i przekładni),
- $k_j$  – współczynnik oporów ruchu jałowego,  $[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
- $v_r$  – prędkość quasi-ścinania,  $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
- $\tau_{q-s}$  – naprężenia quasi-ścinania,  $[\text{N} \cdot \text{m}^{-2}]$
- $F_{q-s}$  – chwilowy przekrój quasi-ścinania (pierścień),  $[\text{m}^2]$
- $F'_R$  – przekrój oddziaływań wtórnych quasi-ścinania,  $\text{m}^2$ ,
- $\varepsilon$  – współczynnik proporcjonalności,  $[\text{N} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-4}]$
- $M_k$  – wskaźnik krotności próby masowej.

Zadanie minimalizacji odchylenia standardowego wartości przekroju rozdrabniania dla grupy pomiarów można w prosty sposób przekształcić w zadanie maksymalizacji – co jest zgodne z założonym sposobem wykorzystania/interpretowania funkcji przystosowania: im większa jej wartość tym lepsze rozwiązanie. Z tego powodu rozwiązania gorsze (charakteryzujące się większym odchyleniem standardowym czyli mniejszą wartością funkcji przystosowania) będą powolnie usuwane z populacji (naturalna selekcja) a osobniki, które pozostaną powinny charakteryzować się pożądanymi z punktu widzenia kryteriów cechami rozdrabniania.

Czas działania (dynamika) systemu  $t_0$  zależy od szybkości reakcji poszczególnych elementów, sposobu obserwacji i konceptualizacji (tworzenia przestrzeni istotnych cech), idealizacji – czyli określenia związków między głównymi z istotnych cech systemu, konkretyzacji – wyróżnienie cech ubocznych i wreszcie od weryfikacji logicznej i empirycznej wypracowania praw aktywności – czyli szybkości obiegu informacji między elementami. Czas działania, dynamika systemu zależą więc od: wiedzy na temat inżynierii rozdrabniania, energii, materiałów i tworzyw konstrukcyjnych, doboru wskaźników do zmiennych opisujących proces, czujników i przetworników obiektowych, procedur przetwarzająco-sterujących, a nawet języka matematycznego użytego do rozwoju systemu energetycznego.

Cele będą osiągnięte przez zastosowanie metodyki aktywnego (rozwojowego) samokreowania środowiska procesu-produktu inżynierii mechanicznej rozdrabniania.

Zadanie inteligentnego systemu rozdrabniania z samokompensowaniem nierównomierności wybranych charakterystyk, polega głównie na transformacji zbiorów informacji i zakłóceń do postaci zdeterminowanego charakteru sygnału sterującego zespołami i elementami roboczymi maszyny, materiałem lub procesem – w kierunku wartości zadanej charakterystyki.

Nie jest możliwe rozwinięcie koncepcji poznawczej samokompensowania w oderwaniu od klasycznej teorii sterowania/ obserwacji. Sterowalność układów dynamicznych liniowych, stacjonarnych, ciągłych (DLSC) występuje, gdy ze stanu początkowego  $x(t_0) = 0$ , można ten układ doprowadzić do dowolnego stanu końcowego  $x(t_k)$ , w skończonym czasie  $t_k - t_0$  (np. zmiana zasilania wsadem, położenia, prędkości, itp.) [Zawada i in., 2005; Tyszczyk, 2008; Śmigiełski i in., 2013]. Obserwowalność układów DLSC – własność układu sterowania mówiąca, czy na podstawie odczytu sygnału sterującego oraz odczytu sygnału wyjściowego możliwe jest określenie wewnętrznego stanu obiektu, a dokładniej – koniecznych zmian warunków  $\dot{w}$ .

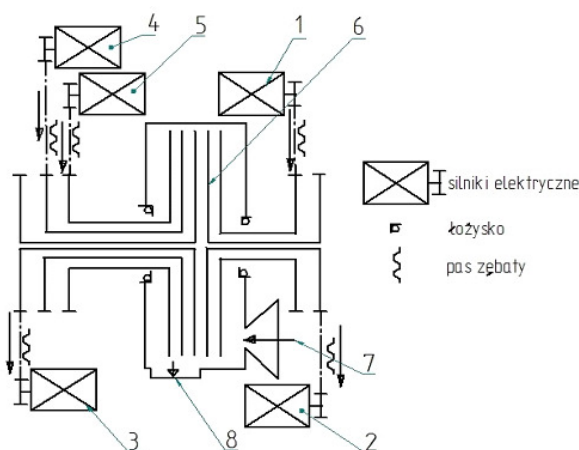
Użycie algorytmów sztucznej inteligencji w systemach badań naukowych, kompensowania rozdrabniania, gdzie decyzje bardzo silnie zależą od dynamiki procesów oraz opierają się głównie na sprzężeniu zwrotnym od stanu lub wyjścia, jest ograniczone. W związku z powyższym istniejące algorytmy muszą być opracowane pod kątem dynamicznych właściwości systemu.

### Przedmiot i obiekt rozwoju

Przedmiot studium, badań i prac rozwojowych przedstawiony jest na przykładowym rozwiązaniu samoregulacji rozdrabniania uziarnionych i kawałkowych bio-nośników energii w widoku schematu technicznego zastosowania (Rys. 2). Dla zadanych warunków technicznych: prędkości kątowne tarcz rozdrabniających  $\omega_1 \div \omega_5$ , intensywność dozowania wsadu  $q_p$  (o określonych parametrach:  $d_p$  – wymiar średni,  $w_p$  – wilgotność), rejestrowano, analizowano i oceniano stany postulowane temperatury  $T$ , ciśnienia  $p$ , wydatku  $Q$ , kinematyki  $i_k$  i dynamiki  $i_d$  ruchu. Pokazano warstwę koncentracji i rejestracji danych, warstwę komputerów i transmisji danych oraz warstwę aplikacyjną z bazą danych.

Rys. 2 przedstawia uproszczony schemat techniczny automatycznego urządzenia do centralnego przetwarzania danych. Sygnały wejściowe wytwarzane są przez czujniki, np. do wyznaczenia nierównomierności: mocy ( $\delta P$ ), wydatku ( $\delta Q$ ), uziarnienia, nierównomierności dynamicznej ( $\delta i_d$ ), kinematycznej ( $\delta i_k$ ) napędu itp. Sygnały te mają charakter ciągły i przedstawiają zmiany napięcia lub natężenia prądu elektrycznego.

Rozdrabniacz zawiera m. in.: pięć silników –  $1 \div 5$ , napędzających indywidualnie zespół roboczy – 6, składający się z pięciu tarcz z licznymi otworami; układ pięciu niezależnych falowników typu  $pDrive$  wyposażonych w interfejs  $RS 485$ , poprzez który można dokonywać odczytu danych oraz można sterować pracą silników (VATECH); dozownik wsadu – 7 typu DSK (HYDRA-PRESS) z interfejsem  $RS 485$ ; licznik energii elektrycznej typu EAP



Rys.2. Schemat kinematyczny i widok zespołu roboczego rozdrabniacza nowej generacji: 1-, 2-, 3-, 4-, 5- silnik elektryczny, 6- zespół rozdrabniających złożony z tarcz wielootworowych, 7- dozownik podawania materiału wsadowego do rozdrabniacza, 8- wylot, odbiór gotowego produktu rozdrabniania

(POZYTON) z interfejsem  $RS 485$ , natomiast odbiór gotowego produktu rozdrabniania następuje przez wylot – 8. Do organizacji, zarządzania i kompensowania zakłóceń wykorzystano środowisko informatyczne LabVIEW. Dostęp z pozycji komputera do urządzeń sterujących odbywa się poprzez interfejs  $RS 485$ .

Transmisja danych może odbywać się również z rejestratora PCD1. System może znaleźć szersze zastosowanie w inżynierii produkcji dóbr materialnych i usług gospodarczych w przemyśle przetwórczym: chemicznym, spożywczym, farmaceutycznym, mineralnym, również górnictwie, hutnictwie i przemyśle budowlanym.

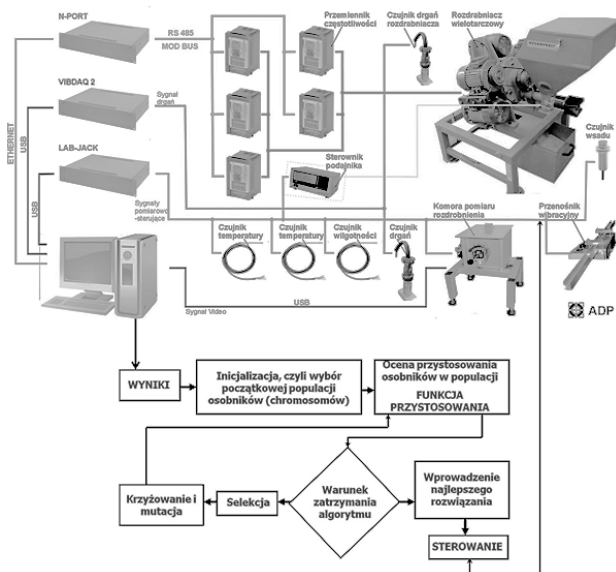
### Studium przypadku

Na rys. 3 pokazano schemat blokowy realizacji i rozwoju, przykład aplikacji kognitywnego sterowania (wg rys. 1); rozdrabniaczem pięciotarczowym, wielootworowym (wg rys. 2) uziarnionej biomasy w środowisku powietrza.

Aplikacja działa autonomicznie na wartościach chwilowych przebiegów, w sekwencji: percepcja – uczenie się – wiedza – decydowanie – wykonanie [Sidor, 2005; Flizikowski i Bieliński, 2013]. Wartości chwilowych przebiegów do wyznaczenia szczegółowej nierównomierności wydajności sumarycznej ( $\delta Q$ ) i granulometrycznej przepływu frakcji wymiarowych produktu ( $\delta Q_{2,10}, \delta Q_{2,25}, \delta Q_{2,40}, \delta Q_{2,70}, \delta Q_{2,85}, \delta Q_{3,00}$ ), mocy łącznej ( $\delta P$ ) i indywidualnej pięciu silników napędzających pięć tarcz rozdrabniających ( $\delta P_1 \div \delta P_5$ ), oraz oceny dobroci reakcji na zakłócenia pokazano w przykładowej tab. 1.

Tab. 1. Wynik sterowania nierównomierności rozdrabniania pięciotarczowego ziaren pszenicy na cele energetyczne (z zastosowaniem algorytmu genetycznego LabVIEW)

Rodzaj zakłócenia pomiarowo dostępnego, $d(i)$	Wartość bez sterowania, [%]	Wartość dopuszcz., [%]	Czas sterowania, [s]	Wartość po sterowaniu, [%]
Nierównomierność mocy $\delta P$	6,24	2,0	15	1,44
Nierównomierność wydatku $\delta Q_{2,10}$	83,82	20,0	256	18,36
Nierównomierność wydatku $\delta Q_{2,55}$	17,09	6,0	178	5,53
Nierównomierność dynamiczna $\delta i_d$	32,97	10,0	309	9,90
Nierównomierność kinematycz. $\delta i_k$	17,78	10,0	346	10,02



Rys.3. Aplikacja autonomicznego rozdrabniania: rozdrabniacz pięciotarczowy, wielootworowy uziarnionej biomasy w środowisku powietrza, instrumentarium badawcze i środowisko wspomagania inteligentnego rozwoju procesu rozdrabniania algorytmami genetycznymi [Flizikowski, 2014].

Uwzględniając czas opóźnienia w torze zakłócenia  $p$ , czas opóźnienia  $k$  w torze samo-kompensowania, w celu usunięcia wpływu zakłócenia pomiarowo dostępnych  $d(i)$  na wyjście  $y(i)$ , należy tak algorytmem genetycznym sterować zmienną  $u(i)$ , aby spełniony był warunek absolutnej równości (niezmienności) wielkości wyjściowych  $y(i)$  względem zakłócenia  $d(i)$ . Zadanie to okazało się dość trudne, w warunkach wykorzystania algorytmów genetycznych, głównie ze względu na dość długi czas samokompensowania ( $k = 346$  s) warunków technicznych: zasilania, prędkości kątowych i innych do stanu dopuszczalnej (z przedziału racjonalnego:  $(1,44 \div 18,36)\%$ ), a nie absolutnej nierówności.

Przebiegi szczegółowych charakterystyk nierówności, jako miar znanych zakłóceń wykorzystano w celu: poznania, modelowania, wyjaśnienia procesów kompensowania, ich symulacji komputerowej, a przede wszystkim eliminowania zakłóceń, nieefektywnych algorytmów sztucznej inteligencji, rozwoju różnych inteligentnych stanów i przemian urządzeń.

Patrząc na cechy poszczególnych modułów, można stwierdzić, że obecnie istnieją algorytmy, które można częściowo lub w pełni wykorzystać w budowie systemu aktywnego poznawczo samokompensowania. Głównie są to zdobycze sztucznej inteligencji [Flizikowski i Bieliński, 2013], rozwiązania inspirowane biologią, neurologią, ewolucją czy nawet systemami immunologicznymi [Vishwakarma i in., 2012]. Algorytmów tych używano z powodzeniem w badaniach operacyjnych, optymalizacji, klasyfikacji, w rozpoznawaniu wzorców, przetwarzaniu sygnałów, ale również, jak w tym przypadku, w eliminacji wpływu zakłóceń na realizację procesu przetwarzania, są i na pewno będą one nadal rozwijane.

## Podsumowanie

Osiągnięto cele opracowania wykorzystując model efektywności procesu dla potrzeb autonomicznego działania, samo-regulacji wielootworowego (wielotarczowego) rozdrabniania; eksperymentalnie wyznaczono wybrane wskaźniki jakości produktu, efektywności procesu, nieszkodliwości oddziaływania produktu i procesu wielotarczowego, wielootworowego, wykorzystując je w funkcji przystosowania dla działań rozwojowych rozdrabniania materiałów uziarnionych.

Inżynieria samoregulowania, aktywnego poznawczo przetwarzania uziarnionych nośników energii jest zagadnieniem rozległym

i powstającym w oparciu o fragmentaryczne doświadczenia nauk technicznych oraz osiągnięcia kognitywistyki. Przybliżono w warunkach inżynierii rozdrabniania energetycznych bionośników uziarnionych, przesłanek, możliwość rozwiązania rozległych problemów równości charakterystyk użytkowych. Wykorzystując algorytmy genetyczne można w procesie auto-regulowania znaleźć takie warunki techniczne (intensywność dozowania wsadu  $-q_{pi}$  o określonych parametrach: wymiar średni  $d_{pk}$ , wilgotność  $w_{pk}$ ; prędkości kątowych tarcz rozdrabniających  $\omega_1 \div \omega_5)_{pi}$ ) że wskaźniki nierówności osiągają wartości z przedziału dopuszczalnego:  $1,44 \div 18,36\%$  (Tab.1).

## LITERATURA

- Armstrong J.E., Lingenfelter L., McKinney L., (2007). The effect of moisture content on determining corn hardness from grinding time, grinding energy, and near-infrared spectroscopy *Appl. Eng. Agriculture*, 23(6), 793-799. DOI: 10.13031/2013.24046
- Flizikowski J., (2002). Mechanical engineering of grain milling. *Acta Agroph.*, 63, 25-37
- Flizikowski J., (2005). *Konstrukcja rozdrabniaczy żywności*. Wyd. UTP, Bydgoszcz
- Flizikowski J., (2014). Kognitywne monitorowanie przetwórstwa. *Inż. Przetw. Spoż.*, 4, 5-12
- Flizikowski J., Bieliński K., (2013). Technology and energy sources monitoring: control, efficiency and optimization. IGI Global, USA, (ISBN 978-1-4666-2664-5)
- Hoffman D., Ngonyamo-Majee R.D., Shaver R.D., 2010. Determination of diverse corn germplasm using near-infrared reflectance baseline shift as a measure of grinding resistance. *J. Dairy Sci.*, 4, 1685-1689. DOI: 10.3168/jds.2009-2652
- Jankowski M., Tyszczyk K., Kopacz S. 2009. Algorytm optymalizacji rozdrabniania nasion oleistych z wykorzystaniem programowania genetycznego. *Inż. Ap. Chem.*, 48(2), 54-55
- Macko M., (2011a). *Modeling and simulation of multi-edge comminution* [in:] Machine modeling and simulations 2011 – The 16th International Slovak-Polish Conference. Terchová, Slovakia. University of A. Dubček in Trenčín. 87–92 (ISBN 978-80-8075-494-5)
- Macko M., (2011b). Metoda doboru rozdrabniaczy wielokrawędziowych do przeróbki materiałów polimerowych. Wyd. Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego, Bydgoszcz (ISBN 978-83-7096-821-2)
- Macko M., (2011c). Comminution as an important stage in recycling [in:] Damanhuri E. (ed.): *Recycling / Book 2*. InTech – Open Access Pub. (ISBN 978-953-307-1150-2)
- Pahl M. H., (1993). *Zerkleinerungstechnik. Praxiswissen Verfahrenstechnik*. Mechanische Verfahrenstechnik Auflage, Leipzig
- Sadkiewicz J., (2014). *Prowadzenie badania efektywności pracy wielotarczowego rozdrabniacza ziaren zbóż*. Praca doktorska, Wydz. Inż. Mech., UTP, Bydgoszcz
- Sadkiewicz K., Sadkiewicz J., Sadkiewicz J. 2004. Bydgoska aparatura do badania zboża, mąki i pieczywa. Wyd. ATR, Bydgoszcz (ISBN-83-89334-81-X)
- Sidor J., (2005). *Badania, modele i metody projektowania młynów wibracyjnych*. Monografia AGH nr 150, Kraków
- Śmigielski G., Macko M., Tyszczyk K., (2013). *System sterowania rozdrabniacza precyzyjnego*. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, 59(10), 1009-1011
- Tomporowski A., (2011). Rozwój konstrukcji rozdrabniaczy biomateriałów. Część I: Model obiektu badań. *Inż. Ap. Chem.*, 50(3), 75-76
- Tomporowski A., (2012). Stream of efficiency of rice grains multi-disc grinding. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 14(2), 150-153
- Tomporowski A., Flizikowski J., (2013). Charakterystyki ruchowe wielotarczowego rozdrabniacza ziaren zbóż. *Przem. Chem.*, 92(4), 498-503
- Tomporowski A., Opielak M., (2012). Structural features versus multi-hole grinding efficiency. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 14(3), 223-228
- Tyszczyk K., 2008. Konstrukcyjno-przetwórcze sterowanie stopniem rozdrobnienia nasion gorczycy. *Inż. Ap. Chem.*, 47(2), 32-33
- Vishwakarma R. K., Shivhare U. S., Nanda S. K., (2012). Predicting guar seed splitting by compression between two plates using Hertz theory of contact stresses. *J. Food Sci.*, 77(9), 231-239. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2012.02861.x
- Zawada J. (red.), (2005). *Wprowadzenie do mechaniki maszynowych procesów kruszenia*. Wyd. Inst. Tech. Eksp., Radom/Warszawa (ISBN 8372044139)