

## MOŻLIWOŚCI ANALIZY WIBROAKUSTYCZNEJ I BADAŃ DIAGNOSTYCZNYCH SYSTEMU PRZEPLYWOWEGO ZAWORÓW HOMOGENIZUJĄCYCH

Krzysztof ŁUKASIK

Wydział Mechaniczny, Katedra Obróbki Plastycznej  
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36, fax (81) 5381241

### Streszczenie

W pracy przedstawiono wstępne wyniki badań wibroakustycznych systemu zaworu homogenizatora wysokociśnieniowego. Badania dotyczyły słyszalnego widma akustycznego i miały na celu rozpoznania jego charakterystyk wibracyjnych, oraz ich zmian w zależności od technologicznych parametrów jego pracy. Obserwowano także ich wpływ na powstawanie i rozwój zjawisk szkodliwych dla jego trwałości i skuteczność pracy.

Słowa kluczowe: diagnostyka, zawory homogenizujące, analiza wibroakustyczna.

### A POSSIBILITY OF VIBRATION ANALYSIS AND DIAGNOSTIC INVESTIGATION OF HOMOGENIZING VALVES FLOW SYSTEM

#### Summary

The results of vibration analysis of high pressure homogenizing valve are presented in this paper. The investigations were focused on hearing spectrum of noise and were aimed at both recognizing their vibration characteristics and the changes dependent on the technological parameters of the homogenizing valve's work. The influence of these parameters on the development of the process harmful for the durability and effectiveness of the valve's work were also observed.

Keywords: diagnostic, homogenizing valves, vibration analysis.

## 1. WPROWADZENIE

Analiza wibroakustyczna od kilkunastu lat stosowana jest w procesach monitorowania i diagnozowania stanu urządzeń technicznych [1,2,4]. Rozwój technik komputerowych tak sprzętowych jak i programowych oraz dostępność doskonalszych przetworników drgań (przyspieszeń) sprawia, że metody wibroakustyczne niejednokrotnie stanowią ich integralną część [2,5]. Jednakże prawidłowe interpretowanie akustycznego obrazu badanego obiektu wymaga przeprowadzenia wielu żmudnych badań. W ich efekcie możliwe jest wyłowienie ze stochastycznej przestrzeni szumowej składników sygnału o największej zawartości informacji diagnostycznej [4,7]. Pomimo istnienia wielu opracowań dotyczących technik pobierania próbek sygnału w przypadku konkretnego urządzenia niemal zawsze konieczna jest wstępna ocena doświadczalna. Jest ona konieczna między innymi ze względu na konieczność wyboru odpowiedniego miejsca pobierania sygnału. W przypadku urządzeń przepływowych mamy do czynienia ze specyficzną sytuacją wynikającą z uczestnictwa ciekłego medium w przekazywaniu ruchów falowych [5].

Różnorodność sygnałów wibracyjnych towarzyszących przepływowi czynnika ciekłego i różnice w ich propagacji w środowisku ciekłym i w tworzywie konstrukcyjnym (najczęściej metalowym) stanowią o specyfice tych urządzeń. Z tej przyczyny badanie wibroakustyczne maszyn przepływowych wymaga w wielu przypadkach przeprowadzenia obszernych badań wstępnych. Przykładem są badania przeprowadzone na stosowanym w przemyśle spożywczym homogenizatorze wysokociśnieniowym.

## 2. KONSTRUKCJA URZĄDZENIA

Homogenizator ciśnieniowy jest urządzeniem hydromechanicznym o działaniu celowym. Polega ono na rozdrabnianiu ciekłej lub stałej fazy rozproszonej znajdującej się w przetwarzanych ciekłych układach niejednorodnych. Jego schemat przedstawiono na rys.1. Głównymi elementami roboczymi homogenizatora wysokociśnieniowego, jest wielonurnikowa (3-8) pompa wysokiego ciśnienia i głowica homogenizująca. Jej głównymi elementami są: specjalnego rodzaju zawór homogenizujący rys.2. pracujący przy ograniczonym uchyleniu grzybka i układ sterujący którego zadaniem jest nastawienie i utrzymywanie zadanego

ciśnienia roboczego. Praca głowicy w największym stopniu wpływa na efektywność procesu homogenizacji. Stosowane w praktyce układy sterowania wykorzystują najczęściej hydrauliczne, pneumatyczne i mechaniczne (sprężynowe) elementy regulacyjne. Rozwiązania bazujące na mechanicznym sterowaniu są najbardziej podatne na uszkodzenia, charakteryzują się dużą zmiennością właściwości regulacyjnych. Niejednokrotnie ich charakterystyka podczas pracy staje się nieliniowa, co jest wynikiem zmiany kształtu sprężyn

talerzowych. Ta niekorzystna cecha z badawczego punktu widzenia prowadzi do zwiększenia ilości trudnych do interpretacji informacji doświadczalnych.

Na rys.5 przedstawiono wycinki widma szumowego urządzenia (CHO-50) zarejestrowanego podczas homogenizacji soku owocowo-warzywnego z użyciem nowego stożkowego zaworu homogenizującego o konstrukcji przedstawionej na rys.2. sterowanego mechanicznie, którego częstotliwość drgań własnych wynosiła ok. 1,6 kHz.



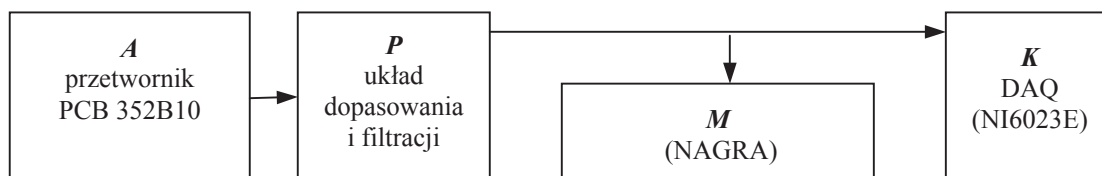
Rys.1 Schemat homogenizatora ciśnieniowego gdzie: PU – pompa, ZH – zawór homogenizujący [5]

### 3. METODA I CHARAKTERYSTYKA BADAŃ

Podczas badań homogenizatora ciśnieniowego wykorzystano stanowisko pomiarowe przedstawione na rys.3. Podstawowymi elementami jest przetwornik przyspieszeń z układem dopasowującym oraz rejestrator. Stosowano system komputerowy z kartą pomiarową DAQ (NI6023E). Dodatkowo rejestrowano sygnał analogowy za pomocą magnetofonu NAGRA3 przy prędkości przesuwu taśmy  $10'' \text{ s}^{-1}$ . Okres próbkowania  $T_o \approx 2,08 \cdot 10^{-5} \text{ s}$  i czas pobrania sygnału  $T = 0,66 \text{ s}$  dla całkowitej liczby próbek  $N=32768$ . Częstotliwość periodyzacji widma  $f_c \approx 48 \text{ kHz}$  stąd  $f_{Nyq} = 24 \text{ kHz}$  i  $f_T \approx 1,5 \text{ Hz}$ .



Rys.2. Szkic stożkowego zaworu homogenizującego w układzie rozsuniętym



Rys. 3. Schemat układu do rejestracji drgań grzybka zaworu homogenizującego

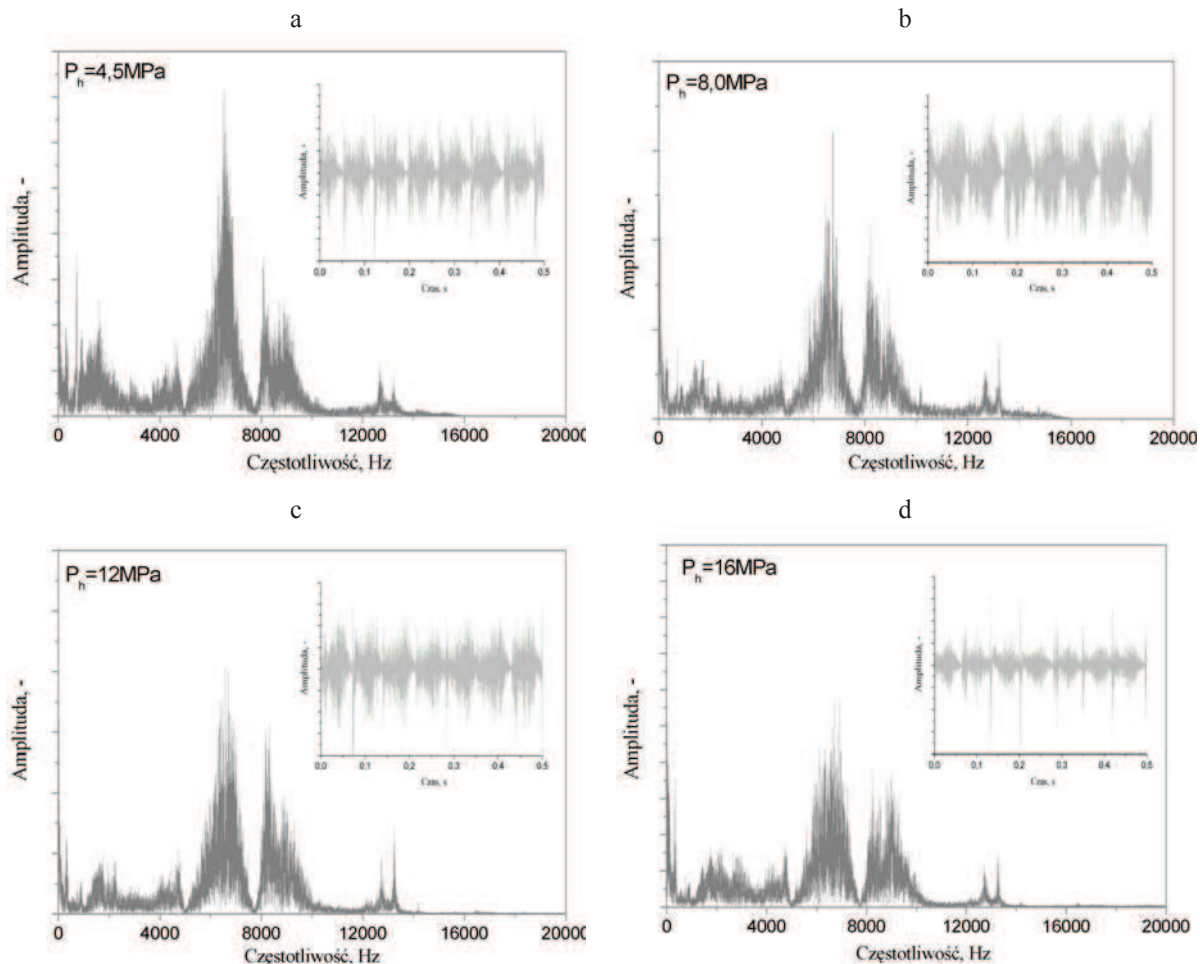
Po wstępnym porównaniu przepuszczonego przez filtry antyaliasingowe widma sygnału dalsze badania przeprowadzono dla pasma  $f \in (0, 16000) \text{ Hz}$ . Powyżej częstotliwości granicznej  $f_g = 16000 \text{ Hz}$  nie dostrzeżono istotnych zmian intensywności sygnału akustycznego  $W$  w zależności od celu i charakteru badań w celu zwiększenia ich wiarygodności konieczne jest zawężenie pasm pomiarowych do

niezbędnego zakresu wybranego z rejestrowanego pasma pod względem użyteczności diagnostycznej.

Z uwagi na ogólny charakter badań wynikający z przyjętych założeń wykorzystano niemal całe dostępne pasmo na jakie pozwalała stosowana aparatura, licząc się z ewentualną koniecznością powtórzenia określonych analiz. Na tym etapie nie odrzucano tych zakresów widma które nie zawierały

informacji użytecznych. Jako zabezpieczenie umożliwiające powrót do sygnału źródłowego niezakłóconego przetwarzaniem cyfrowym była rejestracja analogowa na taśmie magnetycznej. Rejestrację drgań przeprowadzono dla kierunku wzdłuż osi grzybka (SDOF) z wykorzystaniem specjalnego oprzyrządowania. Akcelerometr

mocowano za pomocą wosku pszczelego. Pomimo uprzywilejowania strukturalnego kierunku rejestracji widmo szumowe zawiera znaczną ilość składowych drgań z innych kierunków transformowanych strukturalnie na kierunek rejestracji i pochodzących od innych elementów konstrukcyjnych jak np. silnik, przekładnia napędowa.



Rys.4. Wibroakustyczne widmo Fouriera pracy homogenizatora wysokiego ciśnienia przy różnych ciśnieniach roboczych. W górnym rogu każdego wykresu pokazano wycinek sygnału nieprzetworzonego

#### 4. OBRÓBKA SYGNAŁU

Charakterystyczną cechą rejestrowanego ciągu drgań przedstawionego na rys.1 jest periodyczność zmiany intensywności drgań z okresem  $1/3\tau \approx 0,068 \text{ s}$  co odpowiada okresowi zmian ciśnienia wytwarzanego przez trójnurnikową pompę pracującą z prędkością obrotową  $\omega \approx 30,8 \text{ rad s}^{-1}$ . Warunki pracy pompy oraz specyfika konstrukcji homogenizatora sprawiają, że urządzenie to z wibroakustycznego punktu widzenia charakteryzuje się szerokim spektrum dźwięków. Ich intensywność i charakterystyka zależą od parametrów pracy, stanu technicznego i specyfiki konstrukcji. Każdy z wymienionych czynników w odmienny sposób wpływa na charakterystykę wibroakustyczną. Zarejestrowany sygnał poddano przetworzeniu za pomocą szybkiej transformaty Fouriera FFT przy

wykorzystaniu metody Hamminga [5,7]. Wykorzystywano w tym celu narzędzia oferowane przez pakiet Labview firmy National Instruments. Otrzymany rozkład spektralny rys.4 charakteryzuje się szeregiem zakresów częstotliwości w których występują wyraźne zmiany natężenia drgań. Związane są one z charakterystycznymi zjawiskami towarzyszącymi pracy zaworu homogenizującego. Na kolejnych rysunkach rys.4 przedstawiono zmianę widma częstotliwościowego w zależności od ciśnienia homogenizacji, które jest głównym parametrem technologicznym procesu. Widoczne zmiany w widmie Fouriera nie pozwalają na jednoznaczną interpretację zmian zachodzących w zaworze. Dają jednak podstawę do zawiązania obszaru badań. Przejście do szczegółowej analizy modalnej wymaga określenia zależności pomiędzy sygnałem wibroakustycznym, a funkcją gęstości

prawdopodobieństwa odpowiadającej identyfikowanemu procesowi. Na obecnym etapie zależności tych w pełni nie ustalano. Ograniczono badania do identyfikacji określonych zjawisk i zawężenia zakresu częstotliwości drgań związanych z nimi.

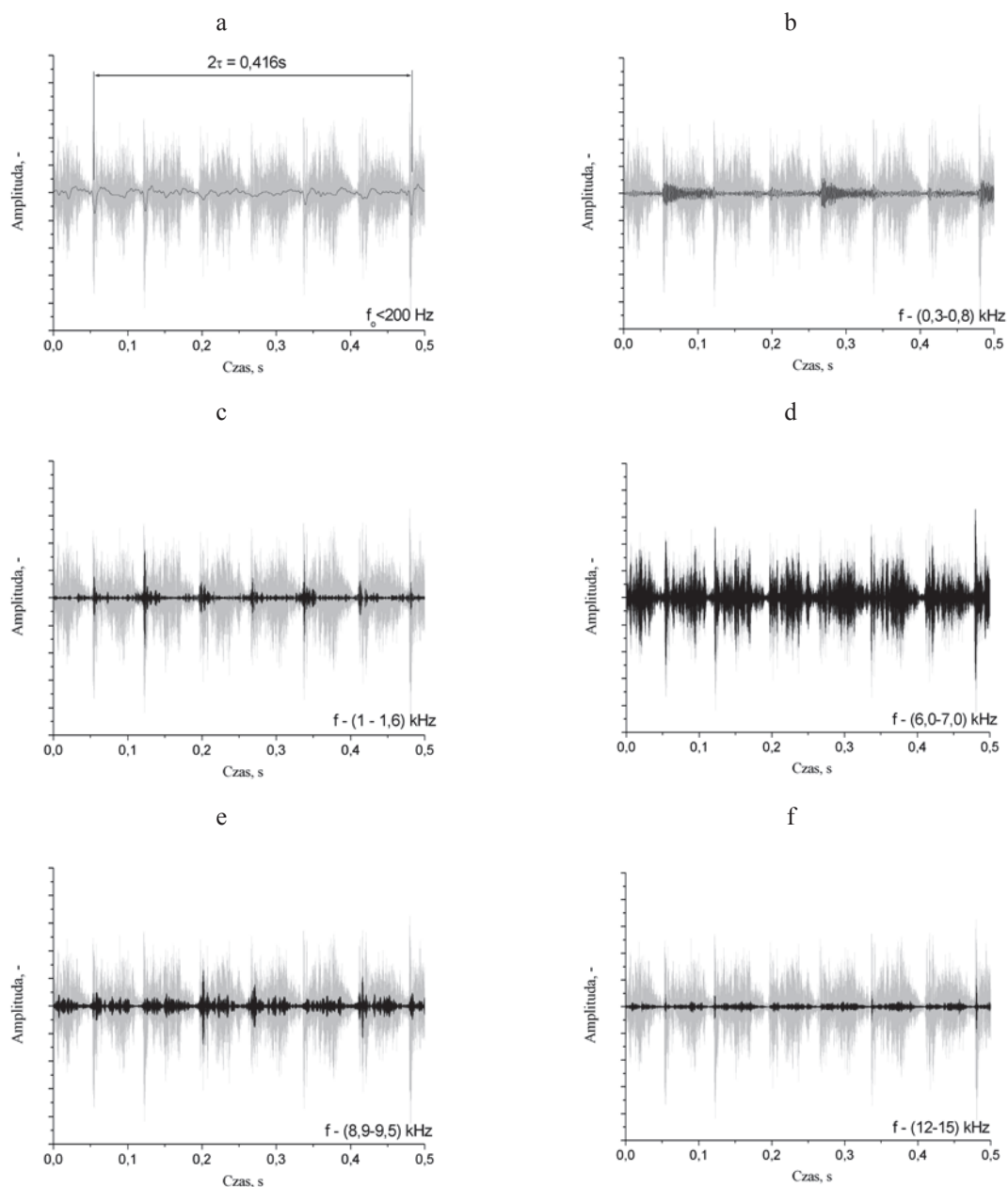
## 5. ANALIZA SYGNAŁU

Przykładowe wyniki przedstawiono na rys.5 w układzie czasowo-amplitudowym, co umożliwia chronologiczną obserwację zmiany ich intensywności. Przykładowymi zjawiskami, których przebieg zilustrowano są:

- pulsacje ciśnienia homogenizacji rys.5a,
- drgania grzybków zaworów rozdzielających pompy (widoczny efekt nienormalnej pracy jednego z zaworów) rys.5b,

- drgania grzybka zaworu głównego o częstotliwości  $f \approx 1,0-1,6$  kHz rys.5c,
- drgania wywołane uderzeniem strumienia cieczy o ścianki kanału odpływowego po wyjściu ze szczeliny zaworu rys.5d,
- drgania pochodzące od lokalnych zjawisk kawitacji obejmujących głównie kawitację w miejscu kontrakcji w początkowej strefie szczeliny zaworu, i kawitację dyfuzorową w jej dalszej części rys.5e, f.

Charakterystyczną cechą pracy zaworu ze sterowaniem mechanicznym jest wyraźna cykliczność jego pracy z widocznymi momentami niemal całkowitego zaniku drgań wywołanego



Rys.5. Porównanie składowych widma Fouriera na tle sygnału oryginalnego dla  $P_i=4,5$ MPa

prawie całkowitym zamknięciem przepływu. Momenty te poprzedzają fazę gwałtownego otwarcia zaworu, czemu towarzyszą drganie grzybka pobudzonego udarem hydraulicznym.

Mają one charakter gasnący i w krótkim czasie ich intensywność maleje. Widoczne na rys.4c różnice kształtu obwiedni drgań związane są z różnicą w charakterze pobudzenia, a zależnego od chwilowych parametrów zmiany ciśnienia dostarczanego przez pompę, stanu układu jego regulacji. Są one także wynikiem pracy układu rozdzielczego pompy, który w badanym przypadku wykazywał określone niedomagania przejawiające się ciągłymi drganiami jednego z zaworów w całym okresie jego uniesienia. W niektórych przypadkach prowadzą one do kawitacji wibracyjnej. Przenosząc się przez ośrodek ciągły są przyczyną zmiany intensywności lokalnych zjawisk kawitacji przy wejściu do szczeliny zaworu homogenizującego i w dalszej dyfuzorowej jego części. Czynnikiem ten jest często niedoceniany, a jak dowodzą prace [7,8] już drgania o niewielkiej amplitudzie i chwilowych przyspieszeniach rzędu 20g prowadzą do znacznego obniżenia trwałości elementów silników spalinowych. Wahania wysokości szczeliny zaworu wywołane drganiami prowadzą do zmiany natężeniem przepływu i intensywności szumu powstającego przy uderzaniu płynu o ścianki kanału odpływowego. Procesowi temu odpowiadają drgania w zakresie częstotliwości  $f \sim 6,0-7,0$ .kHz. Kropki oznaczają brak ostrości granic. Obwiednia drgań posiada maksima w pobliżu środka odcinka pomiędzy kolejnymi fazami pulsacji ciśnienia będące rezultatem nasilenia przepływu. Zwiększony wydatek czynnika obserwuje się także w trakcie nasilonych drgań grzybka opisanych wyżej. Drgania wywołane zjawiskiem kawitacji, a ściślej pulsacjami kawern kawitacyjnych stwierdzono w obszarze częstotliwości  $f \sim 8-9$ .kHz i  $\sim 12-14$ .kHz. Potwierdzeniem ich związku ze zjawiskami kawitacji były dodatkowe badania identyfikacyjne. Drgania te zależą w głównej mierze od warunków hydrodynamicznych (przepływowych). Wykazują znaczną zmienność w zależności od zmian parametrów przepływu wywołanych drganiami grzybka zaworu. Rozwój procesu kawitacji w systemie zaworu zależy także od temperatury, ciśnienia, prędkości przepływu. Obserwowany wówczas obraz widma akustycznego w zakresie związanym ze zjawiskiem kawitacji wykazuje większe zmiany niż w zakresach częstotliwości drgań odpowiadających innym zjawiskom występującym podczas jego pracy.

## 6. PODSUMOWANIE

Prezentowany wycinek wibroakustycznych badań pracy homogenizatora wysokiego ciśnienia potwierdza korzyści wykorzystania tej metody w procesach diagnostycznych i badawczych maszyn

przepływowych. Szczególną jej zaletą jest brak ingerencji w strukturę obiektu. Jednocześnie daje ona możliwość kompleksowej oceny stanu elementów konstrukcyjnych i ich charakterystyk dynamicznych w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Rejestrowane zmiany widma akustycznego pozwalają na badanie wpływu parametrów przepływowych związanych z ruchami grzybka zaworu na przebieg i intensywność określonych procesów w systemie zaworu. W szczególności dotyczy to badania warunków powstawania i rozwoju zjawisk kawitacyjnych/Zebrany materiał doświadczały dostarczył wielu informacji na temat przebiegu zjawisk w urządzeniach stosowanych do homogenizacji ciśnieniowej. Dotychczas tego rodzaju urządzenia nie były badane technikami wibroakustycznymi.

## 7. LITERATURA

- [1] Cempel Cz.: Wibroakustyka stosowana. PWN Warszawa 1989, s. 278.
- [2] Cempel Cz.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. PWN Warszawa 1989, s. 296.
- [3] Ivančenko N. N.; Skurigin A. A.; Nikitin M. D.: Kawitacjonnyje razrušenija w dzieliach. Mašinostrojenije Leningrad 1984. s. 278.
- [4] Jaworski J.: Drganieowe badania diagnostyczne w przemyśle zbożowo-młynarskim, Eksploatacja Maszyn, 1985, nr 5-6
- [5] Kurowski W.: Dyskretne widmo Fouriera w diagnostyce wibroakustycznej. DWiPPB Białystok 1997, s. 186.
- [6] Łukasik K., Fijałkowski S.: Preliminary identification of ageing processes in homogenising valves in the aspect of healthy food production. Part II – investigations on destructive influences in the valve system. AMPT Gimares 1997 s. 649-655
- [7] Norton M. P.: Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers. CUP Cambridge 1989, s. 619
- [8] Pilipienko V.V.: Kawitacionnyje avtokolebanija. Naukova Dumka. Kiev, 1989. s. 234.



Dr inż. **Krzysztof Łukasik** jest pracownikiem Politechniki Lubelskiej. W swojej pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami zużycia narzędzi i oprzyrządowania, oraz wykorzystaniem technik komputerowych do detekcji i modelowania