

# ANALIZA NIELINIOWA DRGAŃ PRZEKŁADNI GŁÓWNEJ ŚMIGŁOWCA ZA POMOCĄ METODY REKURENCJI



# PLAN PREZENTACJI

MOTYWACJA

STANOWISKO DOŚWIADCZALNE

PRZEBIEGI CZASOWE

DEKOMPOZYCJA SYGNAŁÓW

ANALIZA REKURENCJI

WYNIKI

WYKRES – WYNIKI REKURENCYJNE

WYNIKI - % REKURENCJI

WYNIKI - % DETERMINIZM

WYNIKI - % LAMINARNOŚĆ

WYNIK – NAJDŁUŻSZA LINIA UKOŚNA

WYNIK – NAJDŁUŻSZA LINIA PIONOWA

WYNIK – MEDIANA WSKAŹNIKÓW REKURENCJI (CZUJNIK 1)

WYNIK – MEDIANA WSKAŹNIKÓW REKURENCJI (CZUJNIK 2)

WNIOSKI



# MOTYWACJA

Monitorowanie stanu przekładni głównej śmigłowca:

- ✓ krytyczne ze względu na bezpieczeństwo użytkownika
- ✓ **16%** utraty zdolności śmigłowców do działania<sup>1</sup>
- ✓ **30%** całkowity koszt utrzymania<sup>1</sup>
- ✓ opiera się na analizie za pomocą sygnałów wibroakustycznych
- ✓ utrudnione ze względu na złożoność procesu przekazywania napędu
- ✓ niski stosunek sygnału do szumu
- ✓ sygnał musi być transmitowanych do sensorów umieszczonych na zewnątrz



# MOTYWACJA

- ✓ Health and Usage Monitoring Systems (HUMS) – systemy oparte na wskaźnikach w domenie czasu i/lub częstotliwości
- ✓ wartości obliczane z sygnałów drgań (Crest, FM4, NA4, etc.)<sup>2</sup>
- ✓ systemy HUMS nie zawsze wykrywają uszkodzenia przekładni głównej przekazywania napędu<sup>3</sup>

**Efekty nieliniowe mogą mieć znaczny wpływ!**

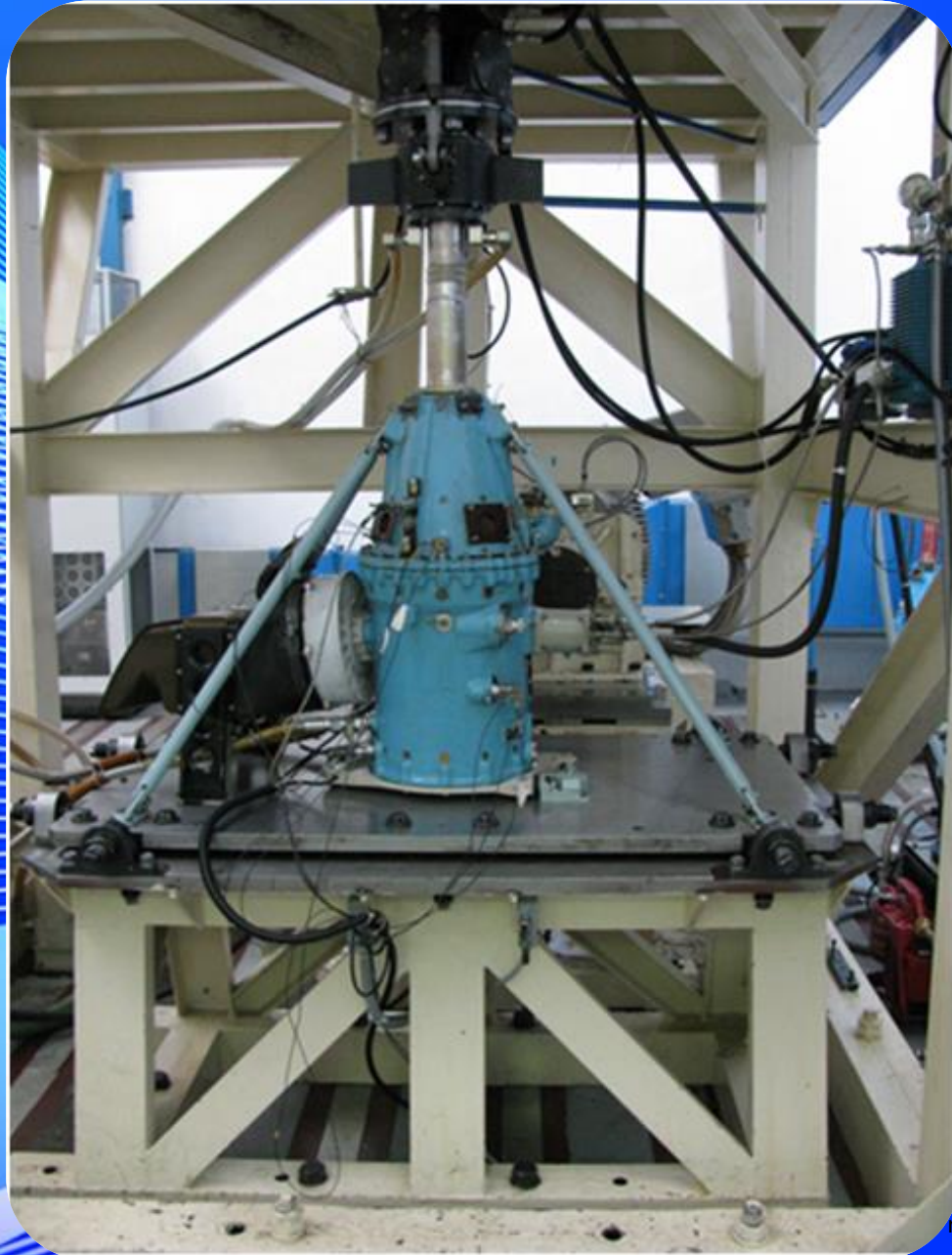


# STANOWISKO DOŚWIADCZALNE

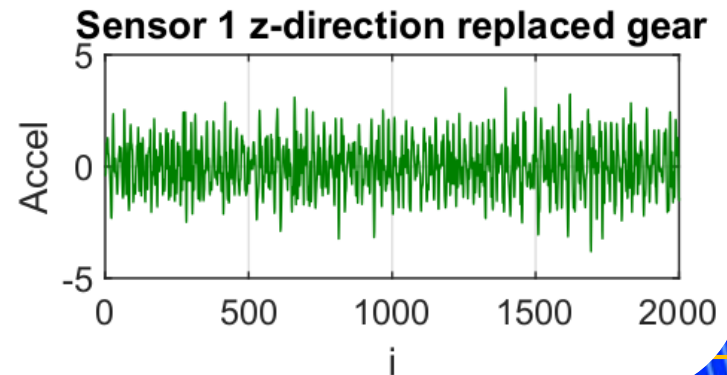
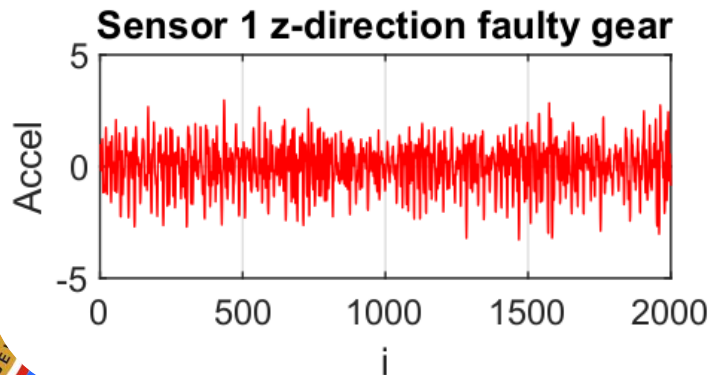
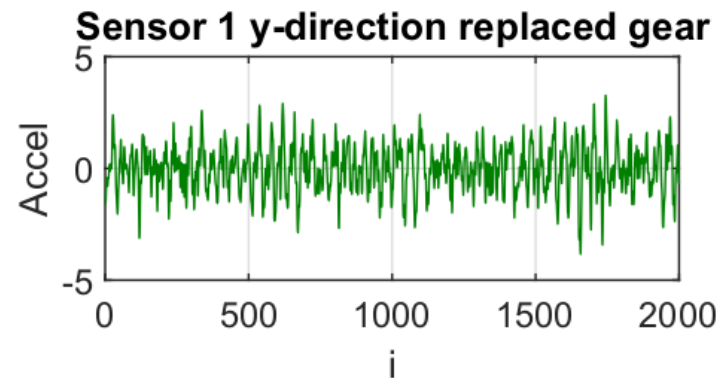
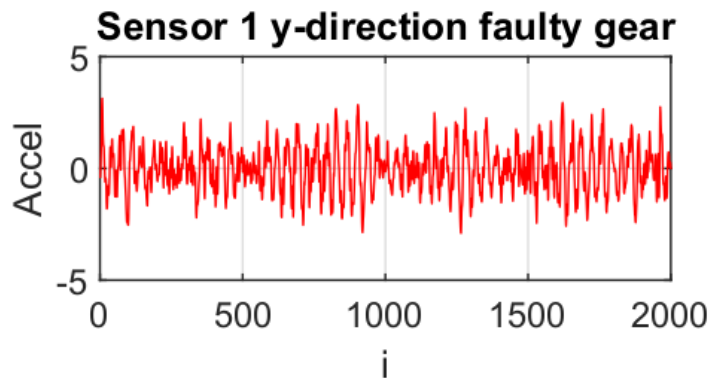
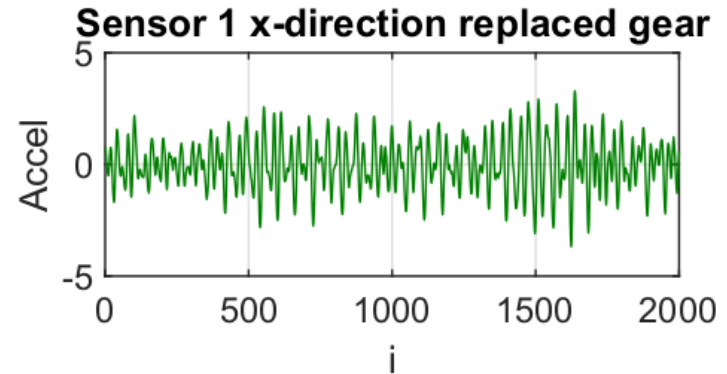
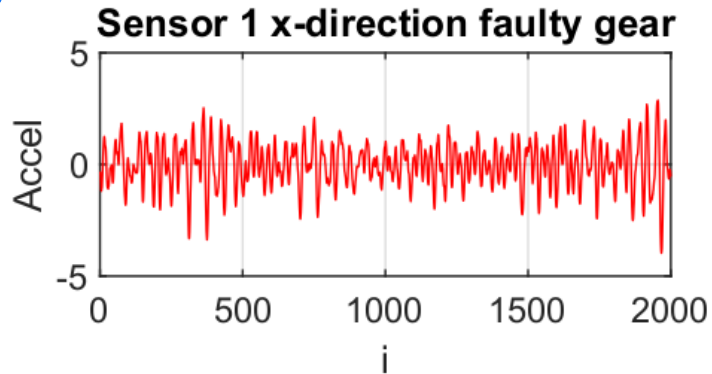
- Przekładnia PG-4 ze śmigłowca PZL SW-4
- Stałe warunki pracy z prędkością obrotową ustawioną na **6196** obr./min.
- Sygnały drgań zarejestrowano za pomocą dwóch czujników 3d:
  - czujnik typu Bruel & Kjaer 4321
- Częstotliwość próbkowania - **40** kHz.
- Włączony alarm stopu po długim działaniu (**3** godziny)
- Przekładnia uszkodzona (ozn. faulty gear) została wymieniona na nową (ozn. Repleaced gear) i test został powtórzony



# STANOWISKO DOŚWIADCZALNE



# PRZEBIEGI CZASOWE



# DEKOMPOZYCJA SYGNAŁÓW

Dekompozycja na mody doświadczalne (EMD)<sup>4,5</sup>:

- ✓ może być zastosowana zarówno do sygnałów niestacjonarnych, jak i nieliniowych (charakterystyczne lokalne skale czasowe)
- ✓ rozkład sygnału na komponenty oscylacyjne (o różnej częstotliwości w różnych przedziałach czasowych):  
mody doświadczalne (IMF)
- ✓ wrażliwa na mieszanie modów (baza czysto empiryczna)

Wymagania funkcji modów doświadczalnych:

- jednakowa liczba ekstremów i zer
- średnia z obwiedni (górnej i dolnej) równa zero





# DEKOMPOZYCJA SYGNAŁÓW

Dekompozycja na mody doświadczalne (EMD):

1. zlokalizuj wszystkie lokalne minima i maksima w szeregu czasowym
2. połącz linią maksima lokalne (górną obwiednią)
3. połącz linią minima lokalne (dolną obwiednią)
4. znajdź wartość średnią obwiedni (górnej i dolnej)  $m_1$
5. skonstruuj pierwszą modę IMF:  $h_1 = x(t) - m_1$
6. Powtórz powyższe kroki biorąc  $h_1$  jako nowy szereg czasowy dopóki kryterium zatrzymania nie będzie spełnione (odchylenie standardowe lub liczba modów lub różnica w energii sygnałów)



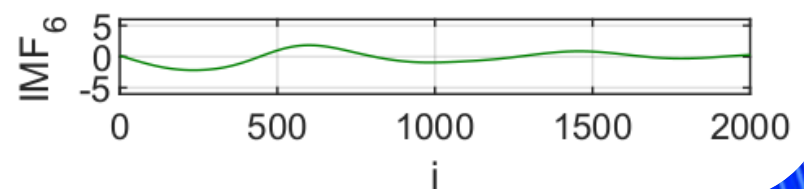
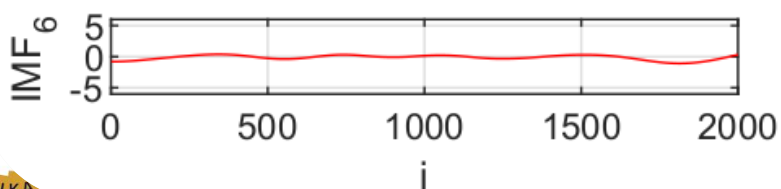
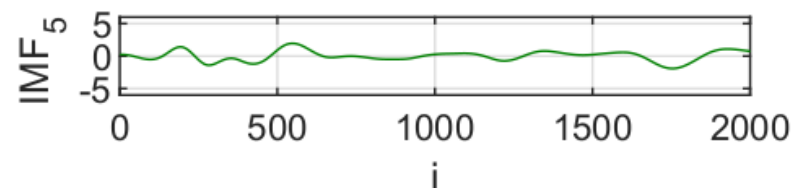
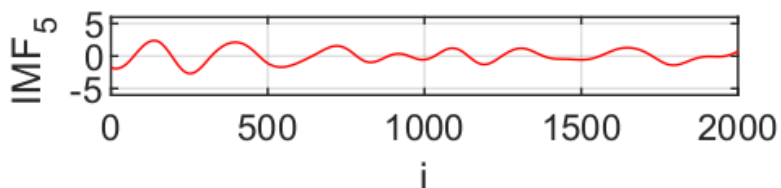
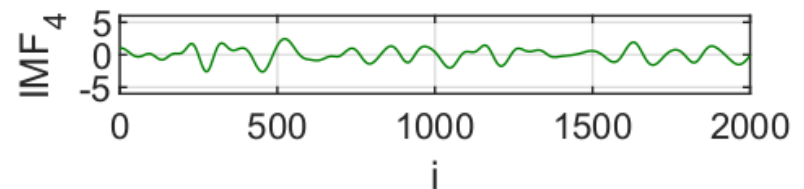
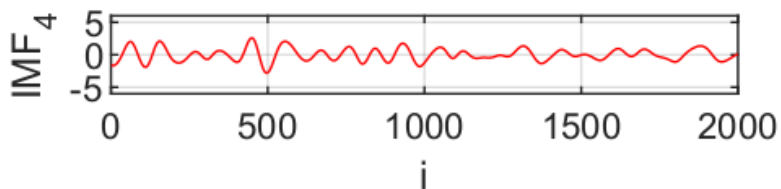
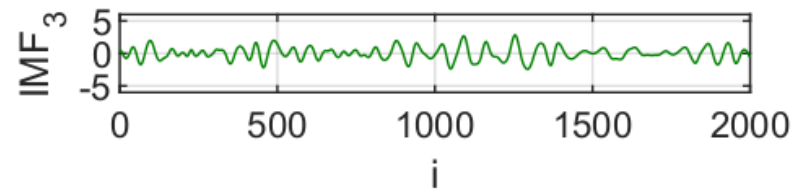
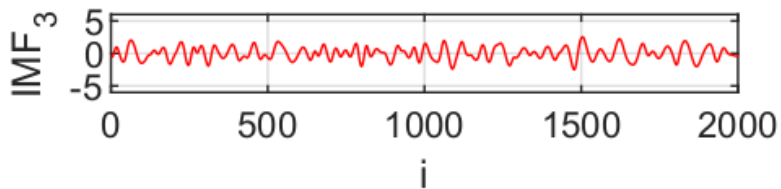
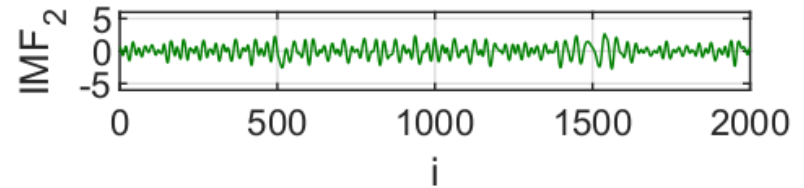
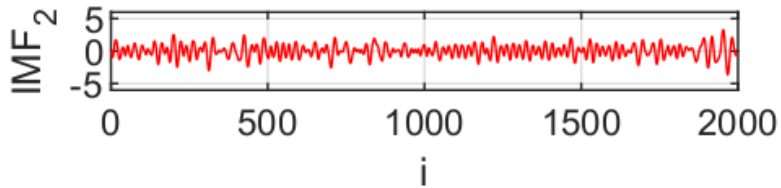
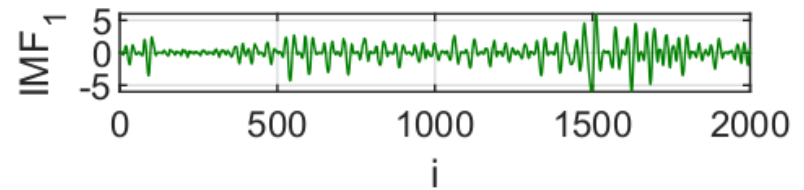
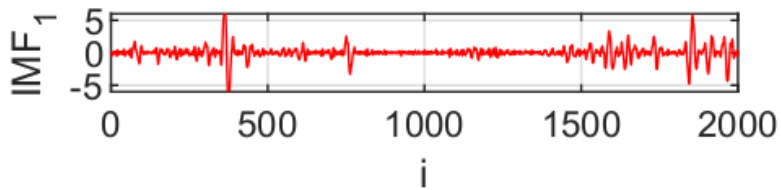
# DEKOMPOZYCJA SYGNAŁÓW

Zespołowa dekompozycja na mody doświadczalne (EEMD)<sup>6,7</sup>:

- ✓ zaproponowana w celu zniwelowania wad metody EMD związanych z wyborem i jednoznacznością modów
- ✓ oparta na metodzie EMD ale z dodatkowym białym szumem
- ✓ polega na powtórzeniu założeń metody EMD wiele razy ale z dodatkiem białego szumu o jednakowej amplitudzie
- ✓ kolejne składowe są wyznaczane jako średnia wartość z poszczególnych modów IMFs z wielu iteracji
- ✓ szum powinien się uśrednić (różny w poszczególnych próbach)
- ✓ dwa kluczowe parametry:
  - odchylenie standardowe szumu (zazwyczaj 10-20% odchylenia standardowego szeregu czasowego  $x(t)$ )
  - liczba iteracji (zazwyczaj 100)



# DEKOMPOZYCJA SYGNAŁÓW



# ANALIZA REKURENCJI

Metoda rekurencji:

- ✓ bazuje na analizie odległości pomiędzy trajektoriami – sygnał drgań zarejestrowany na stanowisku doświadczalnym zanurzony w zrekonstruowanej przestrzeni stanów
- ✓ jeżeli odległość jest dostatecznie mała pomiędzy stanami w czasie  $(i,j)$  jest to oznaczane na wykresie rekurencji za pomocą punktu – oznacza regularną odpowiedź układu
- ✓ jeżeli odległość pomiędzy poszczególnymi stanami jest większa od progowej, jest to zaznaczane jako brak rekurencji
- ✓ wykres rekurencyjny składa się z długich linii ukośnych (regularny stan układu), krótkich linii ukośnych i pojedynczych punktów rekurencji (nieregularny stan układu), izolowanych punktów rekurencji (szum)



# WYNIKI

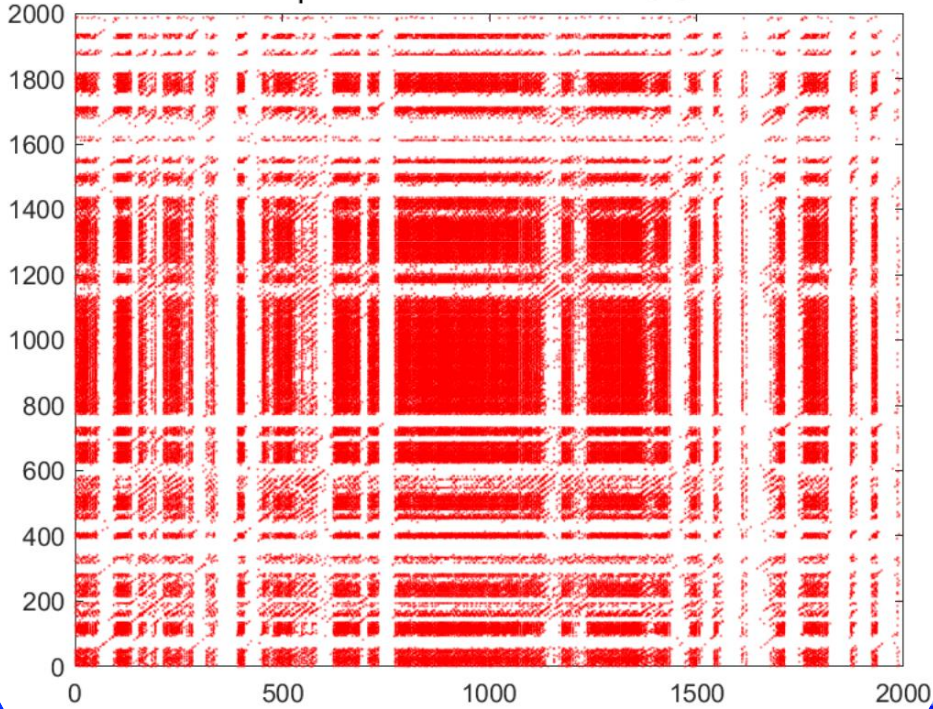
## Parametry analizy RQA :

- długość każdego szeregu czasowego - 2000 punktów
- liczba prób - 121
- każdy szereg czasowy znormalizowano (wartość średnia 0 i odchylenie standardowe 1)
- opóźnienie czasowe -  $\tau = 6$
- wymiar zanurzenia -  $m = 3$
- odległość progowa – jednakowa dla wszystkich par modów
- minimalna długość linii ukośnej - 3
- minimalna długość linii pionowej - 3

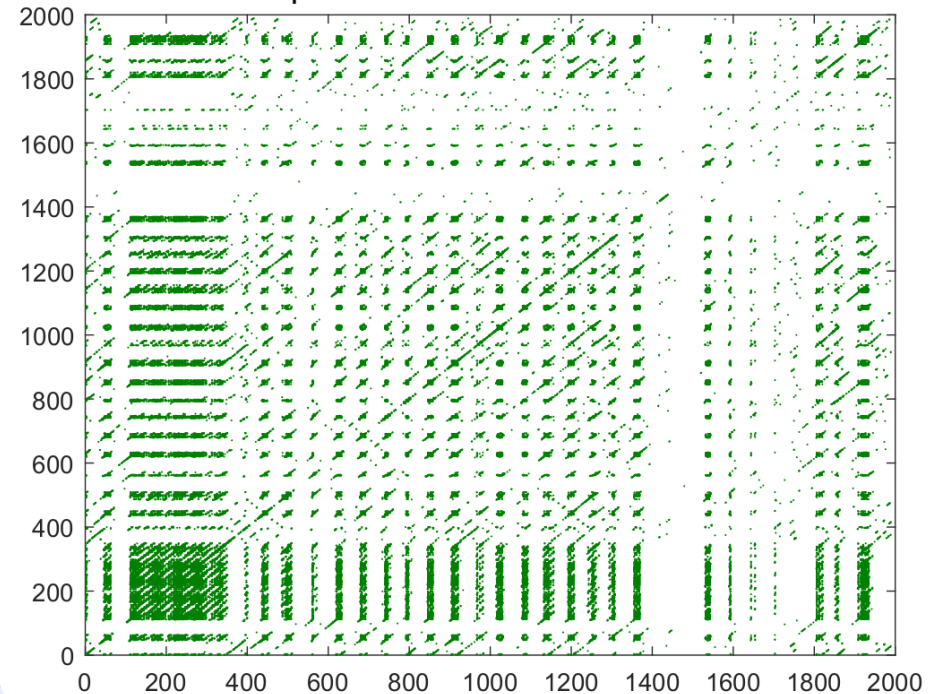


# WYKRES – WYNIKI REKURENCYJNE (POJEDYNCZA PRÓBA)

IMF<sub>1</sub> Sensor 1 x-direction faulty gear



IMF<sub>1</sub> Sensor 1 x-direction healthy gear



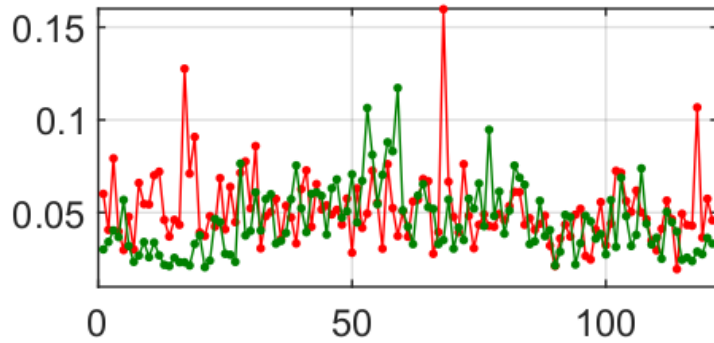
# WYKRES – WSKAŹNIKI REKURENCYJNE (POJEDYNCZA PRÓBA)

	$\varepsilon$	RR	DET	LMAX	LAM	VMAX
Healthy	0.3	0.03	0.68	252	0.78	34
Damage	0.3	0.07	0.27	32	0.45	39

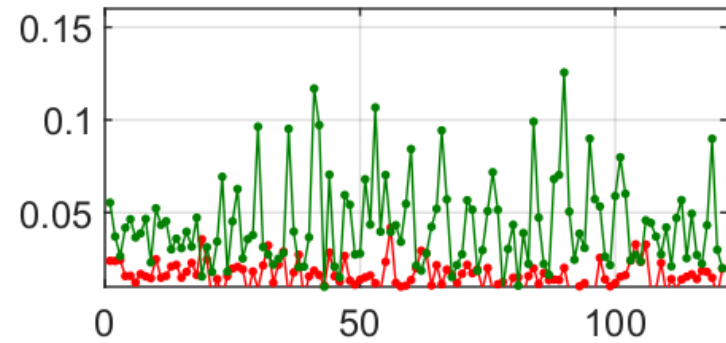


# WYNIK- % REKURENCJI

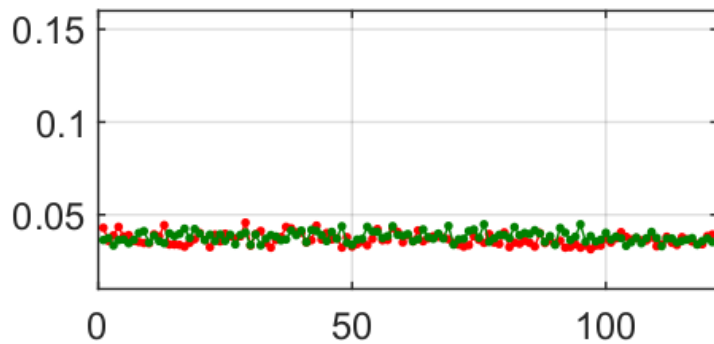
Sensor 1 X imf1 RR



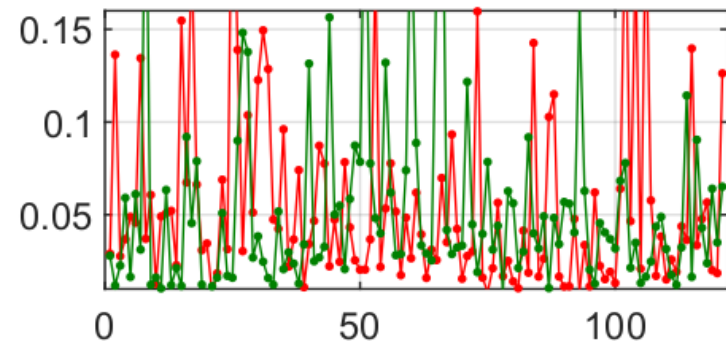
Sensor 2 X imf1 RR



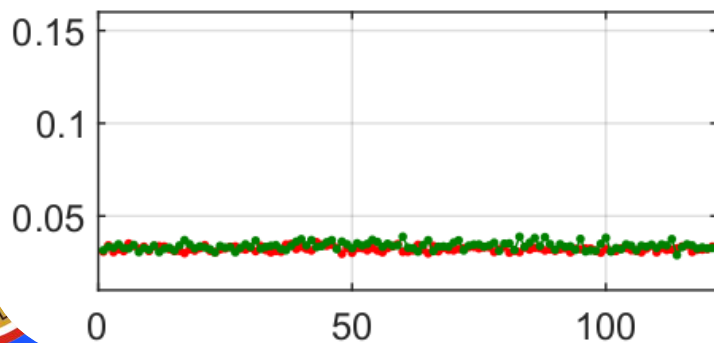
Sensor 1 Y imf1 RR



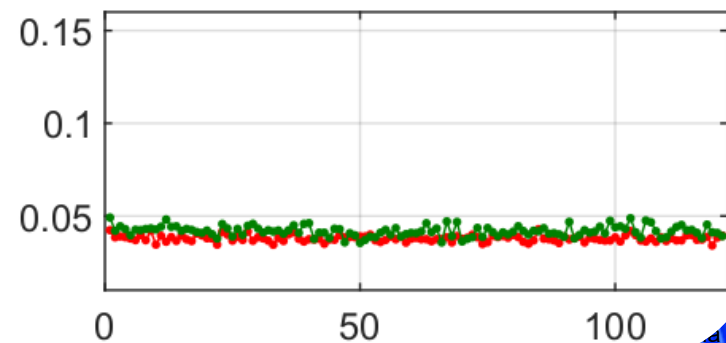
Sensor 2 Y imf1 RR



Sensor 1 Z imf1 RR



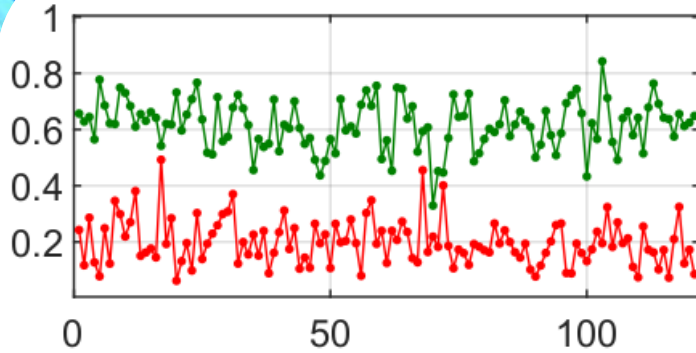
Sensor 2 Z imf1 RR



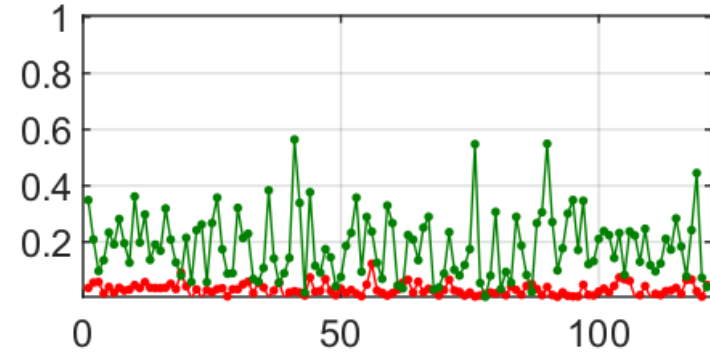


# WYNIK- DETERMINIZM

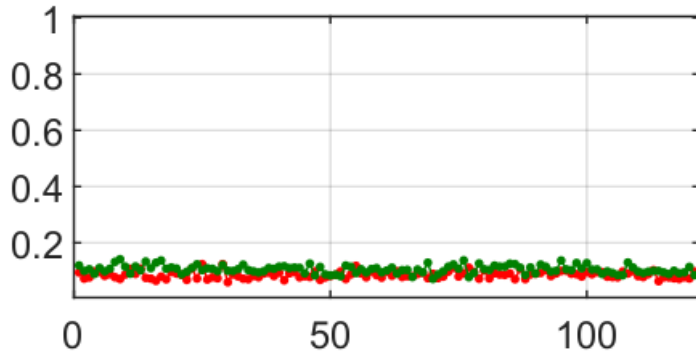
Sensor 1 X imf1 DET



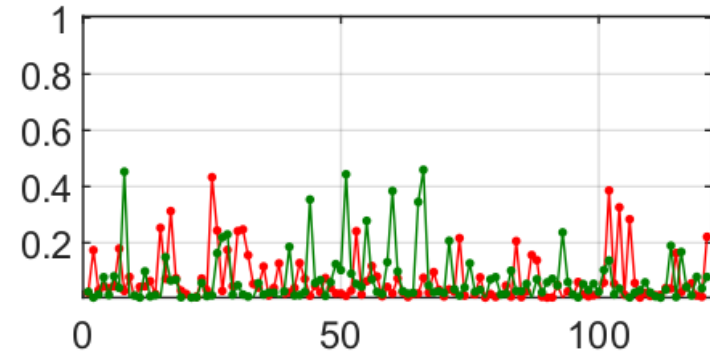
Sensor 2 X imf1 DET



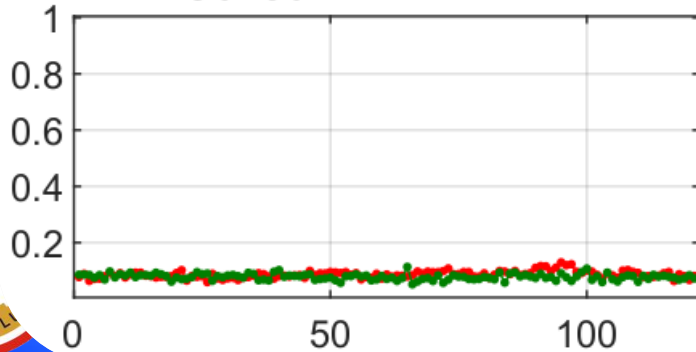
Sensor 1 Y imf1 DET



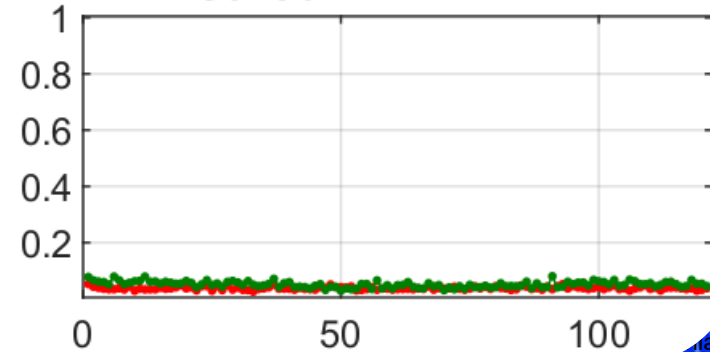
Sensor 2 Y imf1 DET



Sensor 1 Z imf1 DET

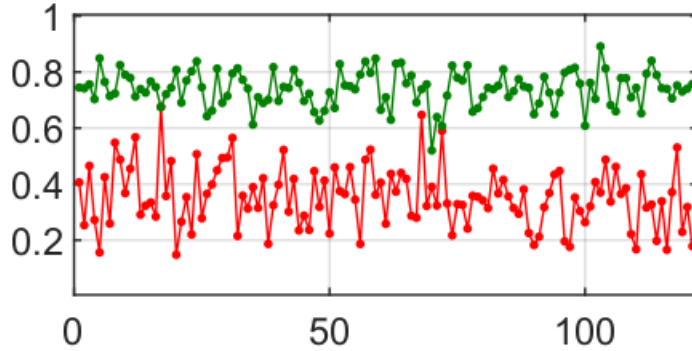


Sensor 2 Z imf1 DET

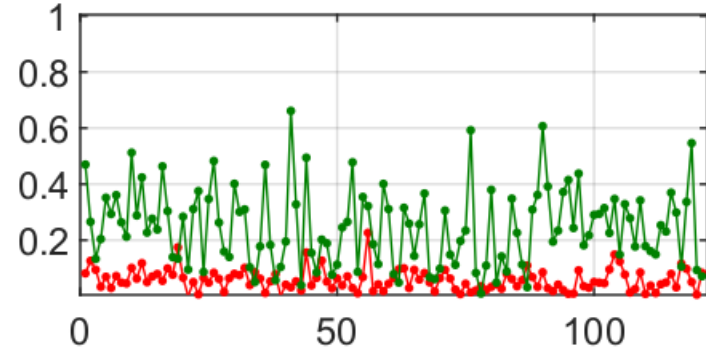


# WYNIK- LAMINARNOŚĆ

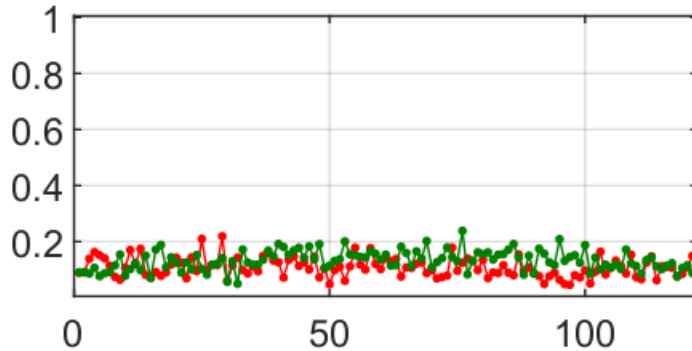
Sensor 1 X imf1 LAM



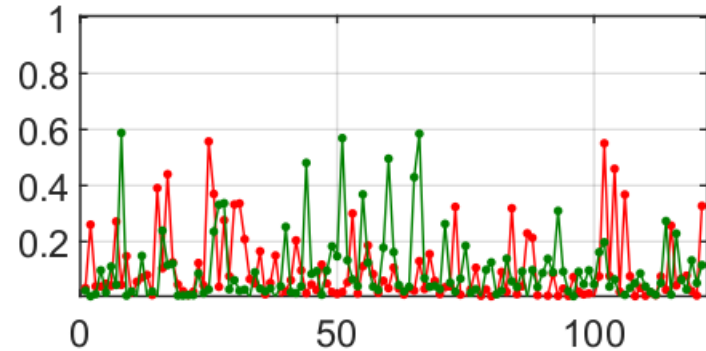
Sensor 2 X imf1 LAM



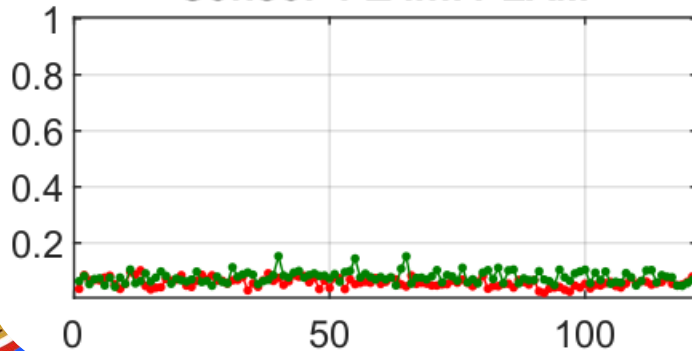
Sensor 1 Y imf1 LAM



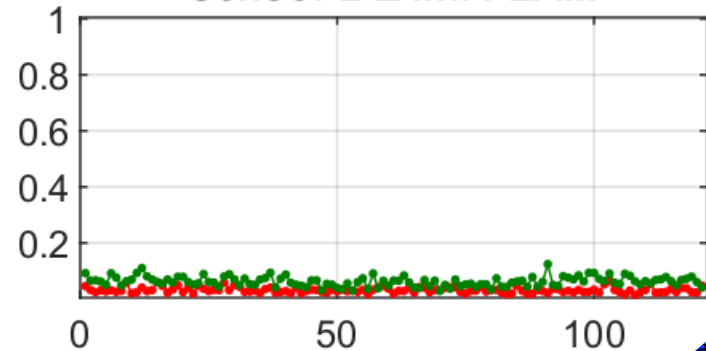
Sensor 2 Y imf1 LAM



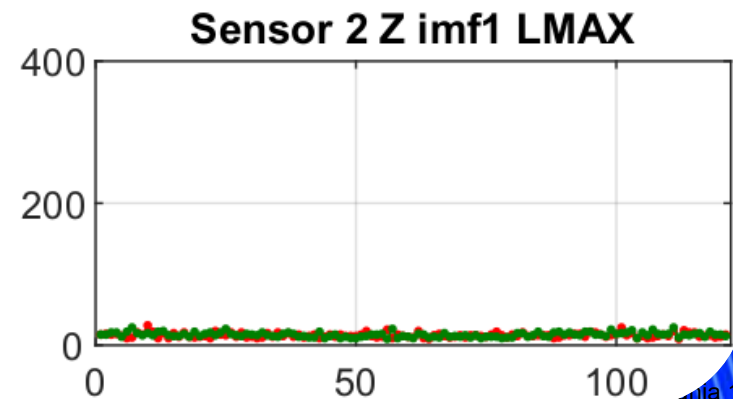
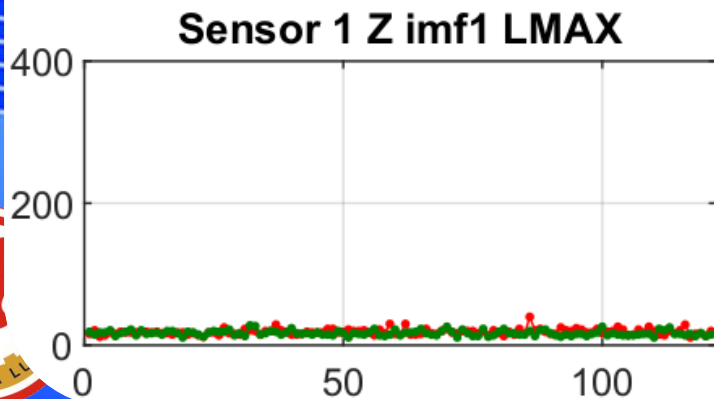
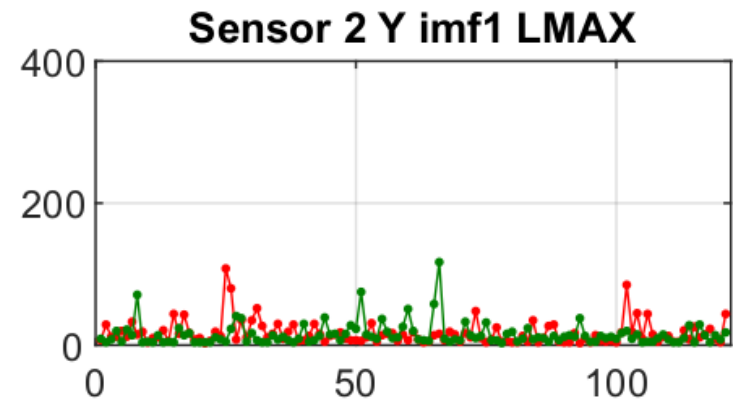
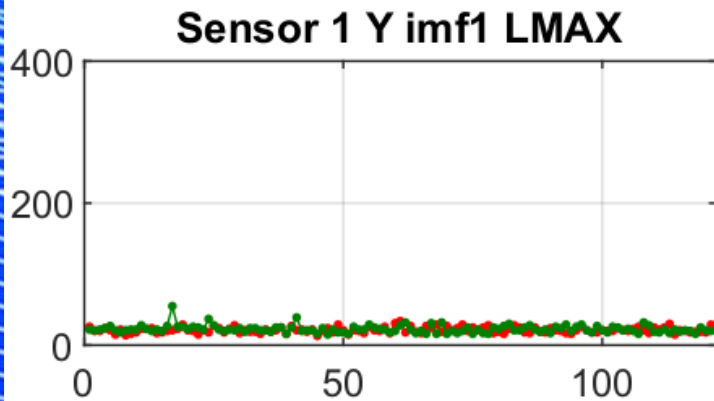
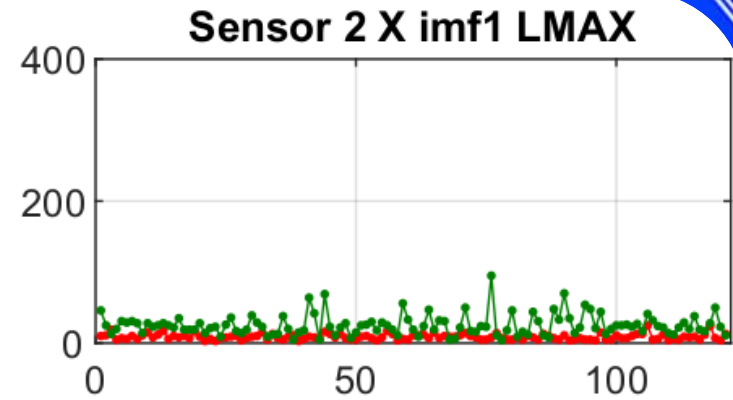
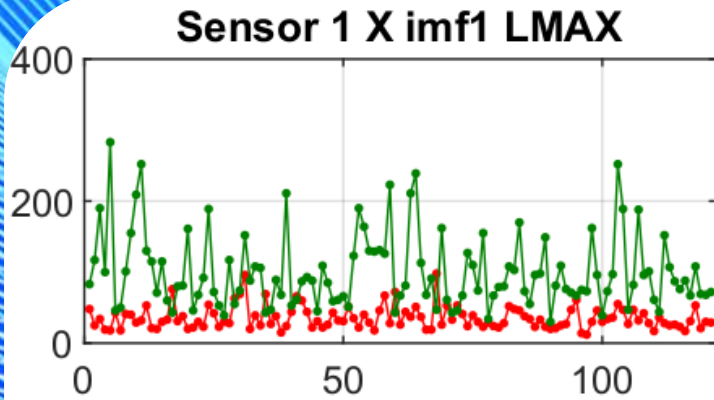
Sensor 1 Z imf1 LAM



Sensor 2 Z imf1 LAM

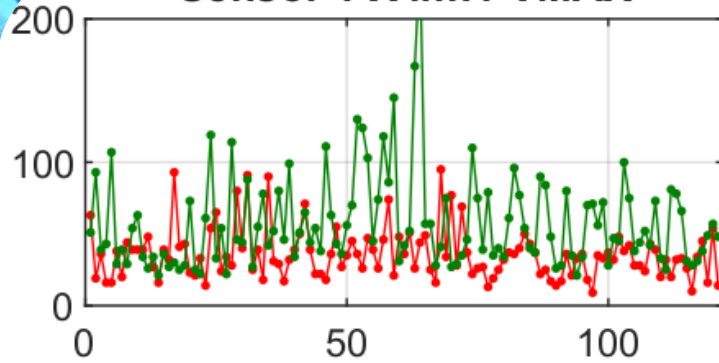


# WYNIK- NAJDŁUŻSZA LINIA UKOŚNA

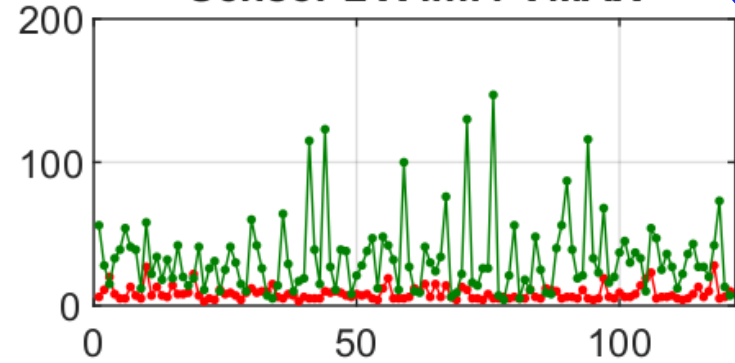


# WYNIK- NAJDŁUŻSZA LINIA PIONOWA

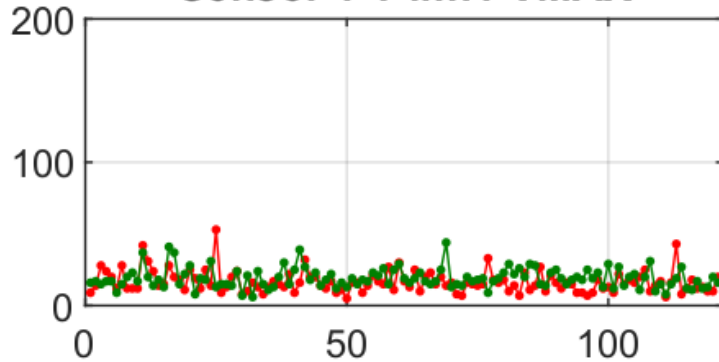
Sensor 1 X imf1 VMAX



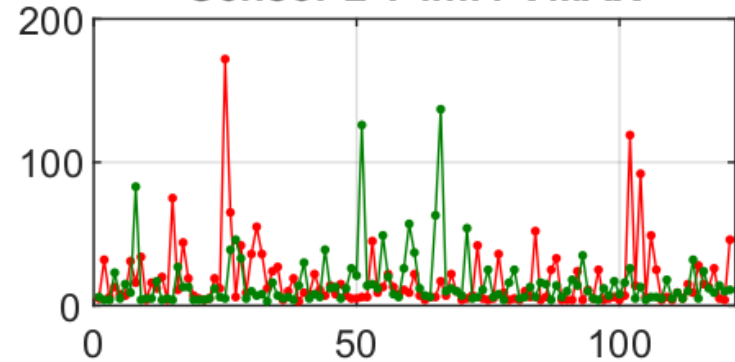
Sensor 2 X imf1 VMAX



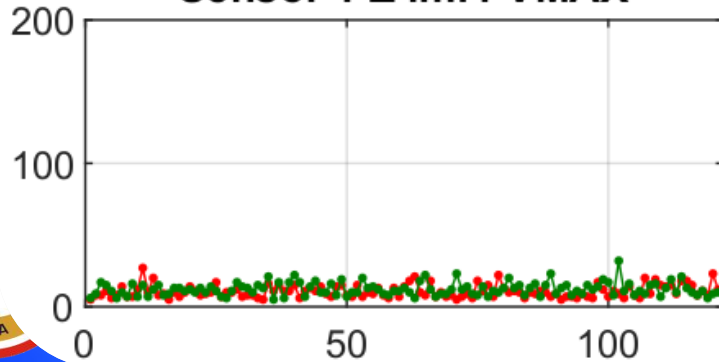
Sensor 1 Y imf1 VMAX



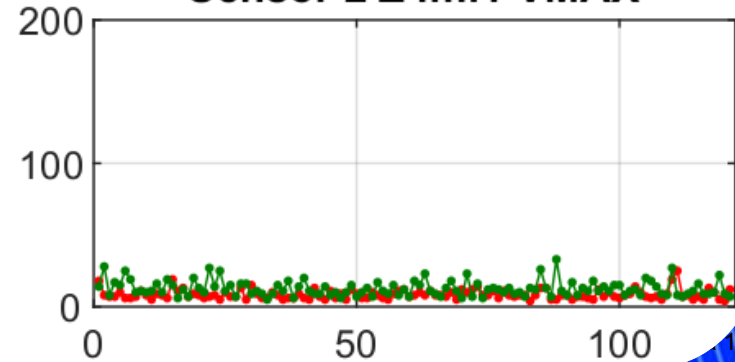
Sensor 2 Y imf1 VMAX



Sensor 1 Z imf1 VMAX



Sensor 2 Z imf1 VMAX



# WYNIKI – mediana wskaźników rekurencji

## CZUJNIK 1

<u>Sensors</u>	<u>RR</u>	<u>DET</u>	<u>LMAX</u>	<u>LAM</u>	<u>VMAX</u>
S1 IMF1(x)	83%	320%	280%	210%	141%
S1 IMF2(x)	98%	104%	149%	104%	86%
S1 IMF1(y)	103%	123%	104%	123%	120%
S1 IMF2(y)	76%	99%	73%	83%	66%
S1 IMF1(z)	104%	91%	94%	132%	102%
S1 IMF2(z)	101%	109%	98%	94%	80%



# WYNIKI – mediana wskaźników rekurencji

## CZUJNIK 2

<u>Sensors</u>	<u>RR</u>	<u>DET</u>	<u>LMAX</u>	<u>LAM</u>	<u>VMAX</u>
S2 IMF1(x)	248%	638%	287%	467%	385%
S2 IMF2(x)	116%	115%	160%	93%	102%
S2 IMF1(y)	94%	93%	83%	104%	111%
S2 IMF2(y)	82%	111%	107%	95%	84%
S2 IMF1(z)	110%	139%	115%	208%	137%
S2 IMF2(z)	101%	143%	167%	140%	136%

# WNIOSKI

1. Metoda rekurencji może być użyta do monitorowania stanu przekładni głównej śmigłowca w oparciu o zarejestrowane sygnały drgań
2. Wartości wskaźników rekurencji dla składowej o najszybszych oscylacjach  $IMF_1(x)$  różniły się najbardziej
3. Zastosowana metoda wykazała, że analiza sygnału w kierunku x jest optymalna
4. Miary oparte na statystykach linii ukośnych (Determinizm i Najdłuższa linia ukośna) wykazały największe różnice w stanie przekładni



# LITERATURA

Slajd 3 – <sup>1</sup> H. Chin, Danai K., Lewicki DG. (1993), *Pattern classier for health monitoring of helicopter gearboxes*, NASA reportno 211492

Slajd 4 – <sup>2</sup> HJ. Decker (2002), *Crack detection for aerospace quality spur gears*, NASA reportno 7741

Slajd 4 - <sup>3</sup> K. Pipe (2002), *Measuring the performance of a hum system-the features that count*, Third international conference on health and usage monitoring-HUMS2003

Slajd 8 – <sup>4</sup> Huang, N. E., S. R. Long, and Z. Shen (1996), *The Mechanism for Frequency Downshift in Nonlinear Wave Evolution*, Advances in Applied Mechanics

Slajd 8 – <sup>5</sup> Loutridis, S. (2004), *Damage detection in gear systems using empirical mode decomposition*, Engineering Structures

Slajd 10 – <sup>6</sup> Wu, Zhaohua, Norden E. Huang (2009), *Ensemble Empirical Mode Decomposition: a Noise-Assisted Data Analysis Method*, Advances in Adaptive Data Analysis

Slajd 10 – <sup>7</sup> Feng, Zhipeng et al. (2012), *Fault diagnosis for wind turbine planetary gearboxes via demodulation analysis based on ensemble empirical mode decomposition and Energy separation*, Renewable Energy





# DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ !!!

## Analiza nieliniowa drgań przekładni głównej śmigłowca za pomocą metody rekurencji

POLITECHNIKA LUBELSKA  
Katedra Informatyzacji i Robotyzacji Produkcji  
dr inż. Kamil Jonak  
dr hab. Arkadiusz Syta, prof. PL

---

Projekt „Politechnika Lubelska – Regionalna Inicjatywa Doskonałości”  
– finansowany ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego



Ministerstwo  
Nauki  
i Szkolnictwa  
Wyższego

