

DOKŁADNOŚĆ PRZYBLIŻONEJ ANALIZY DRGAŃ MASZYN W STANACH NIESTACJONARNYCH

Piotr KRZYWORZEKA*, Witold CIOCH*, Ernest JAMRO**

* Katedra Mechaniki i Wibroakustyki, ** Katedra Elektroniki

Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: cioch@agh.edu.pl

Streszczenie

Referat przedstawia wyniki zastosowania implementacji Procedury Liniowej Decymacji (PLD) zrealizowanej na Programowalnym Urządzeniu Diagnostycznym (PUD). Wykonane przez autorów urządzenie diagnostyczne miało na celu poszerzenie możliwości praktycznego wykorzystania metody. Zwiększenie nadpróbkowania do 10 MS/s i sprzętowa realizacja procedury PLD pozwoliły na wielokrotny wzrost współczynnika decymacji Dc (do 1000) oraz analizę sygnałów w pasmach wysokich częstotliwości (np. zazębienia). Wpływ dynamiki zmian cyklu referencyjnego na selektywność widmową przedstawiono w wynikach.

Słowa kluczowe: diagnostyka, synchronizm, dokładność, decymacja.

ACCURACY OF MACHINE VIBRATIONS APPROXIMATED ANALYSIS IN NON-STATIONARY STATES

Summary

This paper presents practical implementation of Linear Decimation Procedure (LDP) employing the Programmable Unit for Diagnostic (PUD). The PUD device, designed and developed by the research authors, has extended abilities in order to improve the LDP results. Increased sampling rate (up to 10MS/s) and hardware implementation of the LDP allowed to increase decimation rate DC significantly (up to 1000) and to analyze signal frequency (e.g. gear meshing). Influence of dynamics of reference-cycle change on spectrum selectivity is showed in the experiment practical results.

Keywords: diagnostics, synchronism, accuracy, decimation.

1. WPROWADZENIE

Opracowana przez autorów oryginalna metoda, Procedura Liniowej Decymacji PLD [5] służy do przetwarzania sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych w zmiennych warunkach pracy. Umożliwia ona ich konwersję do postaci odpowiadającej stanom stacjonarnym. Metoda polega na przepróbkowaniu znacznie nadpróbkowanego sygnału ze zmiennym krokiem odpowiadającym zmianom cyklu roboczego. Inaczej mówiąc jest to usuwanie pakietu próbek proporcjonalnych do przyrostu cyklu, a pozostawianie stałej liczby próbek na cykl.

W metodzie zakłada się liniową zmianę trendu cyklu podstawowego w oknie obserwacji. Zasadę działania PLD – proces otrzymywania wektora wtórnego sygnału z wektora pierwotnego nadpróbkowanego przedstawiono na rys. 1.

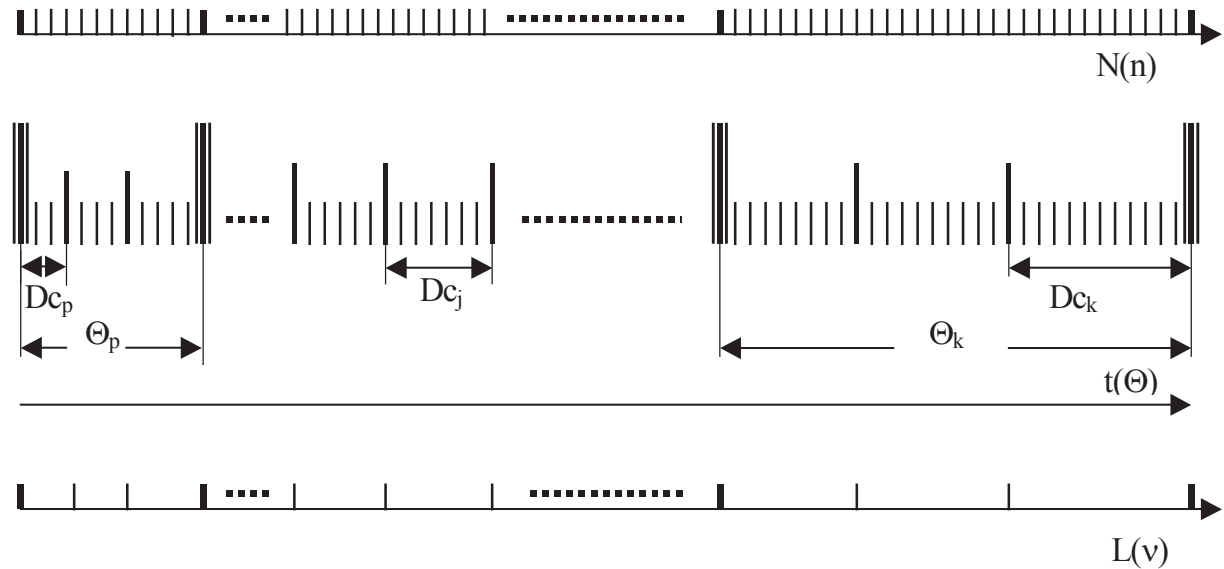
Krok z jakim przepróbkowywany jest sygnał pierwotny określa zmienny współczynnik decymacji Dc . Wyznaczanie współczynnika odbywa się wg wzoru (1). Wyprowadzenie zamieszczone w pracy [1].

$$Dc_n = Dc_k \left(\frac{N_{\Theta p}}{N_{\Theta k}} + \frac{n}{n_{Dk}} \left(1 - \frac{N_{\Theta p}}{N_{\Theta k}} \right) \right) \quad (1)$$

gdzie:

- Dc_n – współczynnik decymacji odpowiadający n -tej próbce wektora pierwotnego,
- Dc_k – końcowy współczynnik decymacji,
- $N_{\Theta p}$ – ilość próbek początkowego cyklu okna obserwacji,
- $N_{\Theta k}$ – ilość próbek końcowego cyklu okna obserwacji,
- n – numer próbki wektora pierwotnego
- n_{Dk} – numer próbki umożliwiający zakończenie PLD w zakresie wektora pierwotnego

Więcej informacji na temat metody i jej implementacji można znaleźć w pracach [2, 8].



Rys. 1. Procedura Liniowej Decymacji: Θ - czas cyklu, $t(\Theta)$ - czas obserwacji, $N(n)$ - pierwotny zbiór próbek w oknie obserwacji, $L(v)$ - wtórny zbiór próbek w oknie obserwacji (po PLD), Dc_p - początkowy współczynnik decymacji, Dc_k - końcowy współczynnik decymacji

2. PROGRAMOWALNE URZĄDZENIE DIAGNOSTYCZNE (PUD)

W celu sprzętowej realizacji implementacji PLD zaprojektowano i wykonano Programowalne Urządzenie Diagnostyczne (PUD) [6]. Wykorzystane w nim przetworniki analogowo-cyfrowe umożliwiły rejestrację sygnałów z częstotliwością próbkowania 10 MS/s na czterech

kanałach pomiarowych. Pozwoliło to na analizę sygnałów niestacjonarnych drgań w paśmie wysokich częstotliwości, w artykule częstotliwości ząbienia. Badania przeprowadzono na dwóch stanowiskach będących na wyposażeniu Katedry Mechaniki i Wibroakustyki, przekładni demonstracyjnej DMG-1A rys. 2 oraz stanowisku przekładni przemysłowej.

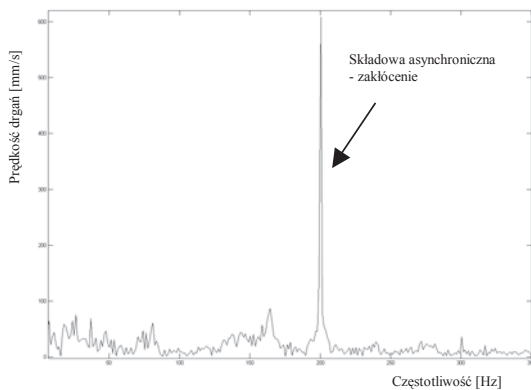


Rys. 2. Programowalne Urządzenie Diagnostyczne na stanowisku badawczym przekładni demonstracyjnej DMG-1M

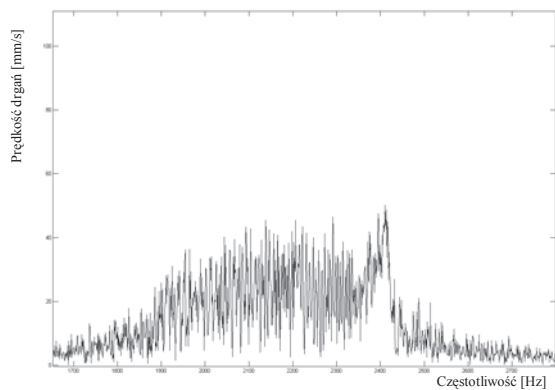
3. ANALIZA WIDMOWA DRGAŃ PRZEKŁADNI ZĘBATEJ W STANACH NIESTACJONARNYCH

Wyniki badań w postaci widm amplitudowych przedstawiono na rys. 3. Widmo w paśmie częstotliwości obrotowej przedstawia rys. 3a, a w paśmie częstotliwości zazębienia rysunek 3b. Analizy dokonano przy średnim przyroście prędkości obrotowej 0.12 % na cykl. W przedstawionych wynikach analizy występuje wyraźny brak selektywności prążków co uniemożliwia diagnostykę w oparciu o widmo synchroniczne.

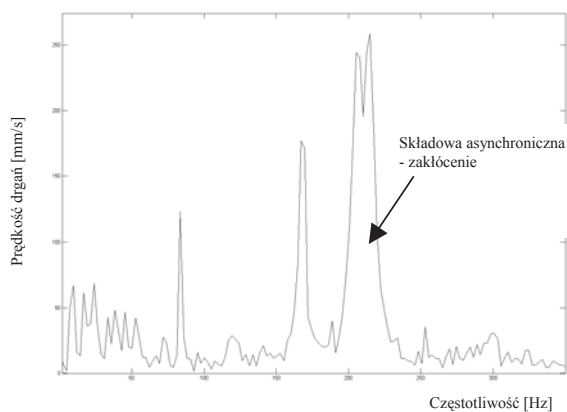
Rezultaty przetworzonych sygnałów po zastosowaniu sprzętowej implementacji PLD przedstawiono w postaci widm amplitudowych na rys. 4. Uzyskano wyraźną poprawę selektywności prążków w paśmie harmonicznych obrotów oraz zazębienia. Na rys. 4a pojawiły się dwie harmoniczne częstotliwości obrotowej, a amplituda składowej asynchronicznej została częściowo rozmyta. Natomiast na rys. 4b można zidentyfikować amplitudę dla częstotliwości zazębienia i pojawiające się wstęgi boczne.



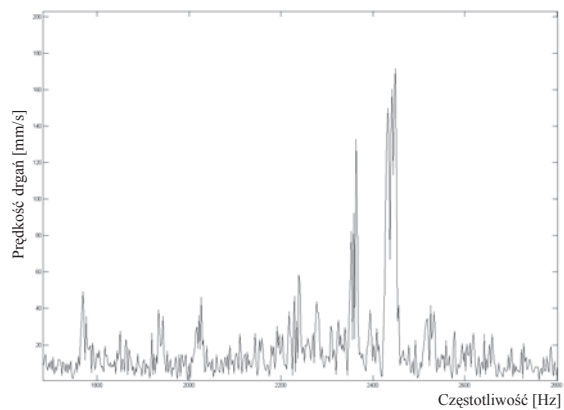
Rys. 3a. Widmo amplitudowe prędkości drgań w paśmie częstotliwości obrotowej. Średni przyrost prędkości 0.12 % na cykl



Rys. 3b. Widmo amplitudowe prędkości drgań w paśmie częstotliwości zazębienia. Średni przyrost prędkości obrotowej 0.12 % na cykl

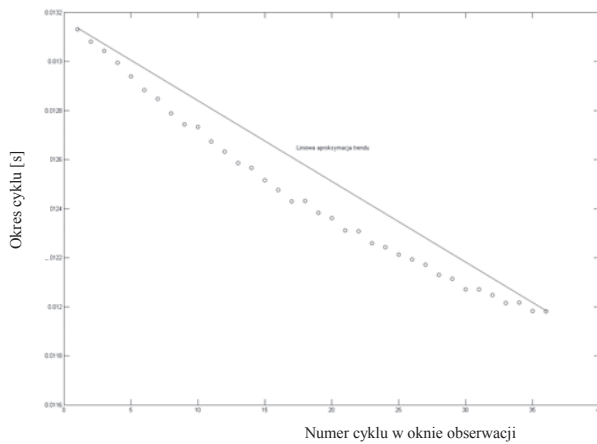


Rys. 4a. Widmo amplitudowe prędkości drgań w paśmie częstotliwości obrotowej po zastosowaniu PLD. Średni przyrost prędkości 0.12 % na cykl



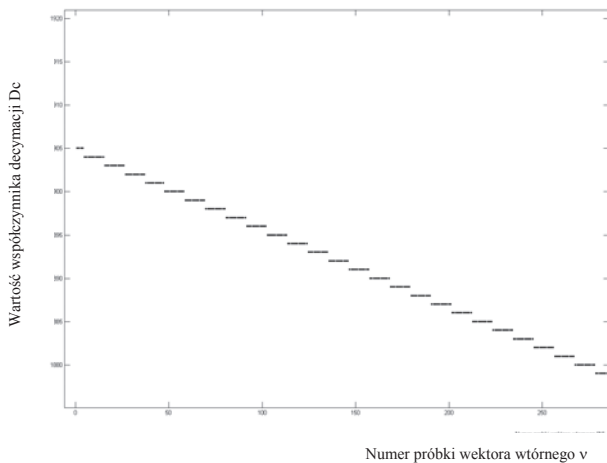
Rys. 4b. Widmo amplitudowe prędkości drgań w paśmie częstotliwości zazębienia po zastosowaniu PLD. Średni przyrost prędkości obrotowej 0.12 % na cykl

Na rys. 5 przedstawiono zmiany długości cyklu w oknie obserwacji i ich aproksymację charakterystyką liniową. Maksymalny błąd aproksymacji wyniósł 1.4 %.



Rys. 5. Zmiany długości cyklu w oknie obserwacji oraz ich aproksymacja funkcją liniową

Zmiany współczynnika decymacji dla fragmentu wektora wtórnego zaprezentowano na rys. 6. Widać na nim, że mimo znacznego nadpróbkowania sygnału (częstotliwość próbkowania 10 MS/s) oraz maksymalnej wartości współczynnika decymacji $D_c=1905$ nie uzyskano idealnej charakterystyki liniowej aproksymacji przy zadanej dynamice procesu rozbiegu.

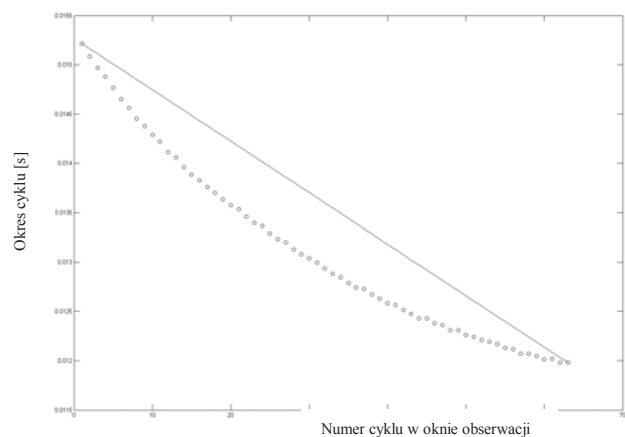


Rys. 6. Zmiany współczynnika decymacji dla fragmentu wektora wtórnego

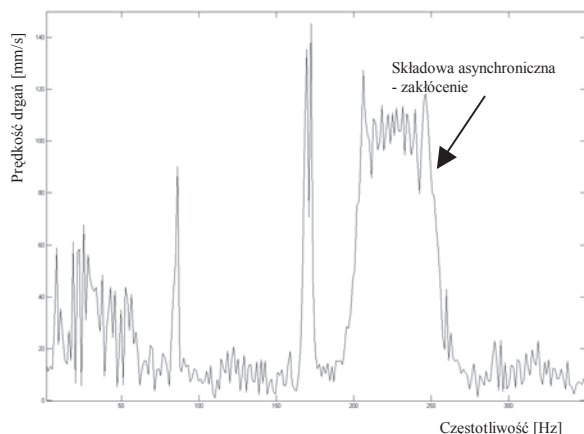
Porównując wykres zmian współczynnika decymacji z wykresem zmian cyklu widać, że zachowanie dokładnej linii prostej aproksymującej nie jest w tym wypadku celowe, ponieważ zasada aproksymacji funkcją liniową powoduje już pewien błąd analizy. Jak błąd wynikający z założenia metody wpływa na selektywność widmową można zaobserwować przez analizę szerszego okna obserwacji rozbiegu przekładni przedstawionego w następnym rozdziale.

4. BŁĄD APROKSYMACJI TRENDU ZMIANY CYKLU

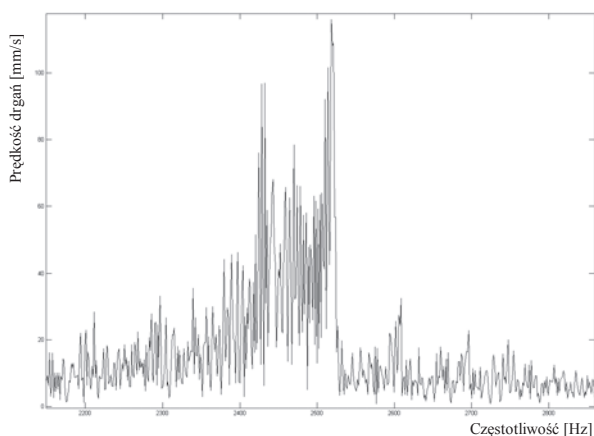
Różnicę pomiędzy zmianami długości cyklu, a linią aproksymującą przy średnim przyroście prędkości obrotowej wynoszącym 0.38 % na cykl przedstawiono na rys. 7. Sam przyrost nie jest jednak tak istotny jak jego zmiana w czasie tj. przyrost prędkości obrotowej dla pierwszego cyklu okna obserwacji wyniósł 0,84%, a dla ostatniego 0.0075% na cykl. Nie został zachowany trend liniowej zmiany prędkości obrotów w obserwowanym przedziale czasu. Skutkiem tego jest maksymalny błąd aproksymacji rzędu 5.1 % czego efektem jest pogorszenie selektywności widmowej w szczególności w paśmie wyższych częstotliwości. Dla częstotliwości zążeń porównaj rys. 8b oraz 4b i 3b. Dla pasma pierwszych harmonicznych częstotliwości obrotowej występuje nieznaczne pogorszenie wyników rys. 8a w odniesieniu do rys. 4a (przyrost prędkości obrotowej 0.12%).



Rys. 7. Zmiany długości cyklu w szerszym oknie obserwacji oraz ich aproksymacja charakterystyką liniową



Rys. 8a. Widmo amplitudowe prędkości drgań w paśmie częstotliwości obrotowej po zastosowaniu PLD. Średni przyrost prędkości obrotowej 0.38 % na cykl



Rys. 8b. Widmo amplitudowe prędkości drgań w paśmie częstotliwości zazębienia po zastosowaniu PLD. Średni przyrost prędkości obrotowej 0.38 % na cykl

Przedstawione przykłady wyczerpują możliwości procedury jeśli chodzi o zakres częstotliwości widma związanego z zazębieniem. Dalsze możliwości PLD związane są z demodulacją i przedstawione są szczegółowo w [7].

5. UWAGI I WNIOSKI

Zastosowana w Procedurze Liniowej Decymacji aproksymacja trendu zmiany cyklu funkcją liniową jest uproszczeniem powodującym z założenia pewien błąd wyników analizy. Stąd zwiększanie nadpróbkowania dla zachowania liniowości aproksymacji trendu w szczególności przy analizie sygnałów drgań maszyn wirnikowych na rozbiegu wydaje się być niecelowe. Natomiast w przypadku sygnałów o liniowych zmianach cyklu roboczego wskazane.

Podsumowując:

- metoda PLD przynosi dobre wyniki przy zastosowaniu do analizy sygnałów drgań maszyn wirnikowych przy zmianach prędkości obrotowych mających w oknie obserwacji trend zbliżony do liniowego,
- w przypadku odchylenia trendu cyklu od liniowego (ponad 5%) celowe jest dopasowanie metody aproksymacji do zmian cyklu np. charakterystyką wyższego rzędu,
- rejestracja sygnału z częstotliwością 10 MS/s (Programowalne Urządzenie Diagnostyczne) umożliwia zastosowanie PLD dla pojedynczego cyklu, zbliżając metodę do analizy rzędów bez konieczności stosowania filtrów interpolujących,
- w większości przypadków analizy procesów dynamicznych wystarczające jest stosowanie współczynnika decymacji końcowej z przedziału $D_{c_k}=20-100$.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1]. Adamczyk J., Cioch W., Krzyworzecka P.: *Wpływ interpolacji na procedurę liniowej decymacji*. Diagnostyka, vol. 27, 2002, 37 – 42.
- [2]. Adamczyk J., Cioch W., Krzyworzecka P., *Inżynieria Diagnostyki Maszyn. Elementy teorii diagnostyki technicznej – praca zbiorowa*. Roz. 14: *Metody synchroniczne w diagnozowaniu maszyn*. s. 264–278, Radom, 2004.
- [3]. Cempel Cz.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań, 1985.
- [4]. Cioch W., Krzyworzecka P.: *Machine diagnostics in cycle-time scale using linear decimation procedure*: 1st Int. Conf. on Experiments/Process/System/Modelling/Simulation/Optimization: 6–9 July, 2005. Univ. of Patras. LFME Athens, Greece.
- [5]. Cioch W., Krzyworzecka P.: *Dynamiczna kompensacja wpływu zmian długości cyklu na sygnał drganiowy*. Mat XXVII Sympozjum Diagnostyka Maszyn, z. 1, Z. N. Pol. Śl. Katowice 2000
- [6]. Jamro E., Adamczyk A., Krzyworzecka P., Cioch W.: *Programowalne urządzenie diagnostyczne stanów niestacjonarnych pracujące w czasie rzeczywistym*. XXXIII Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka, 8.–11.03. 2006 r.
- [7]. Krzyworzecka P., Cioch W.: *Demodulation of non-stationary machine vibration using cycle-time scale*. Archives of Acoustics, 2006 vol. 31 no. 2 s. 167–1.
- [8]. Krzyworzecka P.: *Wspomaganie synchroniczne w diagnozowaniu maszyn*: monografia, s. 204, Radom Wyd. ITE 2004

7. WAŻNIEJSZE OZNACZENIA I SKRÓTY

PLD - Procedura Liniowej Decymacji
 PUD - Programowalne Urządzenie Diagnostyczne
 D_{c_k} - końcowy współczynnik decymacji
 D_{c_p} - początkowy współczynnik decymacji
 D_{c_n} - współczynnik decymacji odpowiadający n-tej próbie wektora pierwotnego
 N_{Θ_p} - ilość próbek początkowego cyklu okna obserwacji
 N_{Θ_k} - ilość próbek końcowego cyklu okna obserwacji
 $N(n)$ - pierwotny zbiór próbek
 n - numer próbki wektora pierwotnego
 n_{DK} - numer próbki umożliwiający zakończenie PLD w zakresie wektora pierwotnego
 $L(v)$ - wtórny zbiór próbek
 $t(\Theta)$ - czas obserwacji
 v - numer próbki wektora wtórnego
 Θ - czas cyklu
 Θ_p - cykl początkowy okna obserwacji
 Θ_k - cykl końcowy okna obserwacji

*Pracę zrealizowano w ramach projektu
 KBN nr 4 T07B 05426*



Dr inż. **Ernest JAMRO** ukończył studia na AGH kierunku Elektronika oraz University of Huddersfield (UK) na kierunku Elektronika i Telekomunikacja. Obronił pracę doktorską w 2001 roku na AGH Wydział EAIiE. Aktualnie jest adiunktem w Katedrze Elektroniki na AGH. Jego zainteresowania naukowe to sprzętowa akceleracja obliczeń, niskopoziomowe przetwarzanie danych.



Dr hab. inż. **Piotr KRZYWORZEKA**, prof. AGH pracuje na tej uczelni od ukończenia studiów. Wykładał kilka lat w Algierii. Jest autorem ok. 90 publikacji, głównie o tematyce diagnostycznej, rzeczoznawcą SEP w zakresie elektroakustyki, a także członkiem PTDT od momentu jego powstania. W pracy badawczej preferuje podejście sygnałowe. Interesuje się także psychologią i filozofią. Jako środek transportu preferuje rower.



Dr inż. **Witold CIOCH** jest absolwentem Wydziału BMiL PRz., specjalność napędy lotnicze oraz Wydziału IMiR AGH, specjalność wibroakustyka. Obecnie pracuje jako adiunkt w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki AGH. Autor 38 publikacji z tematyki diagnostyki technicznej i wibroakustyki. Zajmuje się zagadnieniami cyfrowego przetwarzania sygnałów, sieciami neuronowymi i analizą ryzyka eksploatacyjnego.