

Józef FLIZIKOWSKI¹
Adam MROZIŃSKI²
Marek MACKO³

IMPLEMENTACJE MECHATRONICZNE W ROZDRABNIACZU DO MATERIAŁÓW NIE-KRUCHYCH

Zaprezentowano w pracy koncepcję stanowiska rozdrabniania wielokrawędziowego. Cechą charakterystyczną jest modułowa budowa systemu. Wdrożono mechatroniczne rozwiązania w układzie pomiarowo-kontrolnym. Dzięki nim możliwe było monitorowanie procesu rozdrabniania i wprowadzenie modyfikacji konstrukcyjnych w układzie roboczym rozdrabniacza. Zamieszczono przykładowe wyniki badań zapotrzebowania mocy i momentu obrotowego.

MECHATRONIC IMPLEMENTATIONS IN GRINDER FOR NON-BRITTLE MATERIALS

The conception of multi-edge comminution system has been shown. A modular construction of the system is a distinctive feature. Some mechatronic solutions have been implemented in a measurement and control system. Some advantages like grinding monitoring and design modifications have been achieved thanks to such way of investigation. Some results of energy requirements and torque were also presented.

1. WPROWADZENIE

Proces rozdrabniania jest ważnym etapem w zakresie przygotowania produktu, m.in. w przetwórstwie żywności i tworzyw polimerowych. Proces ten jest trudny do formalnego opisu, ze względu na konieczność uwzględnienia właściwości ośrodków, losowe sposoby pęknięcia i przemieszczania się elementów rozdrabnianych w przestrzeni roboczej maszyn, zmieniające się warunki brzegowe obciążenia, itp. W przypadku rozdrabniania drobnego (rozdrabnianie b. drobne $\rightarrow d_{50} \approx 10 \mu\text{m}$) jednostkowe zapotrzebowanie energii zawiera się w przedziale $(20 \div 30) \text{ kW} \cdot \text{h/Mg}$, a w przypadku bardzo drobnego (rozdrabnianie koloidalne $\rightarrow d_{50} \approx 1 \mu\text{m}$) zwiększa się nawet do $800 \text{ kW} \cdot \text{h/Mg}$ (dla aktualnie stosowanych rozwiązań). Tak duże wartości nie sprzyjają zmniejszeniu całkowitych nakładów na

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej;
85-789 Bydgoszcz; Al. Prof. S. Kaliskiego 7. Tel.: 52 3408293, Fax: 52 3408255, e-mail: fliz@utp.edu.pl

² Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej;
85-789 Bydgoszcz; Al. Prof. S. Kaliskiego 7. Tel./fax: 52 3408453, e-mail: adammroz@utp.edu.pl

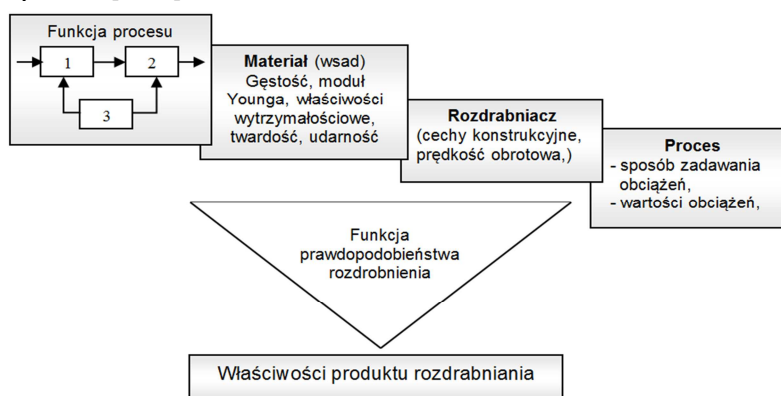
³ Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, Wydział Matematyki, Fizyki i Techniki, ul. K. Chodkiewicza 30;
85-064 Bydgoszcz. Tel.: 52 3419330, Fax: 52 3414773, e-mail: mackomar@ukw.edu.pl

rozdrabnianie zarówno w przetwórstwie jak i w recyklingu tworzyw polimerowych. Zapotrzebowanie energii na rozdrobienie jest tym większe, im mniejszy jest średni wymiar ziarna po rozdrabnianiu. Szacuje się, że osiągnięcie wymiaru ziarna (produktu rozdrabniania) - 10 μm wymaga 1 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{Mg}$ (średnia wartość podczas rozdrabniania), podczas gdy do rozdrobienia do średniej wielkości ziarna poniżej 1 μm konieczne jest 200 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{Mg}$ [3, 11].

CELEM PRACY jest poprawy skuteczności rozdrabniania poprzez mechatroniczne modyfikacje konstrukcyjne oraz ich implementacje. Modyfikacje polegają na zastosowaniu celowych podsystemów sterowania i informacji w konstrukcjach procesowych, logistycznych i badawczo-pomiarowych. Dzięki nim można czynnie monitorować zapotrzebowanie energetyczne na celowe rozdrobienie 1 kg biomasy, tworzywa itp.

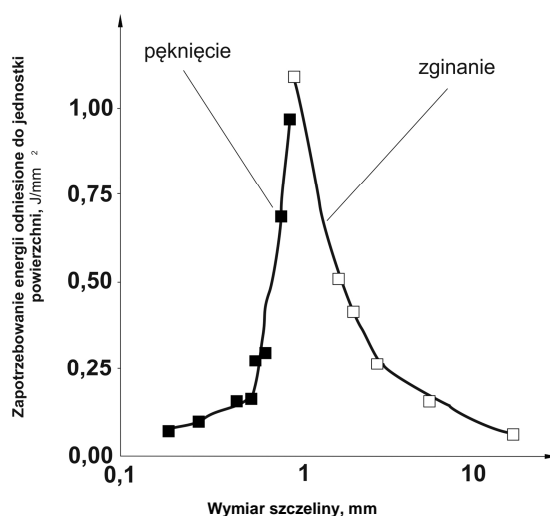
2. ZAKRES IMPLEMENTACJI

W zakresie wdrażania mechatronicznych, innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych i nowoczesnych metod projektowania M.S. Powell zaproponował koncepcję Virtual Comminution Device (VCM), którego założeniem jest ułatwienie szybkiego doboru wariantu rozdrabniacza oraz optymalizacja istniejących rozwiązań [9]. Zakłada się, że wdrożenie tego typu systemów mechatronicznych przyczyni się do zmniejszenia kosztów zużycia elementów roboczych rozdrabniacza oraz do zwiększenia efektywności procesu rozdrabniania wraz ze zmniejszeniem zapotrzebowania energii na proces. W. Peukert [8] zaproponował sformułowanie ogólnej funkcji procesu, która uwzględnia zarówno typ rozdrabniacza jak i jego dodatkowe wyposażenie (sita, przesiewacze, układy zasilające). W początkowym etapie skoncentrowano się głównie na konstrukcji rozdrabniacza, i wprowadzono uproszczenia polegające na ścisłej zależności konstrukcji i właściwości materiału, w którym funkcja materiałowa związana jest z reakcją materiału na zadane obciążenia (rys. 1). Powstaje wówczas pytanie: jak materiał i funkcja rozdrabniania mogą być wzajemnie odseparowane i w jaki sposób może być określana funkcja materiałowa. Podobny system zależności wprowadził J. Flizikowski określając funkcję materiału, maszyny i procesu [1,2,3].



Rys. 1. Schemat blokowy procesu w układzie: materiał, rozdrabniacz, proces [8].

Zapotrzebowanie energetyczne jest powiązane z cechami konstrukcyjnymi rozdrabniacza i wdrożeniem modułów mechatronicznych. Np. wielkość szczeliny między nożami (stałym i ruchomym) decyduje o poziomie zapotrzebowania na energię, ale wpływa również na występowanie dominujących obciążeń i odkształceń. Przykładem mogą być wyniki badań (rys.2) zrealizowanych w Niemczech [11]. Dla niewielkich wymiarów szczeliny próbka ulega pęknięciu (do 1 mm), a wraz ze zwiększeniem szczeliny wzrasta zapotrzebowanie energii na rozdrobnienie. Dla większych wymiarów szczeliny następuje wciągnięcie materiału i jego zginanie, a następnie dezintegracja.



Rys. 2. Zapotrzebowanie energii podczas rozdrabniania elementów ze stopu aluminium $AlMg_3$ w warunkach różnej szerokości szczeliny promieniowej; grubość ścianki 1mm, prędkość zadawania obciążeń 5,5 m/s, kąt ostrza 90° [11].

W procesie oceny mechatronicznego rozwiązania koncepcyjnego konstrukcji zespołu rozdrabniającego wykorzystuje się analizę ekstremów funkcji (charakterystyk użytkowych), estymatorów, zmiennych procesu rozdrabniania [1, 3]:

- e_R - funkcja efektywności energetycznej, -,
- ΔF_R - zmiana przekroju rozdrabniania, m²,
- ω, n, v - prędkości kątowe, obrotowe, liniowe, rad·s⁻¹, s⁻¹, m·s⁻¹,
- η - sprawność, -.

Jakość konstrukcji mechatronicznej, potencjalne rozwiązanie oceniane jest na podstawie funkcji przystosowania - oznaczającej wartość standardowego odchylenia dla określonego estymatora: przekroju rozdrabniania lub efektywności energetycznej, może mieć następującą postać:

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

gdzie:

- ΔF_R - odchylenie standardowe przekroju rozdrabniania,
 $F_{R,i}$ - wartość przekroju rozdrabniania w i-tej iteracji algorytmu symulującego proces rozdrabniania,
 n - liczba obserwacji (liczba próbek czasowych).

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

Do oceny efektywności - sprawności quasi-ścinania materiałów biologicznych na cele żywieniowe, paszowe, bądź energetyczne, stosowano wskaźnik funkcji przystosowania:

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

gdzie:

- η_{q-s} - strawność, sprawność spalania produktu rozdrabniania, *in vitro*, kalorymetryczna, -,
 η_o - strawność, sprawność spalania całych, nie rozdrobnionych nasion, ziaren, *in vitro*, kalorymetryczna, -,
 E_{brutto} - energia zawarta w przetwarzanych ziarnach, np. pszenżyto: 16.000, kJ·kg⁻¹,
 η_s, η_p - sprawność układu napędowego rozdrabniacza (silnika i przekładni), -,
 k_j - współczynnik oporów ruchu jałowego, kg·s⁻¹,
 v_r - prędkość quasi-ścinania, m·s⁻¹,
 τ_{q-s} - naprężenia quasi-ścinające, N·m⁻²,
 F_{q-s} - chwilowy przekrój quasi-ścinania (koło), m²,
 F_R' - przekrój oddziaływań wtórnych quasi-ścinania, m²,
 \mathcal{E} - współczynnik proporcjonalności, N·s²·m⁻⁴,
 M_k - wskaźnik krotności próby masowej, -.

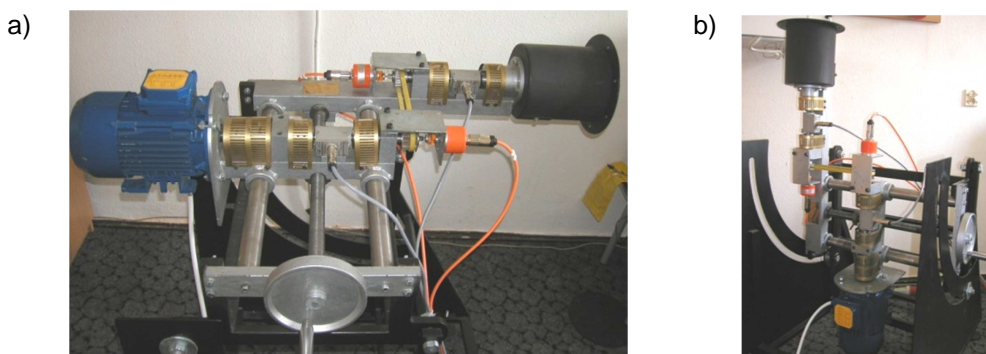
Zakres badań dotyczących poszukiwania opisu matematycznego „użyteczności” wdrożenia mechatronicznego z przyjętego postępowania badawczego obejmował:

- ocenę wpływu właściwości materiałowych oraz postaci próbki na przebieg sił i pracę quasi-ścinania,
- analizę wpływu prędkości przemieszczania elementów dezintegrujących na wartość pracy quasi-ścinania,
- określenie wpływu kąta ostrza krawędzi otworu na wartość pracy quasi-ścinania,
- wdrożenie mechanizmów badań symulacyjnych oporów i przekrojów quasi-ścinania dla wybranych wariantów,
- ocenę charakterystyk użytkowych procesu rozdrabniania w warunkach fizycznych.

W zakresie badań uwzględniono wdrożenia modułów mechatronicznych w układzie rozdrabniacza wielokrawędziowego, w którym proces rozdrabniania polega na oddzielaniu kolejnych fragmentów materiału polimerowego jako nadawy, dzięki pracy krawędzi otworów w tarczach lub bębnach [1,2]. Wspomaganie mechatronicznego koncipowania konstrukcji rozdrabniaczy wielokrawędziowych, jako procedura matematyczna, jest próbą odpowiedzi na twórczą złożoność procesu wymyślania licznych suboptymalnych odmian jednej konstrukcji. Pierwsze próby, wspomaganie twórców rozdrabniaczy wielokrawędziowych, zrealizowano za pomocą stacjonarnych komputerów z zaimplementowanym programem IE_TEST-07_BIO [2,3]. Wspomaganie było bardzo efektywne, ale nie pozwalało na mobilny dostęp do programu. Dokonano prób wdrożenia programu w telefonie komórkowym. Próby okazały się bardzo owocne i wygodne we współpracy dla twórców. Program IE_TEST-07_BIO, działający z wykorzystaniem właściwości algorytmów genetycznych, w inteligentnym wspomaganiu koncipowania konstrukcji wielokrawędziowych rozdrabniaczy, materiałów o zidentyfikowanych właściwościach, został napisany w języku Java i wdrożony do telefonu komórkowego, funkcjonującego z reguły również w tym języku programowania, w środowisku Micro Edition.

3. MECHATRONICZNE STANOWISKO LABORATORYJNE

Mechatroniczne stanowisko laboratoryjne zbudowano w ramach kilku projektów badawczych MNiSW [1,2,3,4,5,6,7]. Ramę i układ napędowy wykonano w taki sposób, aby możliwy był pomiar momentów obrotowych i prędkości kątowych w dowolnym ustawieniu wałka napędowego (od pionowego do poziomego). Zaproponowano taką budowę stanowiska, w którym układ napędowy wraz z czujnikami pomiarowymi stanowi zintegrowaną bazę do prowadzenia badań z zastosowaniem różnych typów układów dezintegrujących. Wykorzystuje się wówczas końcówkę wału maszynowego, na którym osadzane są układy robocze rozdrabniacza (rys. 3).



Rys. 3. Mechatroniczne stanowisko uniwersalnego rozdrabniacza laboratoryjnego ULR-2,0/2004: a) z poziomym ustawieniem wałka napędowego, b) z pionowym ustawieniem wałka napędowego

Taki sposób zapewnia zachowanie niezmiennych parametrów pomiarowych i gwarantuje możliwość oszacowania zapotrzebowania energii na rozdrobnienie jednostkowej masy (objętości) tworzywa, przy różnych konfiguracjach – sposobach dezintegracji. Badania mogą być prowadzone w warunkach płynnie regulowanej prędkości obrotowej silnika w zakresie od (0÷3700) min⁻¹.

Koncepcja mechatronicznego stanowiska laboratoryjnego umożliwia realizację badań rozdrabniania dla szerokiego spektrum czynników stałych:

- właściwości materiałowe i kształt elementów rozdrabnianych jako nadawy,
- wymiary elementów rozdrabnianych oraz zmiennych,
- momenty i prędkości obrotowe tarcz i bębnow z otworami,
- cechy konstrukcyjne przestrzeni rozdrabniacza.

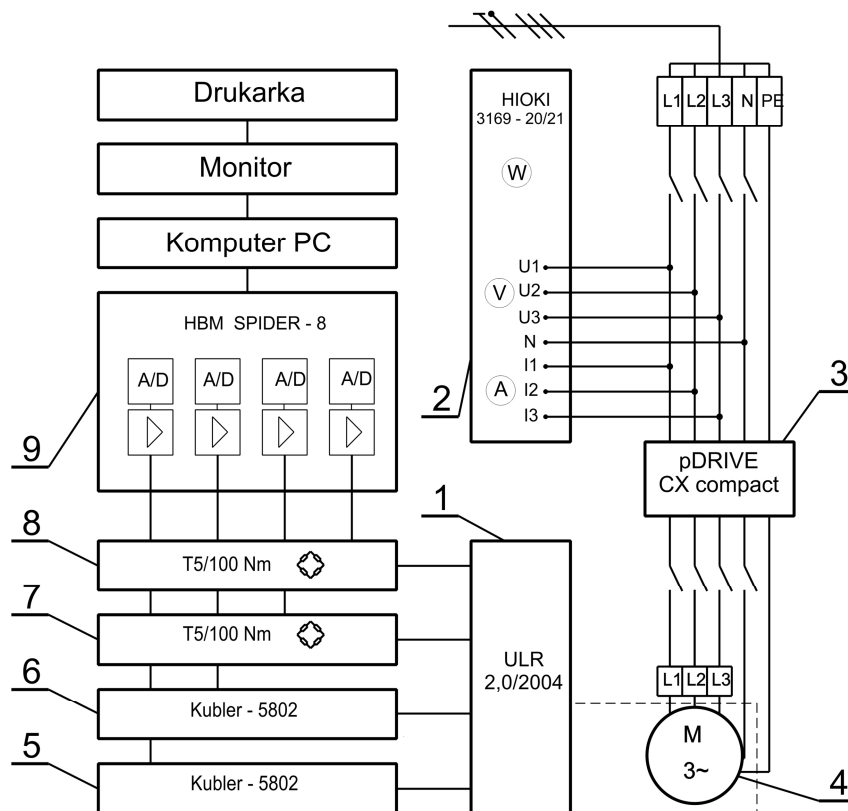
Na rys. 4 przedstawiono regulowany system napędowy, pomiarowo-kontrolny zintegrowanego mechatronicznie wielokrawędziowego rozdrabniania. A na rys. 5 przedstawiono schemat elektryczny stanowiska. Zastosowano tu falowniki, dzięki którym możliwa jest płynna regulacja prędkości obrotowej tarcz i bębnow rozdrabniacza.



Fig.4. System pomiarowo-kontrolny zintegrowanego systemu rozdrabniania wielokrawędziowego PSOR-08; 1-5 – falowniki, 6 – moduł załączania, 7 – system sterowania zasilaniem nadawy do układu rozdrabniającego, 8 – system zabezpieczeń [1].

Do rejestracji sygnałów z momentomierza wykorzystano 4 – kanałowy wzmacniacz pomiarowy Spider 8 firmy HBM, a do obróbki wyników badań oprogramowanie CATMAN firmy HBM. Pomiaru mocy elektrycznej dokonano za pomocą wielofunkcyjnego miernika mocy Hioki 3169 – 20/21. Do obserwacji komory rozdrabniacza zastosowano aparat Exilim EX-F1 Casio oraz zestaw żarówek doświetlających E27 LED/Niviss, z możliwością rejestracji max. 1200 klatek/s o rozdzielczości obrazu 336 x 96 pikseli.

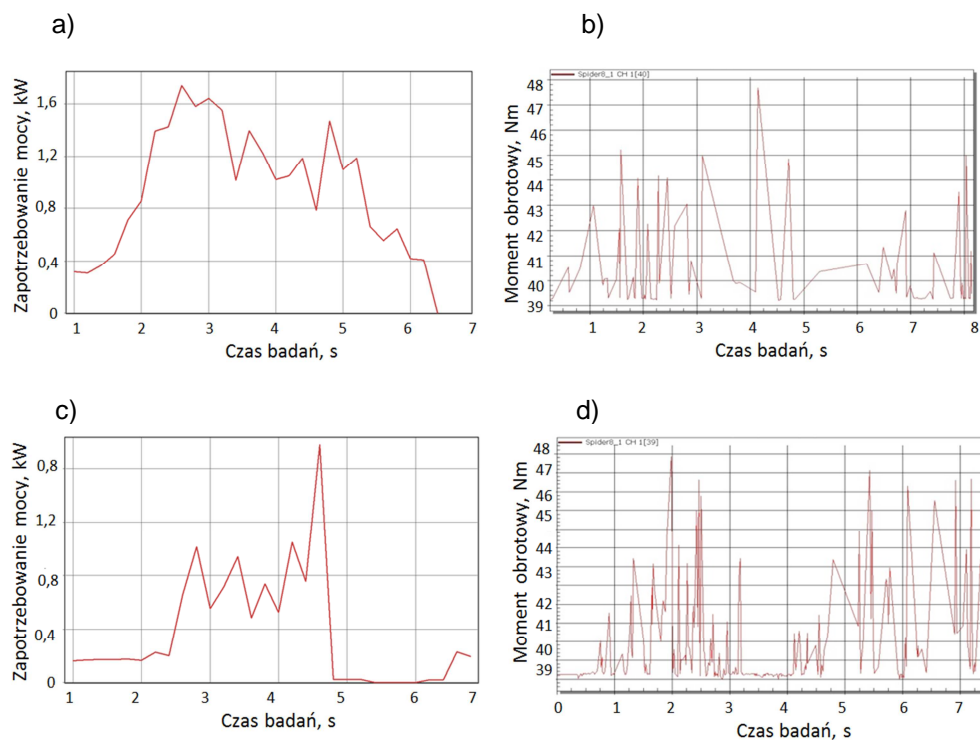
Badania laboratoryjne rozdrabniania wielokrawędziowego zrealizowano dla wielu wariantów konstrukcyjnych zespołów rozdrabniaczy: bębnowego, tarczowego z otworami walcowymi oraz tarczowego z otworami wielokątnymi, wybranych na podstawie macierzy możliwych rozwiązań, wypełniających wstępne kryteria w zakresie efektywności energetycznej i krzywej uziarnienia (rys.6). Wyniki badań doświadczalnych poszerzają wiedzę z zakresu rozdrabniania i stanowią materiał do utworzonej i rozbudowywanej bazy danych dotyczących konstrukcji oraz procesu rozdrabniania wielokrawędziowego. Dane te wykorzystano w zintegrowanym systemie ekspertowym w celu ułatwienia doboru konstrukcji rozdrabniacza do odpowiednich materiałów.



Rys.5. Schemat elektryczny stanowiska rozdrabniacza laboratoryjnego wraz z elementami kontrolno-pomiarowymi: 1 – Rozdrabniacz laboratoryjny ULR 2,0/2004, 2 – Wielofunkcyjny miernik mocy Hioki 3169 – 20/21, 3 – falownik pDrive CX compact/3kW, 4 – Trójfazowy silnik indukcyjny (Indukta – Sh 90L - 4/2), 5 - Przetwornik obrotowo – impulsowy (Kubler – 5802), 6 - Przetwornik obrotowo – impulsowy (Kubler – 5802), 7 – Momentomierz (HBM T5/100 Nm), 8 – Momentomierz (HBM T5/100 Nm). 9 – Wzmacniacz pomiarowy HBM Spider 8.

4. PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ

Badania weryfikacyjne przeprowadzono pod kątem oceny modyfikacji geometrycznych tarczy, bębna i listwy na charakterystyki użytkowe. Wyniki zapotrzebowania mocy i wartości momentu obrotowego dla trzech wariantów konstrukcyjnych rozdrabniaczy, dla próbki PVC (prędkość obrotowa 1300 min^{-1}) przedstawia rys. 6.



Rys. 6. Wyniki badań laboratoryjnych ($n = 1300 \text{ min}^{-1}$): a) zapotrzebowanie mocy - rozdrabniacz bębnowy, b) moment obrotowy - rozdrabniacz bębnowy, c) zapotrzebowanie mocy - rozdrabniacz tarczowy z otworami walcowymi, d) moment obrotowy - rozdrabniacz tarczowy z otworami walcowymi.

5. PODSUMOWANIE

Zastosowanie mechatronicznych modułów w zintegrowanym układzie rozdrabniania oraz uwzględnienie aspektów efektywności rozdrabniania, jest oparta na innowacyjnym modelu holistycznym, umożliwiającym symulację całego obiegu technologicznego, obiektu środowiskowego, od założeń konstrukcyjnych, poprzez prognozowanie uszkodzeń, do odnowy potencjału energio-materialnego.

Wdrożenie mechatronicznych modułów w systemie rozdrabniania wielokrawędziowego zawiera innowacyjny, koncepcyjotwórczy i oryginalny sposób opisu matematycznego charakterystyk i wskaźników tworzywa oraz parametrów rozdrabniania w kierunku uzyskania granulatu o postaci i wymiarach pożądanym dalszym przetwórstwem. Uzyskane w ten sposób bazy danych o cechach wsadu, produktu, maszyny i procesu rozdrabniania odpowiadają postulatowi zintegrowanego podejścia do: minimalizacji energii, precyzyjnego granulatu po rozdrobnieniu, samosterowania systemu na maksymalizację funkcji rozdrabniania i minimalizację nakładów towarzyszących podczas transportu, mieszania, zagęszczania; piętrowej konstrukcji samego modelu

integracji tworzywowej systemu oraz korzyści maszynowych do rozdrabniania – granulacji precyzyjnej. Metoda ma duże znaczenie praktyczne w zakresie odkrywania nowych konstrukcji oraz technologii i gwarantuje wysoką jakość rozwiązań.

„Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2009/2011 jako projekt badawczy”

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Flizikowski J., 2005, *Projekt implementacji inteligentnego systemu wspomaganie konstrukcji młynów specjalnych*, MNiI, ATR-AGH, Warszawa, Bydgoszcz-Kraków.
- [2] Flizikowski J., 2008, *Plastic devices for Energy Engineering*. NANOENERGY, Tapis Rouge, Paryż.
- [3] Flizikowski J., 2011: *Micro- and Nano Energy Grinding*. ISBN-10 9814303534. Pan Stanford Publishing. 2011.
- [4] Flizikowski J., Macko M., Czerniak J., Mroziński J.: *Implementation of genetic algorithms into development of mechatronic multi-edge's grinder design*. ASME Denver XI 2011. ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2011, Nov. 11-17, 2011, Denver, Colorado, USA.
- [5] Kamyk W., 2008: *Badanie zintegrowanego układu rozdrabniania ziaren kukurydzy*. Dysertacja WM UTP, Bydgoszcz.
- [6] Macko M., Czerniak J.: *The evolutionary method for optimising disk design of multi-edge grinders*. Journal of Theoretical and Applied Mechanics – artykuł przyjęty do druku 08/2011.
- [7] Macko M.: *Comminution as an important stage in recycling*. Chapter in: "Recycling / Book 2" edited by Damanhuri E. ISBN 978-953-307-1150-2, InTech - Open Access Publisher, 09/2011, Rijeka, Croatia. Recycling / Book 2.
- [8] Peukert W. *Material properties in fine grinding*. Int. J. Miner. Process. 74S (2004) s.3–17.
- [9] Powell M.S., Morrison R.D.: *The future of comminution modelling*. International Journal of Mineral Processing, 84 (2007), s. 228 – 239.
- [10] Tarnowski W., 2010: *Równoczesna optymalizacja lub polioptymalizacja maszyny i procesu*. PROBLEMY EKSPLOATACJI, vol.77, 2/2010, s.17-34.
- [11] Woldt D., Schubert G., Jäckel H.-G.: *Size reduction by means of low-speed rotary shears*. Int. J. Miner Process. 74S (2004), s.405-415.