

1 **dr hab. inż. Adam Ekielski,**

2 **dr inż. Tomasz Żelaziński**

3 Katedra Organizacji i Inżynierii Produkcji
4 Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
5 ul. Nowoursynowska 164, 02-787 Warszawa, Poland
6 e-mails: adam_ekielski@sggw.pl, tomasz_zelazinski@sggw.pl
7

8 **dr hab. inż. Karol Durczak**

9 Instytut Inżynierii Biosystemów
10 Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
11 ul. Wojska Polskiego 50, 60-627 Poznań, Poland
12 e-mail: kdurczak@up.poznan.pl
13
14

15 **Wykorzystanie analizy falkowej do oceny stopnia zużycia elementów**
16 **roboczych ekstruderów spożywczych**

17 **The use of wavelet analysis to assess the degree of wear of working elements**
18 **of food extruders**

19
20 **Słowa kluczowe:** analiza falkowa, STFT, skalogram CWT, ekstruzja, cylinder ekstrudera
21

22 **Streszczenie:** W pracy przedstawiono ocenę stanu zużycia elementów roboczych ekstrudera
23 jednoślismakowego na podstawie obserwacji zmian składowych częstotliwościowych widma
24 obciążenia układu napędowego ślimaka ekstrudera i ciśnienia w matrycy przy wykorzystaniu narzędzi
25 analizy falkowej. W planie badań sformułowano hipotezę, że możliwa jest ocena stopnia zużycia
26 elementów roboczych ekstrudera przez obserwację częstotliwości zmian parametrów procesowych. Ze
27 względu na dynamiczne cechy procesu przy wyznaczeniu częstotliwości własnych wykorzystano falkę
28 Morlet'a. Badania przeprowadzono dla trzech wysokości klinów wzdłużnych 4, 2 i 1 mm. Podczas
29 eksperymentu zmieniano obciążenia ekstrudera oraz prędkość obrotową ślimaka. Stwierdzono, że na
30 podstawie obserwacji zmian częstotliwości rezonansowych można precyzyjnie oszacować stopień
31 zużycia elementów ciernych w ekstruderze jednoślismakowym. Ponadto zaobserwowano, że analiza
32 falkowa może być skutecznym narzędziem oceny stopnia zużycia elementów roboczych ekstrudera.
33

34 **1. Wprowadzenie**
35

36 Proces ekstruzji produktów spożywczych jest jednym z bardziej popularnych
37 procesów produkcyjnych przetwarzania skrobi w przemyśle przetwórczym [12].
38 Podstawowymi parametrami roboczymi tego procesu są ciśnienie w matrycy i rozkład
39 temperatur wewnątrz ekstrudera. Parametry te mają dalej istotny wpływ na moment
40 obciążający układ napędowy tych urządzeń [10]. Z technologicznego punktu widzenia
41 wartość ciśnienia wyjściowego zależy od parametrów procesu takich jak: rodzaj
42 przetwarzanego materiału, jego wilgotność oraz konfiguracja i stopień zużycia ślimaków
43 ekstrudera [3, 8]. Wartość ciśnienia wpływa również na jakość otrzymywanego produktu,
44 dlatego zapewnienie powtarzalnego, dla danych warunków technologicznych, ciśnienia w
45 matrycy jest kluczowym czynnikiem w przypadku przemysłowych procesów produkcyjnych.

1 W poprawnie działających zespołach roboczych ekstrudera i przy niezmiennych
2 parametrach technologicznych procesu, zmiana wartości ciśnienia powinna wpływać na
3 zmianę obciążenia układu napędowego. Wartości ciśnień uzyskiwanych w ekstruderze są
4 jednak zmiennymi wynikowymi, które uzależnione są od parametrów procesu ekstruzji oraz
5 od stanu ekstrudera (stopnia zużycia jego elementów roboczych). Dla ekstruderów
6 jednoślimakowych właściwości transportowe zależą od różnicy sił tarcia występujących
7 pomiędzy transportowanym materiałem i ślimakiem ekstrudera oraz materiałem i wewnętrzną
8 powierzchnią obudowy ekstrudera. Materiał ma możliwość przemieszczania się wewnątrz
9 ekstrudera tylko wtedy, gdy tarcie styczne materiału o ścianki obudowy będzie większe niż
10 wartość siły tarcia stycznego występującego pomiędzy materiałem, a ślimakiem ekstrudera
11 [14]. Ma to kluczowe znaczenie zarówno na stabilne prowadzenie procesu, jak również dla
12 jakości uzyskiwanych produktów.

13 W przypadku ekstruderów jednoślimakowych w celu zapewnienia tych warunków, na
14 wewnętrznej stronie ścianek obudowy stosowane są specjalnie nacinane bruzdy lub we
15 wzdłużne wycięcia wprowadzane kliny. Oba te rozwiązania mają zapewnić zwiększenie tarcia
16 materiału o wewnętrzną powierzchnię obudowy ekstrudera. W badanym ekstruderze
17 konstruktor zastosował drugie rozwiązanie polegające na wprowadzeniu klinów wzdłużnych
18 umieszczonych we wzdłużnych wyfrezowaniach. W czasie eksploatacji kliny robocze ulegają
19 stopniowemu ścieraniu, a wraz ze zmniejszeniem się ich wysokości pogorszeniu ulegają
20 właściwości transportowe ekstrudera. W konsekwencji prowadzi to do pogorszenia jakości
21 otrzywanego ekstrudatu.

22 Obecnie pomiar bezwzględnej wysokości klinów roboczych, w przypadku weryfikacji
23 części roboczych, jest skuteczny, lecz w wielu wypadkach prowadzi do przedwczesnej
24 wymiany (lub regeneracji) cylindra ekstrudera. Taki stan wynika z braku skutecznej metody
25 oceny wpływu ich stopnia zużycia na właściwości transportowe. W literaturze podawane są
26 metody oceny weryfikacji ich stopnia zużycia, jednak zazwyczaj odnoszą się one do
27 konkretnych jednorodnych materiałów. Ze względów technologicznych ważnym byłaby
28 informacja o właściwościach transportowych ekstrudera także dla bardziej zróżnicowanych
29 materiałów.

30 Naturalna częstotliwość drgań elementów jest znakiem szczególnym elementu
31 roboczego lub układu elementów [4, 6]. W przypadku ekstruderów częstotliwość zmian
32 wartości momentu obciążającego wał napędowy ślimaka oraz ciśnienia w matrycy ekstrudera
33 w czasie pracy zależą od współpracy elementów mechanicznych, ilości oraz cech
34 przetwarzanego materiału. Stąd też w dotychczasowych badaniach tego typu do analizy
35 sygnałów wykorzystywano szybką transformatę Fouriera (FFT) do „wyłuskiwania”
36 składowych częstotliwościowych procesu [5, 11].

37 Wykorzystanie FFT wymaga stacjonarności mierzonego sygnału, co prowadzi do
38 braku informacji o zmianach częstotliwości składowych w zależności od czasu. Dlatego
39 bardziej wiarygodną metodą jest przeprowadzenie cyklicznej transformaty Fouriera dla
40 sygnałów zebranych w pewnych odstępach czasu. W takich warunkach widmo mierzone jest
41 w pewnym przedziale czasowym nazywanych okienkiem. Metoda ta nosi nazwę
42 okienkowania i zaproponowana została przez Gabora [9]. Przylegające do siebie okienka
43 pozwalają na obserwacje zmian składowych częstotliwościowych mierzonego sygnału w
44 czasie. Przekształcenie to nazwano *Short Time Fourier Transformation* (STFT) i przedstawia
45 przebieg sygnału w układzie: częstotliwość i czas [2].

46 Wadą metody STFT jest kompromis pomiędzy doбором szerokości okna w celu
47 uchwycenia dynamiki zmian sygnału niestacjonarnego (wtedy okno powinno być jak
48 najkrótsze) i koniecznością uwzględnienia składowych o niskiej częstotliwości (okno
49 możliwie długie). W przypadku stałej długości okna możliwe jest gubienie informacji

1 zarówno częstotliwościowych jak i czasowych, dlatego wiele sygnałów wymaga
2 zastosowania okna o zmiennej szerokości.

3 Uzupełnieniem przytoczonych metod jest analiza falkowa, która pozwala na
4 wprowadzenie do pomiaru widma sygnału okienkowania o zmiennej długości obserwacji [13,
5 15]. Analiza ta pozwala na stosowanie zmiennej długości okienek: długich okienek
6 czasowych, umożliwiając prowadzenie analizy w przypadku sygnałów o niskiej
7 częstotliwości i krótkich - kiedy wymagana jest obserwacja zjawisk
8 wysokoczęstotliwościowych. Dzięki czemu możemy wyszukać informacje zawarte w
9 analizowanym sygnale niestacjonarnym, pomijane przez inne techniki pomiaru sygnałów,
10 takich jak punkty awarii, nieciągłość wyższych pochodnych czy podobieństwo własne [1].

11 Celem pracy było przedstawienie oceny stanu zużycia elementów roboczych
12 ekstrudera (wysokości klinów cylindra) na podstawie obserwacji zmian składowych
13 częstotliwościowych widma obciążenia układu napędowego i ciśnienia w matrycy przy
14 wykorzystaniu narzędzi analizy falkowej.

15

16 2. Metodyka

17

18 Badania przeprowadzono wykorzystując obserwacje składowych częstotliwościowych
19 zmian ciśnienia materiału w głowicy ekstrudera i względnej zmiany wartości momentu
20 obciążającego wał napędowy ślimaka.

21 Obiektem badań był proces ekstruzji kaszki kukurydzianej o wilgotności 14%
22 przetwarzanej w ekstruderze jednoślindakowym, model KZM-2. Profil temperaturowy
23 wynosił 130 °C, 110 °C i 80 °C. Dane techniczne badanego ekstrudera zamieszczono w tabeli
24 1.

25

26 Tabela 1. Podstawowe parametry techniczne ekstrudera KZM-2

27 Table 1. KZM-2 single screw extruder specification, basic data

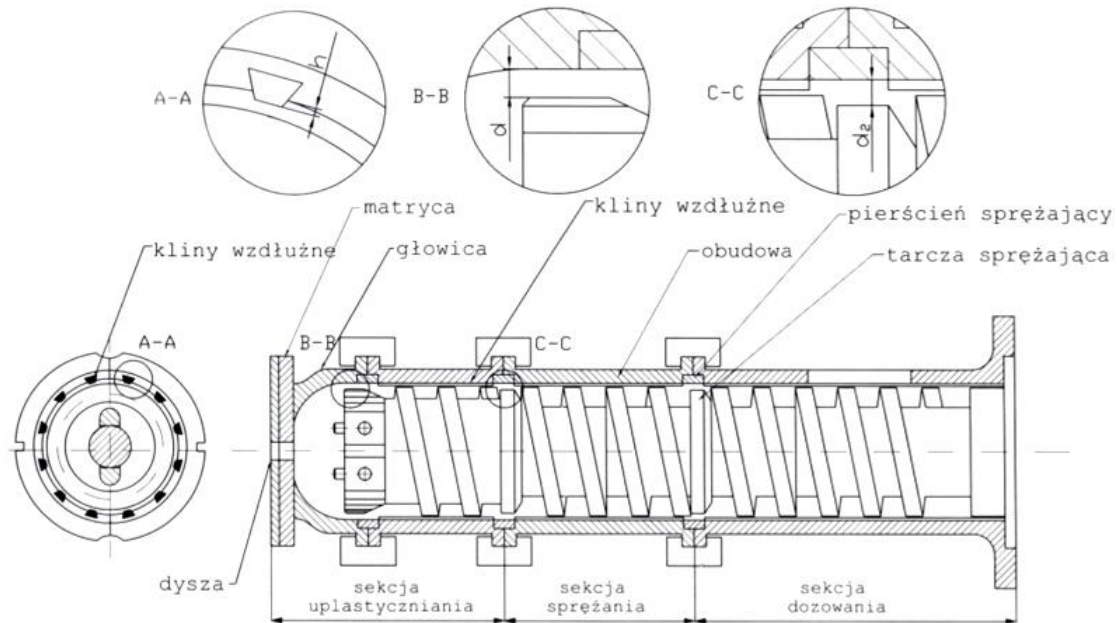
28

Lp.	Parametr	Wartość i jednostka
1.	Moc znamionowa silnika	22 kW
2.	Prędkość obrotowa ślimaka n	200÷500 obr·min ⁻¹
3.	Średnica otworu głowicy	5 mm
4.	Stosunek długości do średnicy ślimaka L/D	6:1
5.	Stopień sprężania s	1,5

29

30

31 Powierzchnia wewnętrzna cylindra ekstrudera posiada wzdłużne frezowania, w które
32 wsuwane są kliny wzdłużne o trapezoidalnym przekroju poprzecznym (rys.1).



Rys. 1. Schemat części roboczej ekstrudera KZM-2 [7]

Fig. 1. Diagram of the working part of the extruder KZM-2 [7]

Do akwizycji danych pomiarowych (ciśnienie w matrycy i obciążenie układu napędowego ekstrudera) wykorzystano zestaw National Instruments (karta pomiarowa – PCI-6024E, moduł NI SCXI-100 i NI SCXI-1302) oraz oprogramowanie LabView 7.1. Dane zapisywano z częstotliwością 10 Hz.

Kliny wystając ponad powierzchnię ścianki tworzą charakterystyczne bruzdy. Wysokość klinów wzdłużnych h (rys. 1, przekrój A-A) była różnicowana przez wymianę klinów na elementy pozwalające uzyskać zróżnicowanie tarcia o wewnętrznej powierzchni obudowy ekstrudera. Badania przeprowadzono dla trzech wysokości klinów roboczych ekstrudera: 4, 2 i 1 mm. Zmieniano także obciążenie ekstrudera poprzez zwiększenie masy podawanego surowca w czasie (z $50 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ na $80 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$) oraz prędkość obrotową ślimaka (z $200 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ na $300 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$).

Przy analizie danych wykorzystano analizę falkową CWT (ciągła transformata całkowa, ang. *continuous wavelet transform*), którą wykonano korzystając z algorytmu realizowanego na platformie Matlab. Analiza falkowa polega na dopasowaniu do przebiegu badanego sygnału $x(t)$ przebiegów falki podstawowej. Przekształcenie CWT opisano równaniem (1), [15]:

$$CWT_x^\psi(a, b) = W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

gdzie:

- a – skalowanie,
- b – przesunięcie,
- ψ – falka podstawowa.

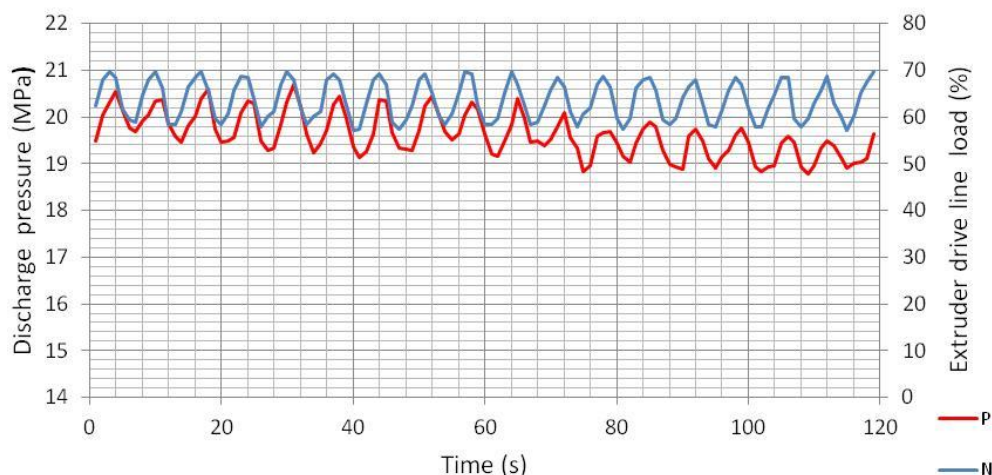
Efektem końcowym transformaty CWT jest otrzymanie wartości współczynników falkowych A , zależnymi od wartości skali a i przesunięcia b falki macierzystej. Wartość współczynnika A określa stopień dopasowania nakładanej na sygnał falki do przebiegu badanego sygnału. Większa jego wartość oznacza lepszy stopień dopasowania. Monitoring zmiany wartości współczynnika A w dziedzinie czasu i częstotliwości pozwala na obserwację niestandardowych częstotliwości pojawiających się podczas pracy urządzenia.

1 Wyniki badań przedstawiono na wykresach w formie skalogramów tj. map falkowych.
2 Ze względu na uproszczoną metodę generowania wykorzystano tutaj falkę Morlet.

3. Wyniki i dyskusja

6 Na rysunku 2 przedstawiono przebieg zmian wartości ciśnienia i obciążenia układu
7 napędowego przy zastosowaniu klinów o wysokości $h = 4$ mm (kliny nieużyte).

8 Obciążenie układu napędowego przedstawia wartość momentu obciążającego wał
9 ekstrudera w stosunku do wartości momentu powodującego rozłączenie napędu przez
10 sprzęgło przeciążeniowe.

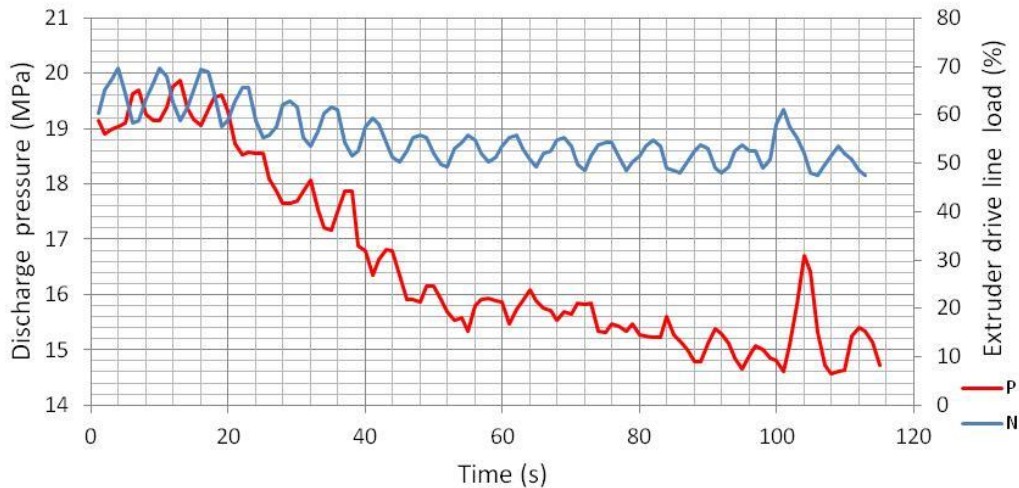


12
13
14 Rys. 2. Przebieg zmian wartości ciśnienia P i obciążenia układu napędowego ekstrudera N podczas pracy ze
15 stałą prędkością obrotową ślimaka $n = 200 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ i masowym natężeniem podawanego materiału $Q = 55 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$
16 ¹; wysokość –klinów wzdłużnych wewnątrz obudowy ekstrudera $h = 4$ mm

17 Fig 2. The course of changes in the pressure P and the load drive system extruder N during constant speed snail n
18 $= 200 \text{ rpm}$ and the intensity of the feedstock $Q = 55 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$; the height of the grooves inside the housing extruder
19 $h = 4 \text{ mm}$

20 Stwierdzono, że w tych warunkach zarówno wartości ciśnienia jak i obciążenie układu
21 napędowego maszyny mają stabilny przebieg. Ponadto przebieg obu wykresów jest podobny,
22 co oznacza, że jest to prawidłowy charakter pracy ekstrudera, który uzależniony jest zarówno
23 od cech konstrukcyjnych urządzenia jak i parametrów procesu wymienionych we wstępie.

24 Przy zastosowaniu cylindrów, których kliny były zużyte w 50% ($h = 2$ mm),
25 stwierdzono wyraźne różnice w przebiegu zmian wartości ciśnienia (rys. 3).



1

2 Rys. 3. Przebieg zmian wartości ciśnienia P i obciążenia układu napędowego ekstrudera N podczas pracy w
 3 stanie przejściowym tj. podczas zmiany prędkości obrotowej ślimaka z $200 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ na $300 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ i przy
 4 stałym masowym natężeniu podawanego materiału wynoszącym $Q = 55 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$; wysokość klinów wewnątrz
 5 obudowy ekstrudera $h = 2 \text{ mm}$

6 Fig. 3. Number of changes in the pressure P and the extruder drive system load N at which a transient state when
 7 changing the screw speed from 200 rpm to 300 rpm and at a constant flow of the feedstock ratio $Q = 55 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$;
 8 the amount of grooves within the housing of the extruder $h = 2 \text{ mm}$

9

10 Dlatego, w celu zmiany parametrów przepływu materiału wewnątrz maszyny,
 11 zwiększono prędkość obrotową ekstrudera. Podniesienie prędkości obrotowej ślimaka jest to
 12 typową reakcją operatora urządzenia, umożliwiającą wydłużenie czasu eksploatacyjnego
 13 ekstrudera. W przypadku produktów skrobiowych zbyt wysoka wysokość klinów (powyżej 4
 14 mm) jak i zbyt niska (poniżej 1 mm) są niekorzystne. Gdy profil klinów jest za wysoki ulega
 15 ona zaklejeniu przez materiał, z kolei przy zbyt niskim - występuje zbyt małe tarcie o
 16 transportowany materiał. Producent badanego modelu ekstrudera zaleca regenerację jego
 17 tulei lub wymianę klinów, jeżeli wysokość klinów jest mniejsza od 1 mm. Jednak w
 18 przypadku materiału o wysokiej wartości współczynnika tarcia o obudowę możliwa jest
 19 poprawna praca ekstrudera nawet przy niższym profilu klinów. Niestety w przypadku
 20 ekstruzji mieszanin surowców, często można to stwierdzić dopiero po uruchomieniu procesu.
 21 Doświadczony operator może określić stan takiego procesu i ocenić dalsze możliwości
 22 transportowe ekstrudera obserwując przebieg procesu. Można, zatem przypuszczać, że
 23 możliwe jest określenie aktualnego stanu systemu transportującego poprzez analizę
 24 częstotliwości drgań zmian wartości momentu obrotowego obciążającego wał napędzający
 25 ślimak transportujący.

26 Wyniki analizy falkowej obrazujące zmiany skali (CWT) w funkcji czasu i wartości
 27 okresu drgań przy różnych ustawieniach parametrów procesu ekstruzji zamieszczono na
 28 rysunkach 4 - 7. Wykresy przedstawiają wyniki analizy falkowej dla obciążenia układu
 29 napędowego ekstrudera N i zmian wartości ciśnienia P .

30

31

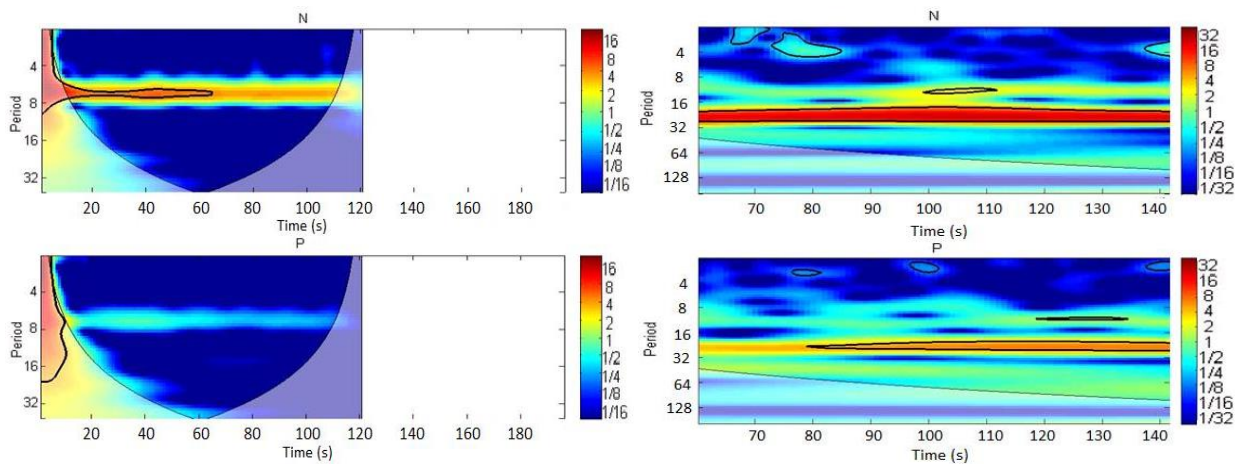
32

33

34

a)

b)

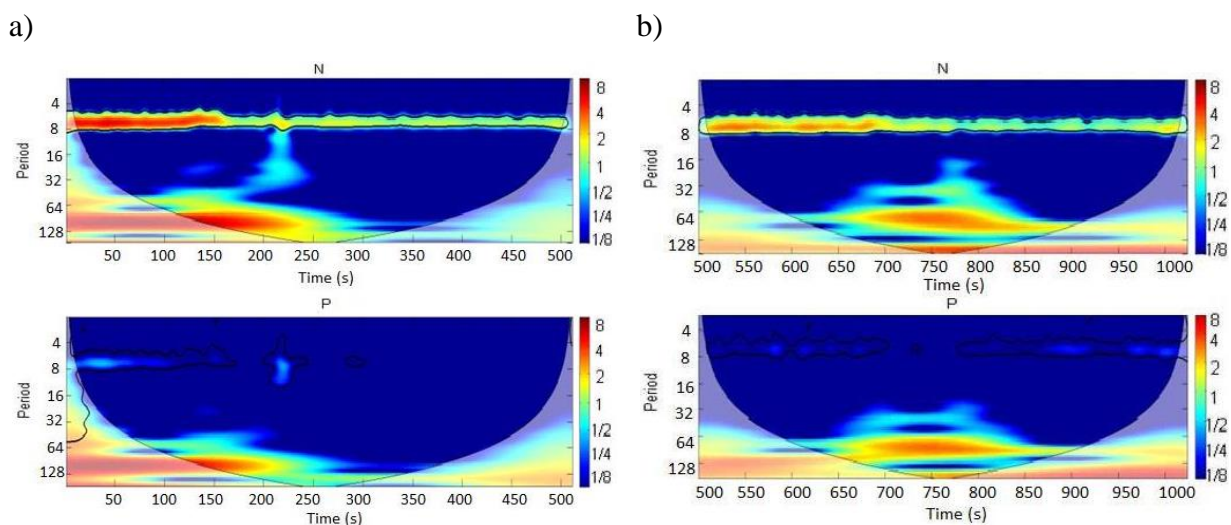


Rys. 4. Skalogram CWT. $h = 4$ mm, zmiana masowego natężenia przepływu ~~obciążenia~~ $50 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ do $80 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ podawanego materiału:
a) $200 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$, b) $300 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$

1 Fig. 4. Scaleogram CWT. $h = 4$ mm, change in a load of $50 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ to $80 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ feed material:
2 a) 200 rpm, b) 300 rpm

3 Analizując wykresy 4a i 4b stwierdzono, że zarówno dla przebiegów zmian
4 częstotliwości ciśnienia jak i obciążenia układu napędowego nie obserwowano częstotliwości
5 o długim okresie drgań. Zatem obserwowane drgania dotyczyły głównie zmian w zakresie
6 częstotliwości wysokich, które mogły stanowić również tzw. „szumy”. Zaobserwowano
7 również brak zmiany częstotliwości przy zmianie obciążenia. Na wykresie 4b ($n = 300$
8 $\text{obr}\cdot\text{min}^{-1}$) widmo częstotliwości przemieściło się w kierunku niższych wartości (dłuższy
9 okres). Przy tych ustawieniach ekstrudera stwierdzono, że zarówno zmiana obciążenia układu
10 napędowego ekstrudera, wynikająca ze zmiany masowego natężenia podawanego do
11 ekstrudera surowca, jak i zmiana prędkości obrotowej nie wpływała negatywnie na przebieg
12 procesu ekstruzji. Taki przebieg zmian ciśnienia potwierdza prawidłowość prowadzenia
13 procesu.

14 Zastosowanie cylindrów z klinami zużyтыми w 50% ($h = 2$ mm) spowodowały
15 znaczące zmiany w przebiegu wykresów falkowych (rys. 5a i 5b).
16



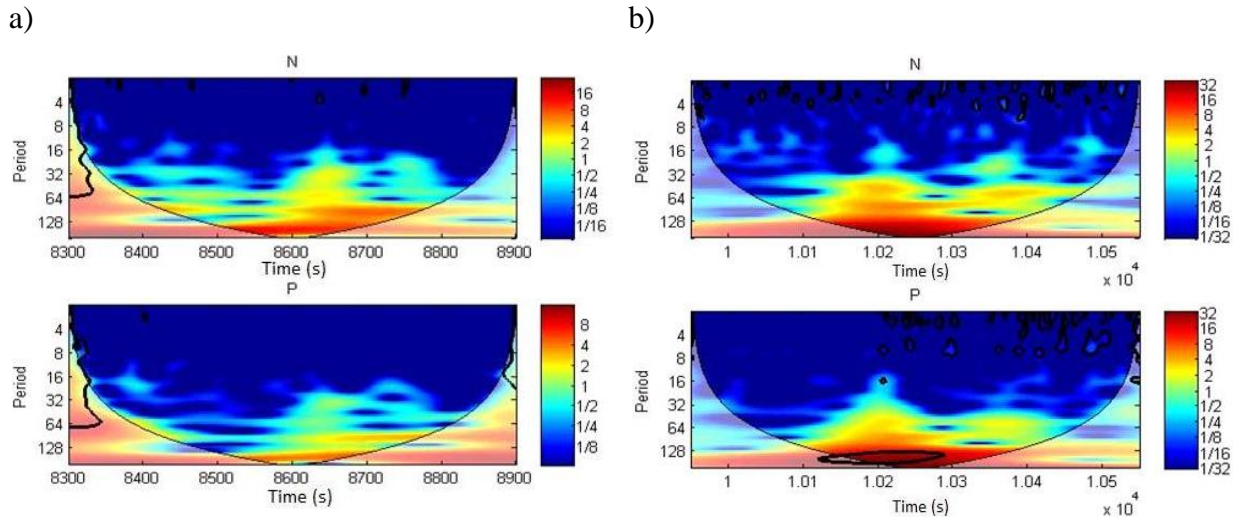
Rys. 5. Skalogram CWT. $h = 2$ mm, zmiana masowego natężenia przepływu ~~obciążenia~~ $50 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ do $80 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ podawanego materiału:
a) $200 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$, b) $300 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$

Fig. 5. Scaleogram CWT. $h = 2$ mm, change in a load of $50 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ to $80 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ feed material:
a) 200 rpm, b) 300 rpm

1
2
3
4
5
6
7
8
9

W dolnej części wykresu można zaobserwować okres drgań wynoszący ok. 64 s, który występuje przy masowym natężeniu przepływu surowca $55 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$. Zwiększenie masowego natężenia przepływu do $80 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ powoduje zanik tych częstotliwości. Taki przebieg zmian obserwowano dla zmian częstotliwościowych P i N przy dwóch prędkościach ślimaka ekstrudera.

Przy zastosowaniu cylindrów ekstrudera z klinami o wysokości 1 mm stwierdzono, że drgania krótkookresowe zanikły (rys. 6a i 6b).



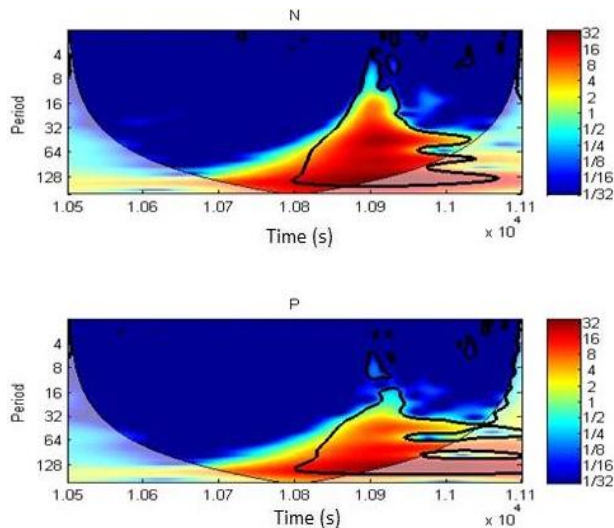
Rys. 6. Skalogram CWT. $h = 1$ mm, zmiana masowego natężenia przepływu $50 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ do $80 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ podawanego materiału:
a) 200 obr·min⁻¹, b) 300 obr·min⁻¹

10
11
12
13
14
15
16
17
18
19

Fig. 6 Scaleogram CWT. $h = 1$ mm, change in a load of $50 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ to $80 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ feed material:
a) 200 rpm, b) 300 rpm

W obserwowanym przypadku widmo o wysokiej korelacji z badanymi falkami, można wyraźnie zaobserwować w zakresie drgań długookresowych wynoszących około 120 s. Podniesienie prędkości obrotowej wału napędowego ślimaka powoduje zwiększenie stopnia dopasowania widma do przebiegu falki podstawowej. Podobnie jak na wykresach powyżej zmiany wartości P oraz N mają podobne przebiegi.

W celu zasymulowania większego stopnia zużycia klinów roboczych cylindra ekstrudera, w punkcie oznaczonym jako 1.07 (rys. 7), dodano 2% tłuszczu roślinnego.



Rys. 7. Skalogram CWT. $h = 1$ mm, masowe natężenie przepływu $80 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ podawanego materiału, $300 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$

Fig. 7. Scaleogram CWT. $h = 1$ mm, load of $80 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ feed material, 300 rpm

1
2
3
4
5
6
7

Na wykresie można zaobserwować wyraźne widmo zmian częstotliwościowych w zakresie drgań długookresowych, związane z zanikiem właściwości transportowych ekstrudera. Taki przebieg zmian sugeruje, że w przypadku dalszego zużywania się klinów roboczych ekstrudera możliwe będzie obserwowanie bardziej wyraźnych zmian częstotliwościowych procesu.

8 4. Wnioski

9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Analiza falkowa może być skutecznym narzędziem oceny stopnia zużycia elementów roboczych ekstrudera (klinów roboczych).
2. Na podstawie obserwacji zmian częstotliwości rezonansowych można oszacować stopień zużycia elementów ciernych w ekstruderze jednoślindakowym.
3. Wraz ze zmniejszeniem się wysokości klinów roboczych, zmniejsza się częstotliwość rezonansowa. Przy wysokości klinów wynoszącej 2 mm w widmie drgań pojawiają się drgania o okresie 64 s. Drgania zmniejszają swoją intensywność zanikając w przypadku dalszego zużywania klinów. W przypadku krytycznego ($h=1\text{mm}$) zużycia elementów ciernych okres drgań przekraczał 64 s z tendencją do dalszego wzrostu do ok. 128 sekund (rys. 6). Szczególnie dobre dopasowanie falki macierzystej o okresie od 64 do 126 s, miało miejsce w czasie długotrwałej pracy ze znacznym obciążeniem (rys. 7). Typowa zmierzona wartość okresu drgań dopasowanej falki podstawowej, dla elementów nowych nie przekraczała 8-12 s.

27 Literatura

28

- 1 1. Abu-Zahra, N. H., & Seth, A. In-process density control of extruded foam PVC using
2 wavelet packet analysis of ultrasound waves. *Mechatronics* 2002; 12(9), 1083-1095.
- 3 2. Balazs, P., Bayer, D., Jaillet, F., & Søndergaard, P. The pole behavior of the phase
4 derivative of the short-time Fourier transform. *Applied and Computational Harmonic*
5 *Analysis* 2016; 40(3): 610-621.
- 6 3. Bouzaza, D., Arhaliass, A., & Bouvier, J. M. Die design and dough expansion in low
7 moisture extrusion-cooking process. *Journal of Food Engineering* 1996; 29(2): 139-
8 152.
- 9 4. Burdzik, R. Implementation of multidimensional identification of signal
10 characteristics in the analysis of vibration properties of an automotive vehicle's floor
11 panel. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014; 16 (3): 458–
12 464.
- 13 5. Cremer, D. R., & Kaletunç, G. Fourier transform infrared microspectroscopic study of
14 the chemical microstructure of corn and oat flour-based extrudates. *Carbohydrate*
15 *Polymers* 2003; 52(1): 53-65.
- 16 6. Ding, Y., He, W., Chen, B., Zi, Y., & Selesnick, I. W. Detection of faults in rotating
17 machinery using periodic time-frequency sparsity. *Journal of Sound and Vibration*
18 2016; 382: 357-378.
- 19 7. Ekielski, A., & Majewski, Z. Effect of dimension of selected elements of the single
20 screw extruder on energy consumption in the maize grit extrusion process. *Materiały*
21 *IX Międz. Kongr. Mech. I Energii w Roln.* 2005: 27-29.
- 22 8. Ekielski, A., & Osiak, J. Wpływ stopnia zużycia elementów ekstrudera na wybrane
23 parametry ekstruzji. *Inżynieria Rolnicza* 2003; 7(49): 39-46.
- 24 9. Gabor, D. Theory of communication, *Journal IEE* 1947; Vol.93: 429-457.
- 25 10. Janssen, L. P. B. M., Moscicki, L., & Mitrus, M. Energy aspects in food extrusion-
26 cooking. *International Agrophysics* 2002; 16(3): 191-196.
- 27 11. Kaito, A., Kyotani, M., & Nakayama, K. Applications of fourier transform infrared
28 microspectroscopy to the analysis of microscopic orientation in liquid crystalline
29 polymer sheets. *Polymer* 1992; 33(13): 2672-2678.
- 30 12. Pérez, A. A., Drago, S. R., Carrara, C. R., De Greef, D. M., Torres, R. L., & González,
31 R. J. Extrusion cooking of a maize/soybean mixture: Factors affecting expanded
32 product characteristics and flour dispersion viscosity. *Journal of Food Engineering*
33 2008; 87(3): 333-340.
- 34 13. Storath, M., Demaret, L., & Massopust, P. Signal analysis based on complex wavelet
35 signs. *Applied and Computational Harmonic Analysis* 2015.
- 36 14. Thewessen, A., Moraru, C. I., & Kokini, J. L. Effects of fats with different melting
37 points on starch extrudate expansion and comparison with microwave expansion. In
38 *IFT Annual Meeting Book of Abstracts* 2002; 15-19.

1 15. Wrana, B., & Czado, B. Zastosowanie transformaty falkowej do określenia defektów
2 pali. *Górnictwo i Geoinżynieria* 2010; 34: 647-653.

3
4 **The use of wavelet analysis to assess the degree of wear of working elements**
5 **of food extruders**

6 **Keywords:** *wavelet analysis, STFT, scaleogram CWT, extrusion, extruder barrel*

7 **Summary:** The work presents evaluation of the wear and tear of working elements as barrel grooves
8 in the single screw extruder on the basis of the observation of the frequency components of the
9 spectrum load powertrain extruder and the pressure in the matrix using wavelet analysis tools. Tests
10 were conducted at three levels of consumption of the working grooves 4, 2 and 1 mm. During the
11 experiment varied load and extruder screw speed. It was found that on the basis of observation of the
12 resonance frequencies can estimate the degree of wear of the friction elements in a single screw
13 extruder. In addition, it was observed that wavelet analysis can be an effective tool for assessing the
14 degree of wear of working elements of the extruder.

15
16
17 *Adres do korespondencji - Corresponding Address*

18 *Adam Ekielski, Katedra Organizacji i Inżynierii Produkcji. Wydział Inżynierii Produkcji, Szkoła*

19 *Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, 02-787 Warszawa, ul Nowoursynowska 164, Poland,*

20 *e-mail: adam_ekielski@sggw.pl*

21