



afiliowane przy

Wydziale Nauk  
Technicznych  
Polskiej Akademii Nauk

# Diagnostyka

ISSN 1641-6414



## RADA PROGRAMOWA / PROGRAM COUNCIL

### PRZEWODNICZĄCY / CHAIRMAN:

prof. dr hab. dr h.c. mult. **Czesław CEMPEL** *Politechnika Poznańska*

### REDAKTOR NACZELNY / CHIEF EDITOR:

prof. dr hab. inż. **Ryszard MICHALSKI** *UWM w Olsztynie*

### CZŁONKOWIE / MEMBERS:

prof. dr hab. inż. **Jan ADAMCZYK**  
*AGH w Krakowie*

prof. **Jérôme ANTONI**  
*University of Technology of Compiègne – France*

prof. dr. **Ioannis ANTONIADIS**  
*National Technical University Of Athens – Greece*

dr inż. **Roman BARCZEWSKI**  
*Politechnika Poznańska*

prof. dr hab. inż. **Walter BARTELMUS**  
*Politechnika Wroclawska*

prof. dr hab. inż. **Wojciech BATKO**  
*AGH w Krakowie*

prof. dr hab. inż. **Lesław BĘDKOWSKI**  
*WAT Warszawa*

prof. dr hab. inż. **Adam CHARCHALIS**  
*Akademia Morska w Gdyni*

prof. dr hab. inż. **Wojciech CHOLEWA**  
*Politechnika Śląska*

prof. dr hab. inż. **Zbigniew DĄBROWSKI**  
*Politechnika Warszawska*

prof. dr hab. inż. **Marian DOBRY**  
*Politechnika Poznańska*

prof. **Wiktor FRID**  
*Royal Institute of Technology in Stockholm – Sweden*

dr inż. **Tomasz GAŁKA**  
*Instytut Energetyki w Warszawie*

prof. **Len GELMAN**  
*Cranfield University – England*

prof. dr hab. inż. **Jan KICIŃSKI**  
*IMP w Gdańsku*

prof. dr hab. inż. **Jerzy KISIŁOWSKI**  
*Politechnika Warszawska*

prof. dr hab. inż. **Daniel KUJAWSKI**  
*Western Michigan University – USA*

prof. dr hab. **Wojciech MOCZULSKI**  
*Politechnika Śląska*

prof. dr hab. inż. **Stanisław NIZIŃSKI**  
*UWM w Olsztynie*

prof. **Vasyl OSADCHUK**  
*Politechnika Lwowska – Ukraine*

prof. dr hab. inż. **Stanisław RADKOWSKI**  
*Politechnika Warszawska*

prof. **Bob RANDALL**  
*University of South Wales – Australia*

prof. dr **Raj B. K. N. RAO**  
*President COMADEM International – England*

prof. **Vasily S. SHEVCHENKO**  
*BSSR Academy of Sciences Mińsk – Belarus*

prof. **Menad SIDAHMED**  
*University of Technology Compiègne – France*

prof. dr hab. inż. **Tadeusz UHL**  
*AGH w Krakowie*

prof. **Vitalijus VOLKOVAS**  
*Kaunas University of Technology – Lithuania*

prof. dr hab. inż. **Andrzej WILK**  
*Politechnika Śląska*

dr **Gajraj Singh YADAVA**  
*Indian Institute of Technology – India*

prof. **Alexandr YAVLENSKY**  
*J/S Company "Vologda Bearing Factory" – Russia*

prof. dr hab. inż. **Bogdan ŻÓŁTOWSKI**  
*UTP w Bydgoszczy*

#### WYDAWCA:

**Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej**  
**02-981 Warszawa**  
**ul. Augustówka 5**

#### REDAKTOR NACZELNY:

prof. dr hab. inż. **Ryszard MICHALSKI**

#### SEKRETARZ REDAKCJI:

dr inż. **Sławomir WIERZBICKI**

#### CZŁONKOWIE KOMITETU REDAKCYJNEGO:

dr inż. **Krzysztof LIGIER**

dr inż. **Paweł MIKOŁAJCZAK**

#### ADRES REDAKCJI:

**UWM w Olsztynie**  
**Redakcja Diagnostyki**  
**ul. Oczapowskiego 11**  
**10-736 Olsztyn**  
**Poland**  
**tel.: 089-523-48-11, fax: 089-523-34-63**  
**www.uwm.edu.pl/wnt/diagnostyka**  
**e-mail: diagnostyka@uwm.edu.pl**

#### KONTO PTDT:

**Bank PEKAO SA O/Warszawa**  
**nr konta: 33 1240 5963 1111 0000 4796 8376**

**NAKLAD: 350 egzemplarzy**

## Spis treści / Contents

Valentyn SKALSKY, Oleh SERHIYENKO, Tetiana SELIVONCHYK, Yaroslav TOLOPKO – National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv .....	3
<i>Calculation And Optimization Of Waveguide Geometry For Acoustic Emission Signals</i>	
Marek FIDALI, Grzegorz URBANEK – Silesian University of Technology.....	7
<i>Optimization Of A Set Of Thermovision Image Features With The Use Of Evolutionary Algorithms</i>	
<i>Optymalizacja zbioru cech obrazów termowizyjnych z zastosowaniem algorytmów ewolucyjnych</i>	
Dominik WACHLA – Silesian University of Technology .....	13
<i>A Framework For Knowledge Acquisition System In Perspective View Of Diagnostic Of Rotating Machinery</i>	
<i>System pozyskiwania wiedzy z perspektywy diagnostyki maszyn wirnikowych</i>	
Jerzy BRZÓZKA – Maritime University of Szczecin .....	17
<i>MFC/IMC Scheme As A Fault Tolerant Control Structure</i>	
<i>Odporny na uszkodzenia układ regulacji typu MFC/IMC</i>	
Przemysław SIMIŃSKI, Maciej ZAJĄC – Military Institute of Armour and Automotive Technology in Sulejówce.....	25
<i>Simulation Model For Testing Patrol-Intervention Vehicle</i>	
<i>Model symulacyjny do badań samochodu patrolowo-interwencyjnego</i>	
E. GRUDZIŃSKI – Wrocław University of Technology, P. DUB, P. DRABYCH, L. DYKMAROVA, V. NICHOGA – Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, L. SOPILNYK – Lviv Polytechnic National University.....	29
<i>Application Of Alternating Electromagnetic Fields In Technical Diagnostics Of Engineering Objects Of Long-Term Usage</i>	
Piotr PRZYSTAŁKA – Silesian University of Technology .....	33
<i>Fault Detection And Isolation For Dynamic Processes Using Recurrent Neural Networks</i>	
<i>Detekcja i lokalizacja uszkodzeń procesów dynamicznych z użyciem sieci rekurencyjnych</i>	
Zenon SYROKA – Uniwersytet Warmińsko – Mazurski w Olsztynie .....	41
<i>The Pattern Spectrum Of The Electrical Machine With Using Classical Discrete Orthogonal Polynomials</i>	
<i>Wzorec widmowy maszyny elektrycznej z wykorzystaniem klasycznych dyskretnych wielomianów ortogonalnych</i>	
Piotr BIELAWSKI – Maritime University of Szczecin.....	45
<i>Condition Monitoring Of Marine Power Plants</i>	
<i>Diagnostyka silowni okrętowych</i>	
Marek FIDALI, Anna TIMOFIEJCZUK – Silesian University of Technology .....	49
<i>Assessment Of Welded Joints Quality By Means Of Analysis Of Their Thermovision Images Recorded During Welding Process</i>	
<i>Ocena jakości połączeń spawanych na podstawie wyników analizy obrazów termowizyjnych zarejestrowanych podczas procesu spawania</i>	
Łukasz JEDLIŃSKI, Janusz KISIEL, Józef JONAK – Lublin University of Technology .....	57
<i>Diagnosing The Condition Of Gear Transmission On The Basis Of Periodic And Residual Components Of The Signal Spectrum</i>	
<i>Diagnozowanie stanu przekładni zębatej w oparciu o składowe okresowe i widmo resztkowe sygnału</i>	
Jacek DZIURDŹ, Wojciech SKÓRSKI – Warsaw University of Technology .....	63
<i>Analysis Of Nonlinear Effects In Diagnostics Of Composite Structures</i>	
<i>Analiza zjawisk nieliniowych w diagnozowaniu konstrukcji kompozytowych</i>	

Bogusław ŁAZARZ, Henryk MADEJ, Piotr CZECH – Silesian University of Technology.....	67
<i>Taking Advantage Of Empirical Mode Decomposition In Diagnosing Gear Faults</i>	
<i>Wykorzystanie empirycznej dekompozycji sygnału w diagnostyce uszkodzeń przekładni zębatych</i>	
Henryk MADEJ, Piotr CZECH – Silesian University of Technology.....	73
<i>Diagnostics Of Clearance In The Piston-Cylinder Assembly Using Hoelder Coefficients</i>	
<i>Diagnozowanie luzu w układzie tłok-cylinder z wykorzystaniem współczynników Hoeldera</i>	
Leszek MAJKUT – Akademia Górniczo – Hutnicza.....	79
<i>Vibration Based Damage Detection Using Laplace Wavelet</i>	
<i>Wykorzystanie falki Laplace'a w diagnostyce uszkodzeń</i>	
Łukasz KONIECZNY, Rafał BURDZIK – Silesian University of Technology.....	83
<i>The Influence Of Oil Leak In Vehicle Shock Absorber On Its Dumping Characteristics</i>	
<i>Wpływ ubytku oleju w amortyzatorze samochodowym na jego charakterystyki tłumienia</i>	
Joanna WILCZARSKA – Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy.....	87
<i>The Implementation Of The Methodology Of The Machines' State Genesis</i>	
<i>Implementacja metodyki genezowania stanu maszyn</i>	
Joanna WILCZARSKA – Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy.....	93
<i>Model Of Machine State Genesis</i>	
<i>Model genezowania stanu maszyn</i>	
Sławomir AUGUSTYN – National Defence University.....	97
<i>Decisional Model For Aircraft Safe System</i>	
<i>Model decyzyjny dla bezpieczeństwa eksploatacji lotniczej</i>	
Tomasz FIGLUS, Andrzej WILK – Politechnika Śląska.....	101
<i>Diagnosis Of Transmission Tooth Chipping Using Discrete Wavelet Transformation</i>	
<i>Diagnozowanie wykruszenia zęba przekładni przy użyciu dyskretnego rozkładu falkowego</i>	
Andrzej GĘBURA, Tomasz TOKARSKI – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych w Warszawie.....	105
<i>Diagnosis By FAM-C Method Of A Support's Bearings Turbine Engine</i>	
<i>Diagnozowanie metodą FAM-C podpór łożyskowych lotniczego silnika turbinowego</i>	
Radosław ZIMROZ – Politechnika Wroclawska.....	113
<i>Application Of Wavelet Analysis Diagnostics Of Local Faults In Driving Units Of Mining Machines</i>	
<i>Zastosowanie analizy falkowej w diagnostyce uszkodzeń lokalnych układów napędowych maszyn górniczych</i>	
Lesław BĘDKOWSKI, Tadeusz DĄBROWSKI – Wojskowa Akademia Techniczna.....	123
<i>Uncertainty In Processes Of Diagnosing And Supervising</i>	
<i>Niepewność w procesach diagnozowania i dozoru</i>	
Warto przeczytać / Worth to read.....	130

## CALCULATION AND OPTIMIZATION OF WAVEGUIDE GEOMETRY FOR ACOUSTIC EMISSION SIGNALS

Valentyn SKALSKY, Oleh SERHIYENKO, Tetiana SELIVONCHYK, Yaroslav TOLOPKO

H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Naukova Str 5., Lviv, 79601, Ukraine, [skal@ipm.lviv.ua](mailto:skal@ipm.lviv.ua)

### Summary

Optimization of geometrical sizes of the waveguide of elastic acoustic emission (AE) waves, which is used in the search of hydrogen induced cracking during thermal cycling of structure alloys in a gaseous hydrogen environment, is considered. A waveguide is considered as an acoustic system that has the discrete spectrum of eigenfrequencies. Distribution of temperature field along the waveguide is calculated, decay of elastic AE waves is estimated. Basing on the obtained results the design implementation of the waveguide is carried out.

Keywords: acoustic emission, finite elements method, waveguide, energy losses, temperature distribution.

### 1. INTRODUCTION

In investigation of physical and chemical properties of materials and goods by the method of acoustic emission (AE) we often face a situation, when location of AE transducer (AET) onto the tested object (TO) is impossible because of some reasons. In such cases, it is reasonable to use waveguides of AE signals, which typically have a cylindrical form. One face of the waveguide is attached to the TO and on the opposite face, the AET is located. However, waveguides as acoustic systems have the discrete spectrum of their eigenfrequencies. As a result, the broadband AE signal from a source, passing through a waveguide, changes: the spectral components of a signal, which correspond to eigenfrequencies of waveguide oscillations, will increase and others will decay. Therefore, it is important that the geometrical parameters of the waveguide could provide the compliance of its eigenfrequencies with the operating band of AET.

### 2. CALCULATION OF WAVEGUIDE EIGENFREQUENCIES

The problem of elastic waves propagation in cylindrical bodies was considered particularly in references [1-3]. In the paper [4] the approximation method based on the limiting interpolation method [5] for finding the eigenfrequencies was proposed. According to this method, the limiting cases of interpolation are exactly taken into account, and approximation parameters could be found at certain intermediate points of the functional dependences obtained for these limiting cases. The essence of the method of optimization of waveguide sizes consists in the following. At first, taking into consideration the structural parameters or requirements of the TO operation, the length  $l$  and the diameter  $d$  of the waveguide are to be specified. If the ratio of  $l/d$  is in the range from 0.3 to 3, the intricate three-

dimensional problem has to be solved for finding the eigenfrequencies  $f_{pq}$  of the waveguide. Using the approximation equation obtained in [4] we can find the eigenfrequencies in simpler manner:

$$f_{pq} = 0.32 \frac{c_2 \alpha_{pq}^{(d)} \alpha_{pq}^{(d,\infty)} \alpha_{pq}^{(r)}}{l \left\{ \left[ \alpha_{pq}^{(d,\infty)} - \alpha_{pq}^{(d)} \right] \alpha_{pq}^{(r)m} + \left( \alpha_{pq}^{(d,\infty)} \alpha_{pq}^{(d)} \right)^m \right\}^{1/m}} \quad (1)$$

where  $p$  and  $q$  are the integers,  $c_2$  is the velocity of transversal wave,  $\alpha_{pq}^{(d)}$  is the phase constant, which is determined from the solution of the system of transcendent eigenvalue equations for a disk,  $\alpha_{pq}^{(d,\infty)}$  is the value of  $\alpha_{pq}^{(d)}$  for the case  $l/d \gg 1$ ,  $\alpha_{pq}^{(r)}$  is the phase constant, which is determined from the solution of the system of transcendent eigenvalue equations for a rod,  $m$  is the approximation parameter. Selecting according to approximation equation (1) the least from the values of  $f_{pq}$ , we find the AET dimensions with the proper operating band.

In the case  $l/d > 3$ , instead of equation (1) we can use the dependence for finding  $f_{pq}$  [6]:

$$f_{p,q} = (c_2 q \sqrt{x/2}) l^{-1} \quad (2)$$

where  $x = c^2 / c_0^2 (1 + \nu)$ ,  $c_0 = \sqrt{E/\rho}$  is the sound velocity in a bar,  $c$  is the phase velocity,  $\nu$  is the Poisson's ratio. Here  $q$  is a positive odd integer, related with the wavelength.

Approximation equation (1) obtained in [4] allows to estimate the eigenfrequencies of cylinder waveguide of a finite length, exactly taking into account the limiting cases of interpolation: short rod (disk) and long rod, whose eigenfrequencies are known [6]. However, if the waveguide has more complicated shape the numerical methods of calculation have to be used, in particular the finite element method (FEM) [7].

Having calculation data on eigenfrequencies of the waveguide, we may optimize its geometry taking into account temperature operating range

and structural features of TO using the methodological approach described in the papers [8, 9].

The FEM calculation of eigenfrequencies and corresponding vibration modes of the waveguide we realized using the approach method described in the paper [8]. In this case, the equation for calculation of the eigenfrequencies takes the form:

$$(x-1)^2 \varphi(h'a) + (1-ex)[x - \varphi(k'a)] = 0, \quad (3)$$

where  $\varphi(y) = \frac{yJ_0(y)}{J_1(y)}$ ,  $e = \frac{1-2\nu}{1-\nu}$ ,  $h' = h^2 - \gamma^2$ ,

$$k' = k^2 - \gamma^2, \quad h = \omega c_1, \quad k = \omega c_2, \quad J_0(\cdot) \text{ i } J_1(\cdot)$$

are the Bessel functions of first kind of the zero and first order, respectively,  $c_1$  and  $c_2$  are the velocities of longitudinal and transversal waves, respectively,  $\omega$  is the angular frequency,  $a$  is the radius of the waveguide,  $2l$  is its length. Taking into consideration that the cylinder is bounded by two plane surfaces, the distance between which is  $2l$ , the legitimate values of  $\gamma$  are  $\gamma_q = \frac{\pi q}{2l}$ , where  $q$  is the positive odd number.

The design features of the chamber, in which we investigated the effect of environment on AE signals, imposed the condition that the length of the waveguide is not greater than 0,5 m and the diameter is 4 mm. Using equation (3) eigenfrequencies were found from the following formula:

$$f_{pq} = \frac{\pi q}{2} \sqrt{x_p/2} \frac{c_2}{l}, \quad (4)$$

where  $x_p$  is the solution of equation (3).

The eigenfrequency  $f_{pq}$  of the first mode ( $p = q = 1$ ) of the oscillation, obtained from (4) for  $\nu=0,28$ , Young's modulus  $E=2.07 \times 10^5$  MPa,  $\rho = 7800$  kg/m<sup>3</sup>,  $a = 0,002$  m and  $l = 0.43$  m was 2995 Hz.

The FEM calculation of the eigenfrequency  $f_{pq}$  of the first mode ( $p = q = 1$ ) of cylinder waveguide conducted for the same values of the Poisson's ratio, Young's modulus, density, radius and the length of a cylinder gives the value of 2967 Hz. Thus, the relative error of FEM calculation in comparison with (4) does not exceed 0.93%.

We conducted the FEM calculation using three-dimensional finite elements with 20 nodes. The cylinder was divided along its generating line by 14, along the radius of the base by 5 and along the contour of the base by 8 parts. The two times increase of the mesh density gave the relative error of the fundamental frequency calculation of 0.43%. Therefore this meshing we used in further FEM calculations.

Similar FEM calculations were conducted also for the waveguide shown in Fig. 1. The one end of the waveguide was attached to the specimen and AET was located on the free end. The waveguide length was 0.43 m. The increase of number of the nodes in two times gave the relative error of the found eigenfrequencies, which did not exceed 3.42% in the frequencies range of 200 – 450 kHz

corresponding to the operating band of AET used in experimental research for AE recording. The total number of found eigenfrequencies in this range was 247.

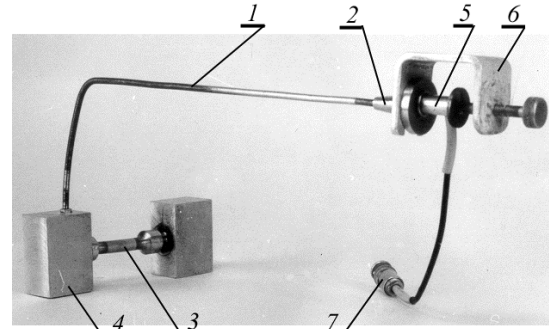


Fig. 1. General view of the waveguide for recording AE: 1 is the waveguide, 2 is the concentrator, 3 is the specimen of structural material, 4 is the clamp, 5 is AET, 6 is the clamp, 7 is the plug

Distribution of the dimensionless normal displacement on the face of the waveguide for  $f = 4,07 \times 10^5$  Hz is shown in Fig. 2.

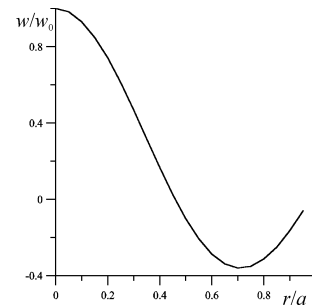


Fig. 2. Distribution of the dimensionless normal displacement on the waveguide face for  $f = 4,07 \times 10^5$  Hz

Fig. 2 shows that the maximal value of the dimensionless normal displacement is at the center of the waveguide face.

### 3. EXPERIMENTAL DETERMINATION OF LOSSES IN THE WAVEGUIDE

Elastic waves propagation in a solid occurs with the losses of energy caused by physical processes, which accompany elastic oscillations. For estimation of these losses in waveguides in laboratory we conducted the experimental investigation using the method developed in the paper [9]. The experimental setup is shown in Fig. 3.

The cylindrical rod made of steel 45 (state of delivery) with the diameter of 4 mm and the length of 0.43 m was used as an AE waveguide.

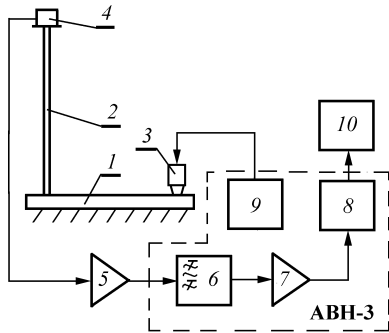


Fig. 3. Experimental setup for determination of losses in a waveguide: 1 is the base, 2 is the waveguide, 3 is the sound-simulator of AE, 4 is the AET, 5 is the preamplifier, 6 is the filter bank, 7 is the power amplifier, 8 is the processing unit, 9 is the generator of electric pulses, 10 is the fast-acting recorder

The sound-simulator was used as an AE source [10]. It was mounted with the glue layer on the duralumin base of the dimensions 0.6×0.6×0.04 m at different distances from the waveguide face. The AE pulses were excited by an electric pulse of rectangular shape generated by the simulation unit contained in the AVN-3 device. One face of the waveguide was rigidly attached to the base and on the opposite waveguide face the AET was located. It had resonance frequency of 255 kHz. Electric AE signals from AET were transmitted through the preamplifier, the filter bank of high and low frequencies, the power amplifier to the signal processing unit. The AE signal parameters, namely amplitudes, cumulative count, and total count rate, were recorded on paper by the fast-acting recorder [1]. Comparing amplitudes of initial AE signals with the recorded ones, we measured the losses in the waveguide. The amplification factor of the AE signal path was 70 dB (amplification factor of the preamplifier was 34 dB) in the frequency range 120...560 kHz, and the transfer constant of filters was nearby one.

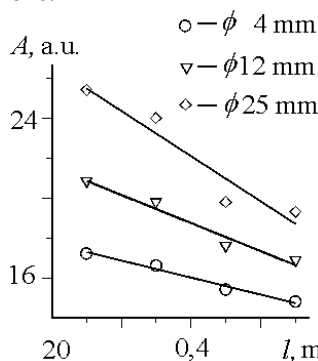


Fig. 4. Dependence of amplitude of elastic AE waves changes on the diameter of waveguide and distance to the source of simulation

The results of experiments have shown that the losses in the waveguide were 2.4...3.2 % in the case of the elastic AE waves simulation near the waveguide face, which is rigidly attached to the

base. In Fig. 4 variation of AE amplitudes, depending on the distance to the source of AE simulation and the diameter of the waveguide, is presented. Fig.4 shows that for identical lengths of the waveguide the greater losses in the elastic AE waves were observed for the greater distances to the source and the diameter of the waveguide.

Thus, application of AE waveguides requires to take into account the losses of AE signals and to select AET with lower resonance frequencies, which lie in the calculated range of a waveguide eigenfrequencies.

#### 4. ESTIMATION OF LENGTHWISE DISTRIBUTION OF WAVEGUIDE TEMPERATURE FIELD

Optimization of the waveguide dimensions is closely connected with the account of temperature field effect on the operating part of AET. Let us consider the case of the cylinder rod, which one face contacts with TO heated to the stationary temperature and a lateral surface is surrounded by air of temperature  $T_a$ . If we suppose that a heat interchange between a waveguide and environment is quasi-static, then temperature  $T$  at the surface is determined by the equation [11]:

$$T = (T_0 - T_a)ch \left[ \frac{\sqrt{2l/\lambda R} (l-x)}{\sqrt{2l/\lambda R} l} + T_a \right] \quad (5)$$

where  $T_a$  is the temperature of air,  $\alpha$  is the calorific efficiency,  $\lambda$  is the heat conductivity,  $R$  is the waveguide radius,  $l$  is its length,  $x$  is the running coordinate of the waveguide length.

When the external heat interchange takes the form of natural convection of air, the calorific efficiency can be found from the dependence:

$$\alpha = 0.47\lambda_a \sqrt{\frac{g\beta(T - T_a)}{2R\nu^2}} \quad (6)$$

where  $\lambda_a$  is the heat conductivity of air,  $g$  is the acceleration of gravity,  $\beta$  is the linear expansion factor of air,  $T$  is the average temperature along a rod,  $\nu$  it is kinematics viscosity of air. The temperature of "cold" end of cylinder rod, i.e. the place, where the AET is located, according to [11] is determined as follows:

$$T_c = (T_0 - T_a) \left[ ch\sqrt{2l/\lambda R} \right]^{-1} + T_a \quad (7)$$

The main assumptions of the problem definition are the following:  $\lambda = \text{const}$ ,  $\alpha(T) = \alpha(T_a)$  and  $T_a$  is independent on spatial coordinates. The results of numerical calculation of temperature condition of the waveguide made of steel 45 (state of delivery) are shown in Fig.5 (dotted line).

Fig. 5 shows that the function  $T_c(l)$  rapidly falls with the increase of the waveguide length.

In Fig. 5b the results of FEM calculation of temperature field in the waveguide shown in Fig. 1 for the same values of temperature of hot end of the waveguide and air as in Fig. 5a are presented.



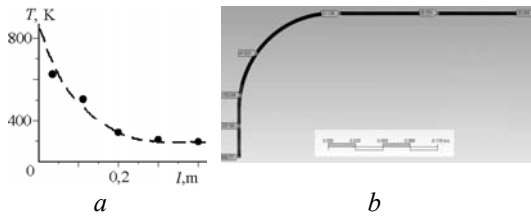


Fig. 5. Theoretical (dotted line) and experimental (dots) results of temperature distribution along waveguide (a) and FEM calculation ( $^{\circ}\text{C}$ )(b)

Summarizing, we may notice that reduction of waveguide length due to design reasons is possible only with the simultaneous decrease of its diameter, heat conductivity of material or both factors together.

## 5. CONCLUSIONS

Optimization of AE waveguide dimensions should be conducted using the calculation of its response characteristics and their comparison with the corresponding characteristics of AET, taking into account the distribution of temperature field along the waveguide and design features of diagnostic access to the location of AET on TO surface.

Configuration and geometrical sizes of a waveguide should provide reliable protection of AET against harmful influence of temperature on its operating part. The waveguide length should provide least decay of elastic AE waves.

Information on material fracture obtained from elastic AE waves should be processed with the account of their losses in waveguides.

## REFERENCES

- [1] Skalsky V. R., Koval P. M.: *Acoustic emission in fracture of materials, wares and structures. Methodological aspects of selection and processing of information.* Lviv, Spolom, 2005.
- [2] Imenitova V., Chernyshev B. V., Shegai V. V.: *On the calculation of free vibrations of elastic cylinders of finite length* Reports of Academy of Sciences of USSR. 1976, Vol.226, No2, P. 315.
- [3] Grinchenko V. T.: *Equilibrium and steady-state vibration of elastic bodies of finite sizes.* Kiev, Naukova Dumka, 1978.
- [4] Lysak M. V., Skalsky V. R., Serhiyenko O. M.: *Investigation of waveguide effect on the change in parameters of acoustic emission signals.* Physico-chemical mechanics of materials. 1994, No2, P. 64.

- [5] Andreykiv A. E.: *Spatial problems of crack theory.* Kiev, Naukova Dumka, 1982
- [6] Kikuchi E.: *Ultrasonic transducers* Moscow, Mir, 1972.
- [7] Zinkevich O. K.: *Finite element method in engineering.* Moscow, Mir, 1975.
- [8] Skalsky V. R., Koval P. M., Serhiyenko O. M., Lototsky Yu. L.: *Research of hardening of concrete using the signals of acoustic emission.* Physico-chemical mechanics of materials, 2004, No5, P.104.
- [9] Skalsky V. R.: *Some methodological grounds of devise development for transferring acoustic emission,* Engineering Science, 2001, No7, P.49.
- [10] Skalsky V. R., Augutis V. N., Vainman A. B.: *Devices for selection of acoustic emission signals,* Proc. of Karpenko Physico-Mechanical Institute of National Academy of Sciences of Ukraine "Physical methods and devices for testing environments, materials and wares", Kyiv – Lviv, 2001. Vol.6, P. 77.
- [11] Tripalin A. S., Builo S. I.: *Acoustic emission: Physico-mechanical aspects.* Rostov-on-Don: Publ. House of Rostov State University, 1986.

**Valentine SKALSKY**, Dr. Sci (Engineering Sciences), the head of department "Acoustic emission diagnostics of structural elements" of



Karpenko Physico-mechanical Institute of National academy of Sciences of Ukraine. He is the author over 230 papers in area of technical diagnostics and nondestructive testing of materials and structural elements.

**Oleh SERHIYENKO**, PhD. (mathematics and physics) the senior research fellow of department "Acoustic emission diagnostics of structural elements" of



Karpenko Physico-mechanical Institute of National academy of Sciences of Ukraine. He is the author over 140 papers in area of fracture mechanics, technical diagnostics and non-destructive testing.



## OPTIMIZATION OF A SET OF THERMOVISION IMAGE FEATURES WITH THE USE OF EVOLUTIONARY ALGORITHMS<sup>1</sup>

Marek FIDALI, Grzegorz URBANEK

Silesian University of Technology, Department of Fundamentals of Machinery Design  
44-100 Gliwice ul. Konarskiego 18a, tel (032) 237 10 63, fax (032) 237 13 60, [marek.fidali@polsl.pl](mailto:marek.fidali@polsl.pl)

### Summary

Extraction of diagnostic information from the thermovision images is connected with analysis and evaluation of a huge amount of different diagnostic features which could cause problems with efficient assessment of technical state due to informational noise. In the paper, application of an evolutionary algorithm for optimization of a set of diagnostic features has been presented. In the case of assessment of selected optimal features, neural classifier has been used. A set of 259 features has been considered. Classification results have shown that the evolutionary algorithm can be applied in selection of relevant diagnostic features. Efficiency of classifier has come to more than 92%.

Keywords: diagnostics, infrared thermography, evolutionary algorithms, neural networks.

### OPTYMALIZACJA ZBIORU CECH OBRAZÓW TERMOWIZYJNYCH Z ZASTOSOWANIEM ALGORYTMÓW EWOLUCYJNYCH

### Streszczenie

Ocena stanu technicznego maszyn na podstawie obrazów termowizyjnych wymaga ich analizy i wyznaczenia zwykle dużej liczby różnych cech diagnostycznych, które mogą utrudniać efektywną diagnozę ze względu na szum informacyjny. W artykule przedstawiono zastosowanie algorytmu ewolucyjnego do optymalizacji zbioru 259 cech diagnostycznych. Do oceny zoptymalizowanego zbioru cech posłużono się klasyfikatorem neronalnym. Wyniki klasyfikacji potwierdzają przydatność zastosowania algorytmów ewolucyjnych do wyboru cech relewantnych. Sprawność klasyfikacji była większa niż 92%.

Słowa kluczowe: diagnostyka, termowizja, algorytmy ewolucyjne, sztuczne sieci neuronowe.

## 1. INTRODUCTION

Thermographic measurements are broadly applicable in maintenance and assessment of technical states of machinery and apparatus as well as industrial processes [9]. Technological progress and decreasing prices of industrial thermovision cameras have made the application of such apparatus possible to be used in continuous monitoring and identifying of states of machines and devices [15].

During continuous thermovision monitoring, a huge amount of images is recorded. These thermograms have to be analyzed in the case of extraction of diagnostic information.

There are a lot of image analysis methods [7], [11]. Most of the existing methods can be applied in thermogram analysis [17] and provide useful diagnostic information which allows to improve and automate the diagnostic process.

As a result of thermovision image analysis, a huge amount of features (parameters) could be extracted.

On the basis of results of the research reported in literature [4], [8], it can be stated that a large set of diagnostic features can be a source of ambiguities in estimation of technical state due to informational noise. Redundancy as well as differences between diagnostic features cause determination of reasonably small size of the feature set for diagnostic purposes to be very difficult. In the case of limitation of features set, a variety of different methods can be used [4]. The evolutionary algorithm can serve as an example of such a method. These algorithms are very efficient at searching and optimizing multidimensional sets of features, which has been confirmed by different applications [6], [13], [16].

In the paper, the application of an evolutionary algorithm for the optimization of a set of statistical features extracted from thermovision images recorded during continuous observation of rotating machinery is presented.

---

<sup>1</sup> Scientific work financed from resources assigned to science in the years 2007-2009 as a research project.

## 2. ACQUISITION AND ANALYSIS OF THERMOVISION IMAGES

In the case of continuous diagnostics of machinery, a concept of a monitoring system based on recorded and analyzed thermovision images has been proposed.

During continuous object observation with the use of a thermovision device, a sequence of thermographic images in time  $t$  can be recorded. A single thermographic image can be treated as a discrete function of temperature values of two variables  $T(x,y)$ , where  $x$  and  $y$  are coordinates of coordinate system determining spatial resolution of the image [9], [17].

On the basis of acquired series of thermograms, a multidimensional thermographical signal  $ST(T(x,y),t)$  can be defined. If we consider a concept [3] of conventional real time partition into "micro" (dynamic) and "macro" (operation) time which is frequently applied in machine diagnostics [2], [8], then the thermographic signal can be defined in these both domains.

Having taken "micro" and "macro" time concepts into account, the process of analysis of thermographic signals can be divided into two stages. The first stage is connected with thermogram analysis and feature extraction. It has enabled us to determine diagnostic signals in "micro" and/or "macro" time (Fig. 1).

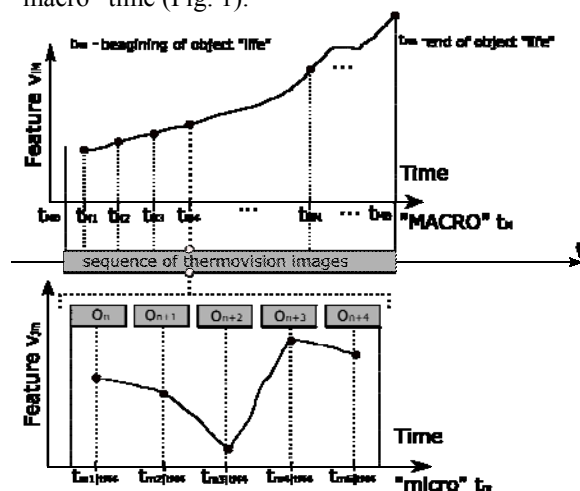


Fig. 1. Idea of analysis of thermographic signal in both "micro" and "macro" time domains

The second stage of analysis refers to analysis of diagnostic signals which were determined at the first stage. For these purposes, classical signal analysis methods can be applied.

Analysis of plots of parameters in „micro" as well as „macro" time could allow us to detect early machine failures and draw up prognoses related to a period of safe operation. During this period, all repair procedures could be prepared.

Continuous thermovision diagnostics of objects is connected with conduction of necessary and systematic actions consisting in extracting of diagnostic data which are decoded in recorded

thermographic images. In order to obtain relevant diagnostic information, proper methods of thermographic image processing should be applied.

### 2.1. Methods of thermovision image analysis

Image analysis is a wide domain of science which includes a lot of different kinds of methods. These methods are described in a variety of papers [7], [11], [17]. One of the well known groups of image analysis methods is a method dedicated to digital-image texture analysis [10], [11].

The major issue in texture analysis is feature extraction. This operation allows us to compute characteristics of a digital image which enables numerical description of its texture properties. Feature extraction is the first stage of image texture analysis. This stage can also be used for thermovision images and the obtained results can be applied in such approaches as image discrimination, classification or object shape determination.

Statistical methods, which can be enumerated among different methods of texture analysis, make it possible to represent the texture indirectly by non-deterministic properties that determine the distributions and relations between grey levels of an image [11].

Statistical methods allow us to define features of an image on the basis of different statistical characteristics calculated from [10]:

- histogram of an image.
- gradient matrix.
- run-length matrix.
- co-occurrence matrix.
- autoregression model.

### 2.2. Active diagnostic experiment

In order to verify usefulness of statistical methods for the analysis of thermovision images as well as for machinery diagnostics, an active diagnostic experiment has been carried out. The experiment has been performed with the use of a laboratory stand. The stand is located in the Laboratory of Technical Diagnostics of Department of Fundamentals of Machinery Design and consists of a laboratory model of rotating machinery and thermovision system (Fig. 2).

The aim of the experiment was to acquire thermographic signals. As a result of diagnostic experiments, series of thermograms recorded during object operation in different technical states have been obtained.

Thermographic images have been acquired during thermovision observations every 30 seconds. The total number of recorded images came to 840. The machine was working with rotation speed equal to 1150 rpm.

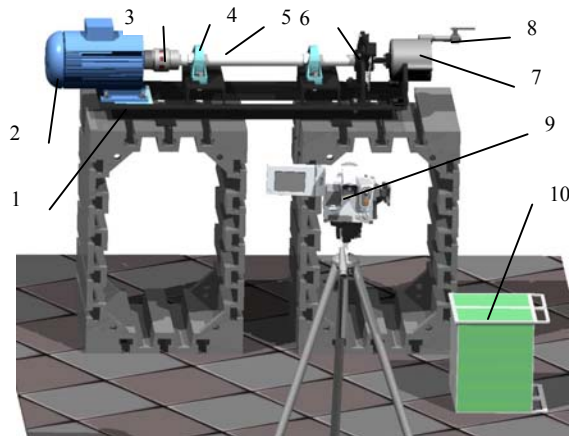


Fig. 2. Visualization of laboratory stand  
1-frame, 2-rotor, 3-coupling, 4-bearings set, 5-shaft,  
6-break set, 7- air pump, 8- throttle valve,  
9-thermovision camera, 10-motor controller

The following technical states were simulated during machine operation:

- S1 – machine without faults – 240 images
- S2 – 50% throttling of air pump - 120 images
- S3 – 90% throttling of air pump – 120 images
- S4 - 90% throttling of air pump + clearance of second bearing mounting – 120 images
- S5 – load of disk brake – 120 images
- S6 – faulty bearing no 2– 120 images.

### 2.3. Estimated features of thermovision images

Recorded thermovision images have been analyzed with the use of selected statistical texture analyses. In this case, specialized software MaZda dedicated to calculation of texture parameters (features) in digitized images has been applied. MaZda was originally developed in 1996 at the Institute of Electronics, Technical University of Lodz (TUL), Poland for mammogram analysis [15].

The software is able to analyze gray scale digital images with separated regions of interest and extract up to 259 different statistical parameters (features). Ever since, in the case of thermogram analysis, it was necessary to separate regions of interest (ROI) in the images. Five regions of interest have been defined (Fig. 3).

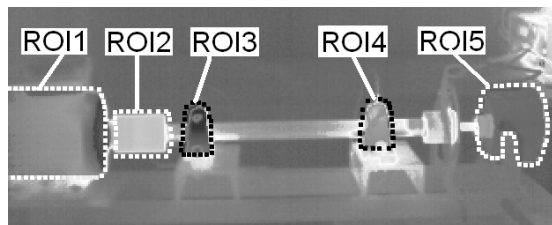


Fig. 3. Exemplary thermographic image with selected regions of interest (ROI)  
ROI 1 – motor, ROI 2 – coupling, ROI 3 – bearing no1, ROI 4 – bearing no2, ROI 5 – pump  
For each region of interest (ROI) of every recorded image, 259 features have been extracted.

The following features [10][11] have been taken into consideration:

- 9 features estimated on the basis of histogram of the image (mean, variance, skewness, kurtosis and five histogram percentiles for 1%, 10%, 50%, 90%, and 99%),
- 5 features estimated on the basis of gradient matrix (absolute gradient mean, variance, skewness, kurtosis, and percentage of non-zero gradients),
- 220 features estimated on the basis of co-occurrence matrix. (11 features calculated for matrices constructed for five distances between image pixels ( $d=1, 2, 3, 4$  and  $5$ ), and for the four directions as in the case of run-length matrix features),
- 20 features estimated on the basis of run length matrix (short run emphasis inverse moment, long run emphasis moment, gray level nonuniformity, run length nonuniformity and fraction of image in runs, separately for horizontal, vertical,  $45^\circ$  and  $135^\circ$  directions)
- 5 features estimated on the basis of autoregressive model parameters ( $\theta_i, i=1, \dots, 4$  selected pixel-to-pixel relation, noise standard deviation)

### 3. OPTIMIZATION OF A SET OF THERMOGRAPHIC IMAGE FEATURES

In the case of the proposed diagnostic method based on thermographic images, it is important to find such relevant features of images that can be applied in an effective manner for the evaluation of machine technical state. This is not a simple task due to a large set of features which can be extracted from the image with the use of statistical methods of image analysis. Therefore it is important to identify a limited set of relevant and optimal diagnostic features.

There are a few ways of limitation of a set of features. One of the effective but time consuming methods is comprehensive searching. Good results in optimization of feature space can be obtained on the basis of discriminant analysis, and, in particular, extended Fisher's criterion [4], [5]. Another way which provides very good results is the application of evolutionary algorithms [6], [16]. As opposed to the known feature selection methods, evolutionary algorithms are able to search for an optimal set of features among the whole feature set. The advantage of this strategy manifests itself in the fact that features are estimated in a global manner which allows consideration of relation between features [16].

The evolutionary algorithms have been applied to optimize features set extracted from thermal images which were recorded during machine operation. The type and number of features were selected by the evolutionary algorithm (Fig. 4) in an automatic way.

Maximization of efficiency of state classifier has been used as an optimization criterion. Classification of technical state has been performed with the use of neural networks implemented in the algorithm.

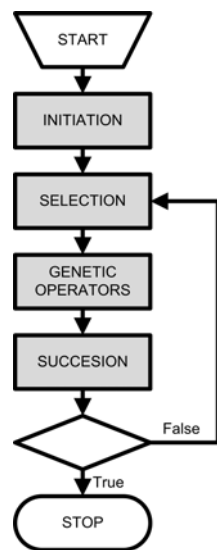


Fig. 4. Scheme of an evolutionary algorithm

It has been assumed that the population consists of 30 individuals. The genotype of an individual is a binary vector with 259 bits. Each of these bits corresponds to one of considered features. When the value of the  $x$  bit is 1, it means that feature No.  $x$  is selected for optimal features set. The phenotype of the individual is the classifier identified for features whose identifiers are in the genotype. The classifier is a neural network (section 3.1)

The value of fitness function for an individual is the efficiency of the classifier.

The algorithm uses four operators [6], [13]:

- proportional selection,
- two-point crossover (features replacement),
- uniform mutation,
- elitist succession.

For the algorithm, the following two termination conditions have been determined:

- achieving 1000 generations or,
- achieving 500 generations without increasing the value of fitness function.

### 3.1. Neural network classifier

In the case of machine technical state classification, a neural network has been applied as a state classifier. The considered neural network has a simple structure due to a small number of learning examples. On the basis of publication [1], [8], it is assumed that a total number of network parameters should amount to less than 1/5 of the number of learning examples. A structure as well as parameters of neural networks have been shown in Fig. 5. The network has 3 layers: input ( $L_{in}$ ), hidden ( $L_1$ ) and output ( $L_{out}$ ). All neurons in input layer have

input weights values=1 and biases values=0. Parameters of neurons of hidden and output layers have been determined as a result of network training. Training of the network has been conducted with the use of general purpose, scaled conjugate gradient backpropagation algorithm [12].

The efficiency of the classification has been assessed by means of calculation of a relative number of correctly classified examples:

$$eff = \frac{l_1}{l_w} \cdot 100\% \quad (1)$$

where:  $l_1$  – number of correctly classified examples,  $l_w$  – number of all classified examples.

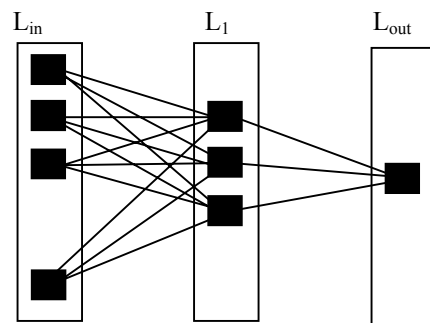


Fig. 5. The structure of neural network classifier

Tab. 1. Parameters of neural network

layer	$L_{in}$	$L_1$	$L_{out}$
number of neurons	N (optimal number of features)	3	1
transfer function	linear	log-sigmoid	log-sigmoid

### 3.2. Optimization results

Results of feature space optimization were presented in Tab. 2. For each region of interest, a huge set of 259 features has been limited to no more than 21 features. One can observe that features basing on a co-occurrence matrix were dominant in the optimal set of features. For every considered region of interest, selected features allow for classification of machine technical state with efficiency greater than 92%.

Figure 6 shows plot of selected feature in functions of image numbers. One can observe that in most of the considered ROIs changes of parameters have been correlated with changes of machine technical state. Changes of technical state have been visually detectable for parameters estimated in most of the considered regions of interest. Less sensitive to technical changes was the coupling area (ROI2) where it was difficult to detect technical changes. Coupling was rotated during observation and cooled. It makes small temperature changes during subtle technical state (S1 to S2, S2 to S3, S3 to S4) changes undetectable.

Tab. 2. Results of optimization of thermovision

ROI No	1	2	3	4	5
Classification Efficiency	0,92	0,92	0,94	0,94	0,93
No of features	20	21	18	16	19
Selected features	'S(1,0)SumEntrp' 'S(0,1)Correlat' 'S(0,1)SumOfSqs' 'S(1,1)DifVarnc' 'S(1,1)DifEntrp' 'S(2,0)DifEntrp' 'S(0,2)SumOfSqs' 'S(2,2)SumOfSqs' 'S(2,2)SumAverg' 'S(2,2)DifVarnc' 'S(3,0)DifEntrp' 'S(3,3)AngScMom' 'S(3,3)SumVarnc' 'S(4,4)SumOfSqs' 'S(4,4)DifVarnc' 'S(4,-4)InvDfMom' 'S(4,-4)SumAverg' 'S(5,-5)DifVarnc' '45dgr_RLNonUni' '135dr_RLNonUni'	'S(1,1)Correlat' 'S(1,1)SumOfSqs' 'S(1,1)SumEntrp' 'S(1,-1)Contrast' 'S(2,0)Entropy' 'S(2,2)SumVarnc' 'S(2,-2)Correlat' 'S(2,-2)DifEntrp' 'S(3,3)SumVarnc' 'S(3,3)DifEntrp' 'S(4,0)SumEntrp' 'S(4,0)Entropy' 'S(0,4)SumVarnc' 'S(0,4)Contrast' 'S(0,4)Entropy' 'S(4,-4)SumOfSqs' 'S(0,5)AngScMom' 'S(0,5)SumOfSqs' 'S(5,5)SumOfSqs' 'S(5,-5)SumVarnc' 'Vertl_GLvNonU' '135dr_RLNonUni' 'GrNonZeros' 'Horzl_GLvNonU' 'Vertl_RLNonUni' '135dr_LngREmph'	'S(0,1)DifVarnc' 'S(1,1)DifVarnc' 'S(1,-1)Contrast' 'S(2,0)SumVarnc' 'S(3,0)SumAverg' 'S(3,-3)SumAverg' 'S(3,-3)DifVarnc' 'S(4,0)SumVarnc' 'S(0,4)Contrast' 'S(0,4)Entropy' 'S(4,-4)SumOfSqs' 'S(0,5)AngScMom' 'S(0,5)SumOfSqs' 'S(5,5)SumOfSqs' 'S(5,-5)SumVarnc' 'Vertl_GLvNonU' '135dr_RLNonUni' 'GrNonZeros'	'Perc.01%' 'S(1,-1)SumVarnc' 'S(0,2)Contrast' 'S(0,2)SumVarnc' 'S(2,-2)SumAverg' 'S(3,0)SumAverg' 'S(3,-3)SumEntrp' 'S(4,0)SumOfSqs' 'S(4,0)InvDfMom' 'S(4,-4)AngScMom' 'S(5,5)SumVarnc' 'S(5,5)DifVarnc' 'Vertl_ShrtREmp' '45dgr_Fraction' '135dr_LngREmph'	'S(1,1)SumAverg' 'S(1,1)SumEntrp' 'S(1,-1)Correlat' 'S(0,2)SumEntrp' 'S(3,0)SumAverg' 'S(0,3)Contrast' 'S(3,3)SumAverg' 'S(3,3)DifVarnc' 'S(3,-3)SumOfSqs' 'S(4,4)Correlat' 'S(5,0)AngScMom' 'S(5,0)InvDfMom' 'S(0,5)SumEntrp' 'S(5,5)Correlat' 'S(5,5)SumEntrp' 'S(5,-5)SumOfSqs' 'S(5,-5)DifEntrp' 'Vertl_RLNonUni' 'Sigma'

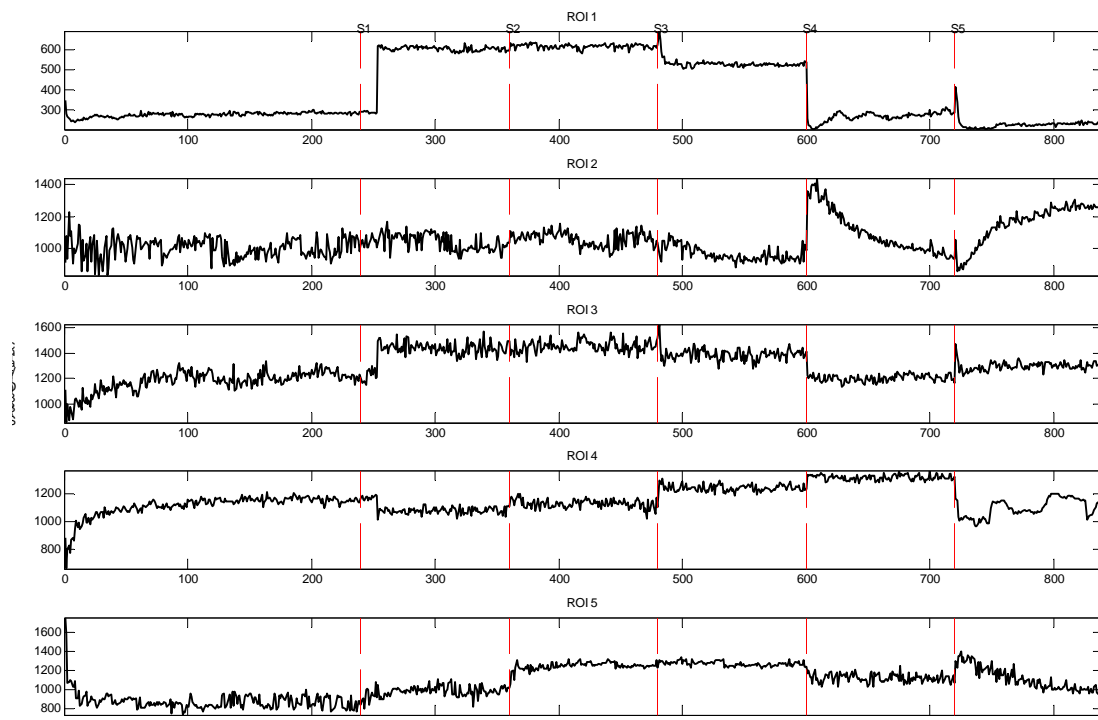


Fig. 6. Plot of diagnostic signal of Difference of Variance S(3,3) value extracted from all considered regions of interest as a function of numbers of consecutive recorded images

**3. CONCLUSIONS**

In the paper, results of study aiming at search for set of optimal diagnostic features of thermographic images have been presented. Thermograms recorded during an active diagnostic experiment have been analyzed with the use of different methods of statistical texture analysis. As a result of the analysis, a set of 259 diagnostic features for every region of interest of each of 840 recorded images has

been obtained. Five regions of interest have been considered. In order to detect optimal features, an evolutionary algorithm has been applied. The assessment of feature relevance has been performed on the basis of classification results and a simple neural network classifier has been applied.

The results of the research show that it is possible to find such an optimal set of features of thermographic images that can be used for classification of technical state of a machine with



high efficiency. The usefulness of application of evolutionary algorithms as one stage of this procedure has been proved. Authors expected that a number of optimal features could be limited to 10. These features should allow for classification with higher efficiency. It requires an increase in a generation number and an algorithm modification. Such research is being currently conducted, however, due to considerable time consuming computation, results will be presented in further publications.

Results of the research also show that the proposed concept of analysis of sequence of thermovision images can be used for identification of changes of technical states during machine operation. The analysis of determined diagnostic signals indicates possibilities of application of statistical methods of thermogram analysis for determination of one dimensional diagnostic signal.

Having considered the discussed results, it can be stated that continuation of the research in this area is necessary. Further research should be focused on improving of the evolutionary algorithm in the case of obtaining a number of relevant features which should be as small as possible. Another direction of the research will be focused on verification of other methods of image processing that could be useful for identification and classification of machine technical state.

## LITERATURA

- [1] Aberdeen D., Baxter J., Edwards R.: *92¢/MFlops/s, Ultra-Large-Scale Neural-Network Training on a PIII Luster*. citeseer.ist.psu.edu/aberddeen00cmflopss.html. (2000).
- [2] Cempel Cz.: *Fundamentals of vibroacoustical condition monitoring*, in: A. Davies (ed), *Handbook of Condition Monitoring. Techniques and Methodology*, London, Chapman and Hall, 1998, pp. 324-353.
- [3] Cholewa W.: *Method of machine diagnostics with application of fuzzy sets*. Zeszyty Naukowe Nr 764. Politechnika Śląska, Gliwice 1983. (in Polish).
- [4] Ciupke K.: *A comparative study on methods of reduction and selection of information in technical diagnostics*. Mech. Syst. Signal Process. 2005 vol. 19, p. 919-938.
- [5] Fidali M.: *An idea of continuous thermographic monitoring of machinery*. QIRT 2008 Proceedings, 9th International Conference on Qualitative InfraRed Thermography, July 2-5, 2008 Kraków, Poland.
- [6] Goldberg D. E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- [7] Gonzales C. R.: Wintz P.: *Digital Image Processing*. Addison-Wesley Publishing Company 1987.
- [8] Korbicz J., Kościelny J. M., Kowalczyk Z., Cholewa W. (Eds.): *Fault diagnosis. Models, artificial intelligence, applications*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2004.
- [9] Madura H.: *Thermographic measurements in practice*. Agencja wydawnicza PAK, Warszawa 2004. (in Polish).
- [10] Materka A., Strzelecki M., Lerski R., Schad L.: *Evaluation of Texture Features of Test Objects for Magnetic Resonance Imaging*, June 1999, Infotech Oulu Workshop on Texture Analysis in Machine Vision, Oulu, Finland, 13-19.
- [11] Materka A., Strzelecki M.: *Texture Analysis Methods - A Review*. Technical University of Lodz, 1998, COST B11 Report.
- [12] Matlab Help.
- [13] Michalewicz Z.: *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolutionary Programs*. Springer Verlag, Berlin, (1992).
- [14] Strzelecki M., Materka A.: European Project Cost B11 *Quantitation Of Magnetic Resonance Image Texture*. Zeszyty Naukowe 'Elektronika', vol. 4, 1999, 115-124 (in Polish).
- [15] Thomas R. A.: *The thermography monitoring handbook*. Coxmoor Publishing, Oxford, UK. 1999.
- [16] Urbanek G.: *Application of evolutionary algorithms to identification of diagnostic inverse models*, KPKM, Gliwice 2006 (in Polish).
- [17] Wróbel Z., Koprowski R.: *Thermographic image processing*. Proceedings of VI krajowej konferencji Termografia i termometria w podczerwieni. Ustroń 2004. (in Polish).



**Marek FIDALI**, PhD, assistant professor at Department of Fundamentals of Machinery Design. Main area of research: technical diagnostics, thermovision, modal analysis, signal and image processing



**Grzegorz URBANEK**, PhD, designer (automotive industry), enthusiast for evolutionary algorithms

## A FRAMEWORK FOR KNOWLEDGE ACQUISITION SYSTEM IN PERSPECTIVE VIEW OF DIAGNOSTIC OF ROTATING MACHINERY\*

Dominik WACHLA

Silesian University of Technology, Department of Fundamentals of Machinery Design  
Konarskiego 18A str., 44-100 Gliwice, Poland  
e-mail: [dominik.wachla@polsl.pl](mailto:dominik.wachla@polsl.pl)

### Summary

A concept of knowledge acquisition system for the needs of diagnostic of rotor machines was presented in the article. The concept was developed on assumption that knowledge would be acquired inductively through analysis of measure and simulative data. The founding of the system was considered, The architecture was particularly described and example of its application was provided, as well.

Keywords: knowledge acquisition, diagnostic of rotating machinery, databases, support vector machines.

### SYSTEM POZYSKIWANIA WIEDZY Z PERSPEKTYWY DIAGNOSTYKI MASZYN WIRNIKOWYCH

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono koncepcję systemu pozyskiwania wiedzy dla potrzeb diagnostyki maszyn wirnikowych. Koncepcję opracowano przyjmując założenie, że wiedza będzie pozyskiwana w sposób indukcyjny poprzez analizę danych pomiarowych lub symulacyjnych. Omówiono genezę powstania systemu. Szczegółowo opisano architekturę oraz pokazano przykład zastosowania.

Słowa kluczowe: pozyskiwanie wiedzy, diagnostyka maszyn wirnikowych, bazy danych, metoda wektorów wspomagających.

## 1. INTRODUCTION

Knowledge in technical diagnostics is a knowledge which corresponds to relations occurring between observed symptoms and determined classes of technical state of a machine. Currently conducted research concentrates on acquisition of the knowledge with application of adequate numerical models of machines. Diagnostic relations (*technical state* → *symptom*) are the result of analysis of a model reaction to given changes of values of control parameters. Provision of a large amount of data is the basic feature of knowledge acquisition based on a model approach. It results in an adequately considerable number of diagnostic relations of which only few have general meaning. As a consequence, all defined relations have to be considered in the process of diagnosing a machine, which may decrease the efficiency and effectiveness of the process. Due to the above, another concise form of description of these relations is necessary. The relations may for instance be represented in a form of decision tables or decision trees, neural models, neuro-fuzzy models, and others. Obtaining a description in one of the listed forms requires application of adequate methods of their identification, which, in turn, results in preparation and use of appropriate tools.

## 2. A FRAMEWORK OF THE SYSTEM

The architecture of the developed system of diagnostic knowledge acquisition was based on a two-fold model. The first layer is the base layer. Its purpose is to ensure realization of tasks concerning low-level computations and data management. The base layer consists of MATLAB environment and MySQL Database Management System. The two mentioned elements were chosen due to criteria formulated at the stage of the system requirements specification.

The database system supports management of big sets of data and constitutes the second element of the base layer. Due to its popularity and availability, MySQL system was applied in the proposed architectural solution. The communication and the exchange of data between MATLAB and MySQL is ensured by SQL interface.

A layer of implementation of algorithms constitutes the second layer of the system architecture. This layer aims at providing functionality which facilitates realization of the process of database knowledge acquisition. According to the CRISP-DM methodology [6], the process of database knowledge acquisition was divided into a number of stages e.g: data preprocessing, feature extraction and selection, data modeling, etc. Having taken the above information into account, 4 routine toolboxes were distinguished in the layer of algorithm implementation. The

\* This work was supported by the polish Ministry of Science and Higher Education (grant No. PBZ-KBN-105/T10/2003)



routine toolboxes provide functionality of the system within: data management, data preprocessing, feature/attribute selection, data modeling.

A number of supporting procedures was implemented within the toolboxes of data management. The procedures involved:

- entering source data from the files generated by the NLDW-MESWIR system [5]
- entering and saving data in the binary files in the internal format of the MATLAB environment (*mat-files*),
- entering and saving data from/into the files in the XML format,
- communication and exchange of data with the MySQL database server.

The entering and reading of data from/into the XML files from the level of the MATLAB environment is realized by means of parser's XML language. The SQL interface allows for direct communication and exchange of data between MATLAB and the database. The interface functionality facilitates data management through formulation of questions which are compatible with semantics and specificity of the SQL language.

A toolbox of data preprocessing includes, in the first place, routines which support preparation of the data acquired from the NDLW-MESWIR system. In particular, these are the routines of computation of Mean Absolute Value (AVE), Root Mean Square Value (RMS), amplitude -phase spectrum, etc., and routines of three- and five-point differentiation of time series. In addition, the toolbox renders available a procedure of discretization of continuous attributes according to the algorithm which was introduced by Fayyad and Irani [2]. This procedure is used among others by algorithms of feature selection [4].

A metaprocedure constituting implementation of the CFS algorithm (Correlation-base Feature Selection) [4] is the basic element of a toolbox of features/attributes selection. The functioning of the CFS algorithm is based on the search of feature space along with consideration of criterial function which provides quantitative information about the importance of the chosen subsets of features. The operation of the CFS algorithm requires implementation of at least one method of the search of state space. Due to this requirement, the feature selection toolbox provides implementation of two algorithms of the search of state space, i.e. the *Best First* algorithm [7] and the *Simple Genetic Algorithm* [3].

A toolbox of algorithms of data modeling is a next element of the implementation layer. The procedures implement algorithms of the Support Vector Machines (SVM) method [11], i.e. C-SVM,  $\nu$ -SVM,  $\epsilon$ -SVR and  $\nu$ -SVR [9]. The C-SVM and  $\nu$ -SVM algorithms are applied in construction of classifying

models, whereas the  $\epsilon$ -SVR and  $\nu$ -SVR algorithms are used in modeling of regressive problems. For the needs of the system, the *LibSVM* [1] toolbox was adapted; the toolbox includes implementations of the mentioned SVM algorithms. The other unit of data modeling supports validation of generated models through: routines which determine values of model statistics such as *classifier performance* [10], and a set of routines which implement some techniques of model evaluation e.g. *k-fold cross-validation* [8].

### 3. EXAMPLE OF SYSTEM APPLICATION

To show capabilities of the system, a problem of detecting and locating cracks in the shafts of a high power turbine unit was considered. Moreover, it was assumed that the constructed classifier should locate the cracks in the shafts with accuracy of a selected stage of the turbine set.

The solution to the established task required realization of a number of ordered activities which resulted from the methodology of data knowledge acquisition. In particular:

- acquisition of a set of source data,
- definition and determination of features from the set of source data,
- construction of a set of learning examples,
- identification and validation of the classifier.

#### 3.1. The Source Data

The needed data were obtained from a number of simulations conducted with an application of a numerical model of a 200 MW turbine set. The model was constructed at IMP PAN in Gdańsk. It was built as a FEM model of a TK 7 turbine unit at Koźnice S.A power plant. The model was adjusted to a real object on the basis of data gathered by the DT200-1 diagnostic system [5]. In order to construct a model of a turbine set, the NLDW-MESWIR system was used [5].

On the basis of the objectives of the research, a plan of generating learning data was prepared. A set of 92 cases which include a process of cracking in the turbine set in 4 locations was taken into account. The 4 locations include: a high pressure stage (HP), an intermediate pressure stage (IP), a low pressure stage (LP) and a generator (GEN). The set was supplemented with a base case which was interpreted as a reference state in which no defects occur.

A detailed plan of generating learning data was presented in the Tab. 1. A simulative experiment was carried out for each planned case. The results of calculations conducted with the use of the NLDW-MESWIR system were copied into text files.

Tab. 1. The plan of generating source data:  $\alpha_p$ -angular position of the crack,  $W_p$  - non-dimensional coefficient of the depth of the crack

Defect name	Element No.	$\alpha_p$	$W_p$	Example No.	Class label
Base case	—	—	—	1	<i>PBARTMAX</i>
Cracks in HP stage	31	270	{0.050, 0.075, 0.100, ..., 0.650}	2÷26	<i>CRHB</i>
Cracks in IP stage	59	0	{0.050, 0.075, 0.100, ..., 0.650}	27÷51	<i>CRIDA</i>
Cracks in LP stage	103	90	{0.050, 0.075, 0.100, ..., 0.475}	52÷69	<i>CRLFB</i>
Cracks in generator	125	125	{0.050, 0.075, 0.100, ..., 0.600}	70÷92	<i>CRGBC</i>

### 3.2. Learning Data

In diagnostic of rotating machinery, the fundamental evaluation of a technical state is based on analysis of chosen frequency components of amplitude-phase spectra of mechanical vibrations [5]. The frequency components are connected with rotation velocity of a rotor. In particular, the elements 0.25X, 0.33X, 0.5X, 1X, 2X, 3X and 4X are evaluated; where X in [Hz] denotes a nominal frequency of rotation of a rotor.

Having taken the above into account, it was assumed that the learning examples would be constructed as sets of a selected frequency components of amplitude-phase spectra defined for vibration signals which were obtained at the stage of generating source data.

Two sets of learning examples were established. A division criterion was applied in relation to the signal category. The first set of learning examples was defined for the velocity of absolute vibrations fixed in the  $x$  and  $y$  directions. The second set was established for relative vibrations fixed in the  $x$  and  $y$  directions, as well. In each sets of learning examples, 196 features were marked.

The research objectives, i.e. classifiers induction, require a definition of a set of adequate categories for the considered problem. On the basis of the plan of generating learning data (tab. 1), 5 categories were defined and labeled as: *CRHB*, *CRIDA*, *CRLFB*, *CRGBC* and *PBARTMAX*. Then two complete sets of learning examples were obtained.

### 3.3. Feature Selection

According to the methodology of knowledge discovery from databases, a stage of identifying and verifying the classifier should be preceded by a stage of the relevant feature selection. Such a procedure aims at acquiring models which are characteristic of decreased complexity as well as increased generalizing capabilities. For this reason, the process of relevant feature selection was conducted using CFS algorithm [4]. The scheme of feature selection consisted of 11 experiments where the following algorithms were used for searching of feature space:

- The *Best First* algorithm [7] – once,
- The simple genetic algorithm [3] – ten times.

Within the *Best First* algorithm, a strategy of *bi-directional* search was used. In turn, for the simple

genetic algorithm, values of parameters recommended in the literature [3] were assumed.

The entire number of features in both sets of learning examples was reduced from 169 to:

- 69, for the set of learning examples constructed on the velocity of absolute vibrations,
- 42, for the set of learning examples constructed on the relative vibrations.

The details of the obtained results are shown in [12].

### 3.4. Identification and Validation of a Classifier

Taking into account the objectives of the conducted investigations, the  $\nu$ -SVC algorithm was considered to be applied in building a classifier for detection and localization of cracks in shafts of the turbine set. The identification of SVM classifiers was conducted for:

- sets of learning examples containing a complete set of features,
- sets of learning examples containing only the features marked in the selection process.

The following identifiers distinguishing these sets were accepted in order to differentiate between the particular learning sets: *FS* – an identifier for learning sets with a complete set of features, *BF* – an identifier for learning sets in which features were selected by means of the *Best First* algorithm, *GAI÷GAI0* – an identifier for learning sets in which features were selected as a result of a tenfold activation of the genetic algorithm.

Tab. 2. The SVM classifiers identification scheme

Model ID	Kernel function	$\nu$	C	$\gamma$
<b>SVM-LIN</b>	Linear	0.1	1.0	—
<b>SVM-RBF</b>	RBF	0.1	1.0	0.1

The accepted categories of determined SVM models and the applied learning parameters of the  $\nu$ -SVC algorithm were presented in the Tab.2. The values of the  $\nu$  and C metaparameters were selected on the basis of our own knowledge and on the pre-experiments. The method of *k-fold cross validation* with a set of learning examples divided into 3 subsets was applied in the process of the classifier identification. The quality of the identified classifiers was measured by calculation of, among

others, a classifier performance. The obtained results were presented in Fig. 1.

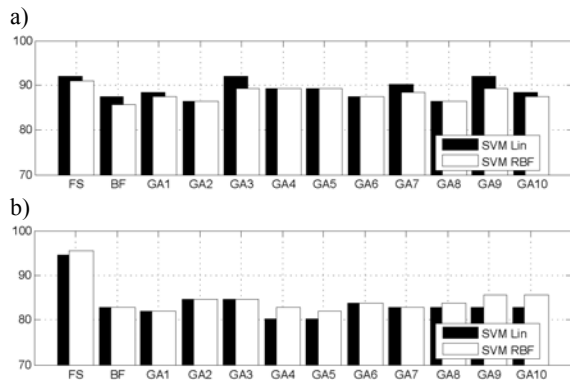


Fig. 1. Classifiers performance: a) absolute vibrations b) relative vibrations

The results (Fig. 1) prove high efficiency of the procured SMV classifiers not only for the complete sets of learning examples (FS), but also for the sets of learning data created on the basis of selected sets of relevant features (BF, GA1-GA10). It needs to be noted that the highest efficiency of the SVM classifiers is observed in the case of the complete sets of learning data; the efficiency slightly decreases along with the decrease in the number of features in the learning sets.

Such a phenomenon may result, among others, from the manner in which the SVM method functions or from the properties of the CFS algorithm. Due to the limited scope of the conducted research, the obtained results cannot constitute an explicit recommendation to omit the stage of the feature selection in the process of knowledge acquisition. Nonetheless, they prove that the prepared system requires further study.

#### 4. SUMMARY

While preparing the system, it was taken into account that the system is meant to acquire diagnostic knowledge with the use of learning data generated by the NLDW–MESWIR software on the basis of the model of a power plant turbine set. The system verification was conducted along with realization of a practical task concerning model (knowledge) acquisition for a hypothetical problem of identification of a classifier which detects and locates cracks in the shaft of the turbine set. Such an approach facilitated examination of the system as far as the implementation and the correctness of the project assumptions are concerned; the project assumptions are connected with the system functionality. The acquired results prove validity of the assumptions and the practical usefulness of the system. Additionally, data concerning the system areas requiring supplementation and corrections were obtained.

#### REFERENCES

- [1] Chang C. C., Lin C. J. *LIBSVM: a library for support vector machines*, 2001. <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>.
- [2] Fayyad U. M., Irani K. B.: *Multi-Interval Discretization of Continuous-Valued Attributes for Classification Learning*. In *13'th International Joint Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (IJCAI93)*, pages 1022–1029, Chambéry, France, 1993.
- [3] Goldberg D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Professional, 1989.
- [4] Hall M. *Correlation-based Feature Selection for Machine Learning*. PhD thesis, Waikato University, Department of Computer Science, Hamilton, NZ, 1998.
- [5] Kiciński J. et al.: *Modelowanie i diagnostyka oddziaływań mechanicznych, aerodynamicznych i magnetycznych w turbozespołach energetycznych (in Polish)*. IMP PAN, Gdańsk,
- [6] Larose D. T.: *Discovering Knowledge in Data: An Introduction to Data Mining*. Wiley-Interscience, 2004.
- [7] Michalewicz Z., Fogel D. B.: *How to Solve It: Modern Heuristics*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2004.
- [8] Moczulski W.: *Metody pozyskiwania wiedzy dla potrzeb diagnostyki maszyn (in Polish)*. Zeszyt 130, Politechnika Śląska, Gliwice, 1997.
- [9] Schölkopf B., Smola A. J. *Learning with Kernels: Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 2001.
- [10] Witten I. H., Frank E.: *Data Mining: Practical machine learning tools and techniques*. Morgan Kaufmann, San Francisco, 2 edition, 2005.
- [11] Vapnik V.: *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer-Verlag, New York, 1995.
- [12] Wachla D. System Verification. In Ciupke K., Moczulski W. eds., *Knowledge Acquisition For Hybrid Systems of Risk Assessment And Critical Machinery Diagnosis*. ITE, Radom, 2008.



**Dominik WACHLA** (PhD Eng.) is an assistant professor at the Faculty of Mechanical Engineering at Silesian University of Technology in Gliwice. His research is focused on the application of methods of artificial intelligence in the technical diagnostics of machinery and industrial processes.

## MFC/IMC SCHEME AS A FAULT TOLERANT CONTROL STRUCTURE

Jerzy BRZÓZKA

Maritime University of Szczecin, Department of Vessel's Control Systems  
 70-205 Szczecin, Podgórna 51/53 St., Poland; [jb@am.szczecin.pl](mailto:jb@am.szczecin.pl)

### Summary

The paper deals with the fault tolerant control in two-loop control system structure (MFC/IMC, *Model Following Control/Internal Model Control*). System consists of the model of a nonlinear plant (main ship engine) and two PID controllers. In distinction from other works on this subject (the MFC/IMC structure), special attention was paid to robustness of the linearized structure to perturbations caused by the plant parameters changes, different uncertainties, changes of the operating points and tuning parameters of the controllers as well as catastrophic failures formed in the considered structure. The simulations carried out in MATLAB®/Simulink® software.

Keywords: robust control, fault tolerant control, process perturbation, model following control (MFC).

### ODPORNY NA USZKODZENIA UKŁAD REGULACJI TYPU MFC/IMC

#### Streszczenie

Artykuł dotyczy regulacji odpornej w dwu pętlowej strukturze MFC/IMC zawierającej model nieliniowego obiektu regulacji (prędkości obrotowej wału okrętowego silnika głównego) i dwa regulatory PID. W odróżnieniu od innych prac na temat struktury MFC/IMC, w artykule tym szczególną uwagę zwrócono na odporność struktury zlinearyzowanej na perturbacje parametrów regulowanego procesu, odporność na perturbacje spowodowane różnymi zaburzeniami, np. wywołanymi zmianami punktów pracy obiektu, parametrami regulatorów lub uszkodzeniami katastroficznymi struktury. Symulacje zostały wykonane w programie MATLAB®/Simulink®.

Słowa kluczowe: regulacja odporna, regulacja tolerująca uszkodzenia, perturbacje procesu, regulacja śledząca z modelem.

## 1. INTRODUCTION

Fault tolerance of dynamic systems can be achieved either from system robustness to faults and other uncertainties, or from controller reconfiguration or restructuring in response to special faults. Actually, a well-designed control system may have some fault tolerance capabilities what can be designed (e.g., by properly choosing feedback gains) to compensate for some system uncertainties such as disturbances and noise, and the fault can be considered as a kind of system uncertainty. This paper proposes a fault-tolerant control strategy for fault based on the use of MFC/IMC structure. There is no need to design special diagnostic observers which is the main advantage of this structure.

## 2. PROPERTIES OF A LINEAR MFC/IMC STRUCTURE

According to [5] the MFC/IMC structure is shown in Fig. 1.

The special advantage of MFC/IMC structure is that the model  $M(s)$  does not have to be exactly equal to the process  $P(s)$ , because in such a situation the process  $P(s)$  is controlled by the sum of two components: control signals from  $R_m(s)$  and

$R(s)$  controllers. If  $M(s) = P(s)$  then  $R(s)$  controller does not work and presented structure acts as a classical fixed value control loop. This structure is often described as the system with two-degree-of-freedom (2DOF).

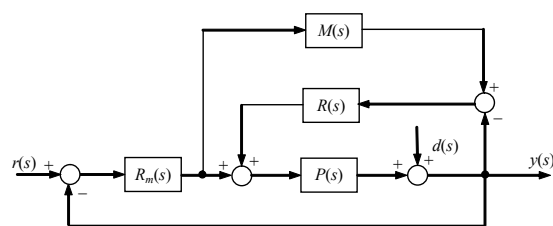


Fig. 1. General block diagram of MFC/IMC structure, where individual transfer functions mean:  $M(s)$  – model,  $P(s)$  – plant,  $R_m(s)$  – model controller,  $R(s)$  – plant controller and  $r(s)$  – set point value,  $y(s)$  – process controlled value,  $d(s)$  – disturbances

Plant transfer function  $P(s)$  is given by Eq. (1):

$$P(s) = M(s)(1 + \Delta(s)), \quad (1)$$

where  $\Delta(s)$  is plant perturbations.

Functions  $S$  and  $T$  have been assumed as measures of robustness and IAE (*Integral of the Absolute Error*) criterion for step responses as a performance index. The simulations and calculations were carried out in MATLAB.

On the basis of Fig. 1, the process controlled value  $y(s)$  is given by Eq. (2):

$$y(s) = r(s)S(s) + d(s)T(s), \quad (2)$$

where:

$$S(s) = \frac{R_m(s)P(s)(1 + R(s)M(s))}{1 + P(s)(R_m(s) + R(s) + R_m(s)R(s)M(s))}, \quad (3)$$

is the sensitivity transfer function and

$$T(s) = \frac{1}{1 + P(s)(R_m(s) + R(s) + R_m(s)R(s)M(s))}, \quad (4)$$

is the complementary sensitivity transfer function.

Adding Eq. (3) and Eq. (4) yields equation (5), which represents the relation between sensitivity functions  $S(s)$  and  $T(s)$ :

$$S(s) = 1 - (1 + R(s)P(s))T(s). \quad (5)$$

### 3. EXEMPLARY MFC/IMC STRUCTURE

As an example, the dynamics of the revolution speed control of the main ship engine (Fig. 2 and Fig. 3) has been considered as a plant.

#### 3.1. Plant

A linearized "real plant" has been created as an approximation of the nonlinear continuous functions  $f_n$  (for dead zone) and  $f_s$  (for saturation) at the given operating point ( $A$ ;  $op$ ). Linearization of these gives (6):

$$\frac{num}{s^4 + 60.05s^3 + 1203s^2 + 8060s + 400} \quad (6)$$

where values of  $num$  of the transfer functions (6) are given in the Table 1.

Table 1. Values of the transfer function numerator (6) at a given operating point  $A$

$A =$	0.05	0.15	0.2	0.5	0.7	0.9	1.2
$num =$	818	1334	1549	2208	2093	1724	1114

Block diagram of the plant is shown in Fig. 2.

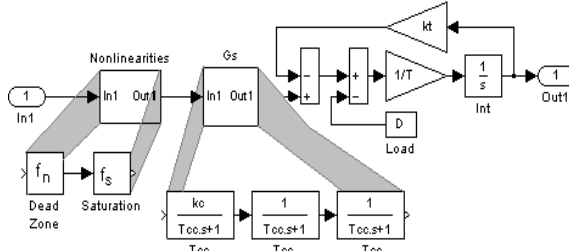


Fig. 2. Block diagram of the nonlinear, continuous "real plant" of the main ship engine (values of plant parameters:  $k_c = 0.8$ ;  $T_{cc} = 0.05$  sec;  $T = 3$  sec;  $k_r = 0.15$ )

#### 3.2. Model

The block diagram of a nonlinear model of the main ship engine dynamics is shown in Fig.3 [3]. The same (independently of an operating point) model in the form of the first-order plus time-delay was taken for the process. The time-delay was replaced by second-order Pade approximation. Linearization of the model (Fig. 3) was performed by means of the describing functions  $J_n(A)$  for dead zone and  $J_s(A)$  for saturation at given operating points.

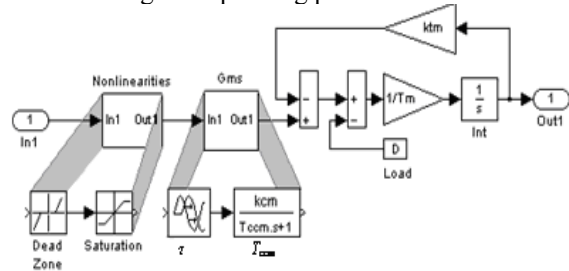


Fig. 3. Block diagram of the nonlinear, non-continuous model for the main ship engine dynamics (values of model parameters: dead zone  $-0.1; 0.1$ ; saturation  $-1.1; 1.1$ ;  $\tau = 0.05$  sec;  $k_{cm} = 0.8$ ;  $T_{ccm} = 0.1$  sec;  $T_m = 2.5$  sec;  $k_{rm} = 0.12$ )

#### 3.3. Controllers

Plant controller  $R_m(s)$  and correcting controller  $R(s)$  have been tuned in *Simulink Response Optimization* toolbox for fully nonlinear MFC/IMC structure. The tuning parameters of the process and correcting PID controllers are:  $k_m = 3$ ;  $T_{cm} = 10$  sec;  $T_{dm} = 0.7$  sec and  $k_k = 1$ ;  $T_{ck} = 5$  sec;  $T_{dk} = 0.05$  sec, respectively.

### 4. ANALYSIS OF EXEMPLARY FAULTS IN MFC/IMC STRUCTURE

#### 4.1. Stability analysis

The stability study of the nonlinear MFC/IMC structures (at different parameters of the process, model or controllers, disconnected outputs of  $R(s)$  or  $R_m(s)$  controllers, disconnected model's output) has been done by means of the roots computation of the characteristic equations for the given linearized scheme. In these cases, the characteristic equations have the following forms (7 ÷ 10):

for the fully working structure:

$$1 + P(s)(R_m(s) + R(s) + R_m(s)R(s)M(s)) = 0, \quad (7)$$

for disconnected output of  $R_M$ :

$$1 + P(s)R(s)(1 + R_m(s)M(s)) = 0, \quad (8)$$

for disconnected output of  $R$  ( $R_m$  works, only):

$$1 + P(s)R_m(s) = 0, \quad (9)$$

For disconnected output of  $M$ :

$$1 + P(s)(R(s) + R_m(s)) = 0. \quad (10)$$

It is easy to notice that characteristic equations (7÷10) are created by rejection of needless components in equation (7). These equations are sometimes called an *interval polynomials*.

All equations fulfill the stability conditions for given parameters.

#### 4.2. ROBUSTNESS ANALYSIS

Robustness analysis of MFC/IMC system has been done for the following exemplary cases:

- Different plant operating points;
- Inaccuracy of the model;
- Inaccurate tuning parameters of controllers;
- Reaction to catastrophic failures, this is disconnection of output  $R_m(s)$  and  $R(s)$  controllers and model  $M(s)$ ;
- Process parameters perturbations;
- The simultaneous changes of the model and process parameters;
- Linear model use for nonlinear process is presented in [2].

Ad. a) Different plant operating points.

The values of performance index IAE (for signal error in  $R_m, P$  control loop) for the different operating points  $A$  of the process, and for different approximations of the model and process but for the same tuning parameters of  $R_m(s)$  and  $R(s)$  controllers are presented in Table 2.

Table 2. Values of IAE for different MFC/IMC structures at given operating points

$A^1$ (or $op$ )	0.15	0.2	0.5	0.7	0.9	1.2	average value of IAE	relative error for IAE
MFC/IMC	Values of IAE							
non-linear <sup>2</sup>	3.58	3.28	3.02	4.10	5.13	7.91	4.50	0 %
linear <sup>3</sup>	4.73	4.76	4.96	5.10	5.23	5.60	5.06	12.44 %
nPIM <sup>4</sup>	4.35	4.32	4.35	4.44	4.59	6.94	4.83	7.33 %

From Table 2 appears that controllers tuned at one operating point work properly at other operating points.

Data presented in Table 2 permit to infer that for designing purposes partially or fully linearized structure can be used instead of nonlinear.

Unit step changes (reference and disturbance signals) for two exemplary operating points are shown in Fig. 4 and Fig. 5. Plant controller  $R_m(s)$  and correcting controller  $R(s)$  have been tuned in Simulink Response Optimization program for fully nonlinear structure.

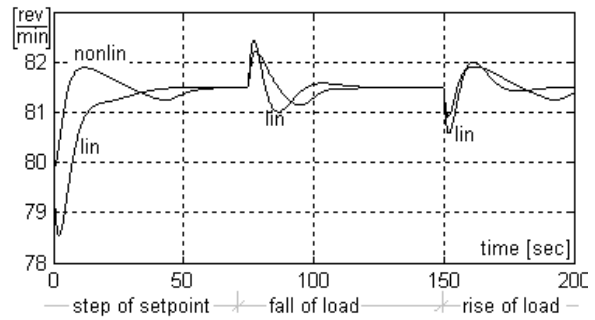


Fig. 4. Step responses for the fully nonlinear and fully linearized structure on unit step changes in the reference and disturbance signals ( $A = 0.15$ )

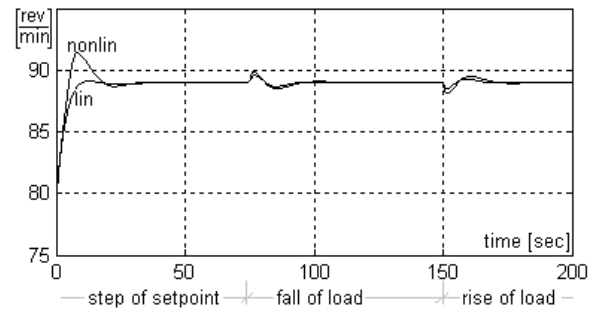


Fig. 5. Step responses for the fully nonlinear and fully linearized structure on unit step changes in the reference and disturbance signals ( $A = 0.9$ )

Ad b) Inaccuracy of the model.

The analysis of the model inaccuracy has been done by comparison of a maximal and current plant perturbations for model linearized at a given operating point.

In the case of the linearized MFC/IMC structure the maximal admissible perturbations  $\Delta$  at a given operating point can be expressed in the form of (11) according to [2]:

$$\Delta_{MFC/IMC} < \left| \frac{(1 + R(s)M(s,op))(1 + R_m(s)M(s,op))}{R_m(s)M(s,op)} \right| \quad (11)$$

These admissible perturbations (11) depend on the operating point  $op$  due to the nonlinearities in the controlled plant.

Current perturbations  $\Delta_{current}$  at a given operating point are given by the following equation (12) according to [2]:

$$\Delta_{current} = \left| \frac{P(s,op)}{M(s,op)} - 1 \right| \quad (12)$$

Therefore, the maximal values of the parameters changes can be determined on the basis of the expressions (11) and (12).

A comparison of the exemplary maximal admissible and current perturbations is shown in Figs. 6, 7.

<sup>1</sup> operating point

<sup>2</sup> nonlinear plant and model

<sup>3</sup> linear plant and model

<sup>4</sup> nonlinear plant, linear model, nP/M

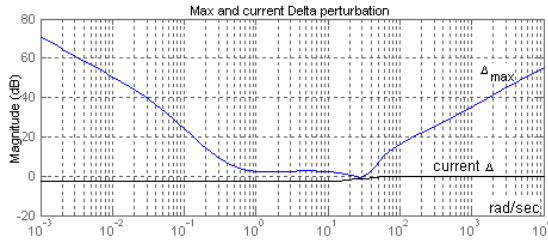


Fig. 6. Maximal and current perturbations  $\Delta$  for second order Padé approximation of model time-delay;  $A = 0.9$ ; gain coefficient of plant enlarged three times

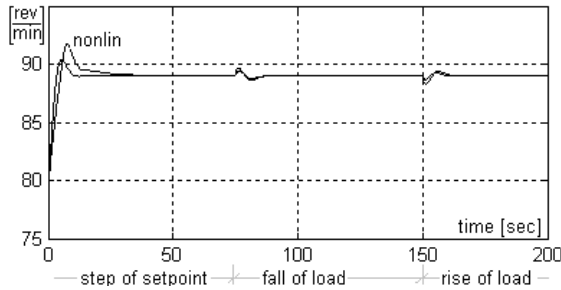


Fig. 7. Step responses of nonlinear and linearized MFC/IMC system on unit step changes in the reference and disturbance signals ( $n = 2$ ;  $A = 0.9$ ; gain coefficient of plant enlarged three times)

As follows from Fig. 6 that the triple increase of the object gain coefficient did not cause the exceeding of the admissible perturbation from the stability point of view, which is also confirmed by the graph in Fig. 7.

Ad. c) Inaccurate tuning parameters of controllers.

For modeling this situation it has been assumed, that the parameters of controllers  $R_m(s)$  and  $R(s)$  have been replaced accidentally without any changes of other parameters of this structure. The Bode plots (with the gain curves;  $A = 0.9$ ) of maximal and current perturbations in both cases are shown in Fig. 8 and Fig. 9 and step responses for these cases in Fig. 5 and Fig. 10. It follows from the Figs. 8, 9 that the stability conditions are fulfilled.

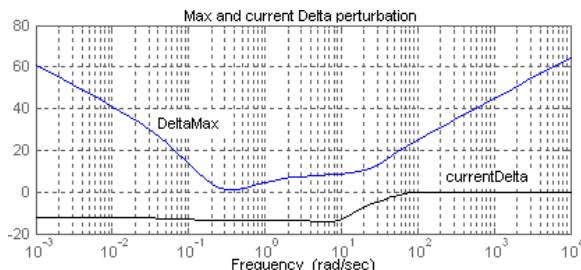


Fig. 8. Bode plot of the maximal and current perturbations (controllers tuned correctly)

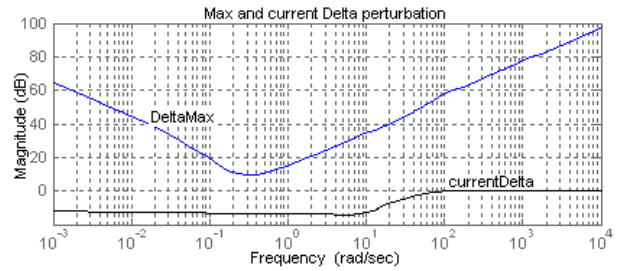


Fig. 9. Bode plot of the maximal and current perturbations for controllers tuned incorrectly

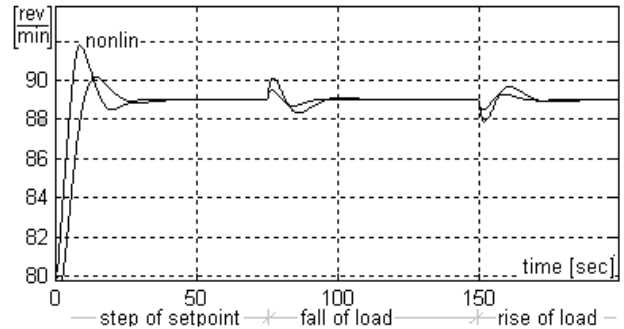


Fig. 10. Unit step responses in MFC/IMC structure with controllers tuned incorrectly ( $A = 0.9$ ; IAE = 5.36 for nonlinear model; IAE = 8.59 for linear model)

Ad. d) Reaction to catastrophic failures.

The failures degenerating MFC/IMC structure (disconnection of output  $R_m(s)$  and  $R(s)$  controllers and model  $M(s)$ ) has been treated as catastrophic failures.

Block diagram of a control system with disconnected output of  $R_m(s)$  controller is shown in Fig. 11, plot of complementary sensitivity function  $T$  in Fig. 12 and step responses in Fig. 13.

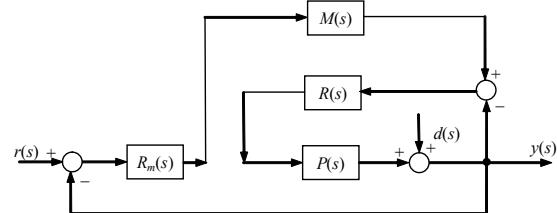


Fig. 11. Disconnection of output  $R_m(s)$  controller

In this case, the system in Fig. 11 has the following transfer functions (13) and (14):

Transfer function  $G_{yr}$  from set point  $r$  to process output  $y$ :

$$G_{yr}(s) = \frac{P(s)R_m(s)M(s)R(s)}{1 + P(s)R(s)(1 + R_m(s)M(s))}, \quad (13)$$

Transfer function  $G_{yd}$  from load disturbance  $d$  to process output  $y$ :

$$G_{yd}(s) = \frac{1}{1 + P(s)R(s)(1 + R_m(s)M(s))}, \quad (14)$$



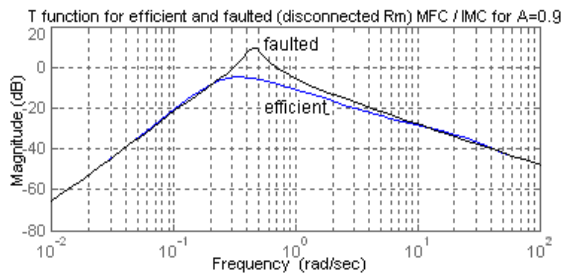


Fig. 12. T function plot for MFC/IMC with disconnected output of  $R_m$  and correctly tuned  $R$  controller ( $A = 0.9$ )

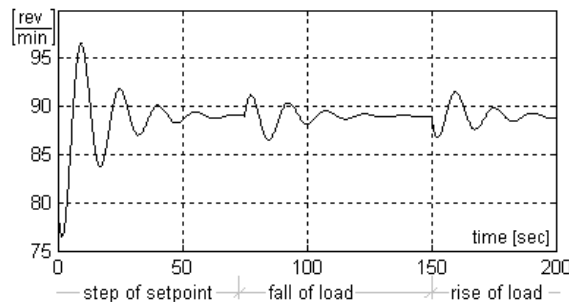


Fig. 13. Unit step response in linear MFC/IMC structure with disconnected output of  $R_m$  and correctly tuned  $R$  controller ( $A = 0.9$ ; nonlinear structure is unstable)

For disconnected output of the correcting controller  $R(s)$ , the process is controlled by  $R_m(s)$  controller only – the MFC/IMC structure is transformed to fixed-value control loop. Plot of complementary sensitivity functions  $T$  is shown in Fig. 14 and step responses in the damaged linear and nonlinear structures in Fig. 15.

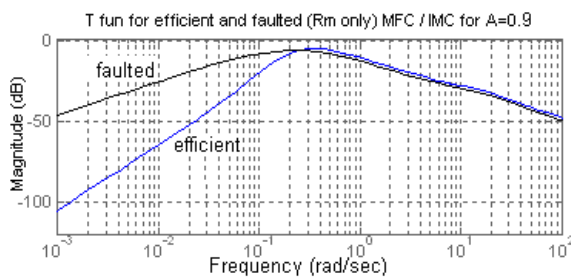


Fig. 14. T function plot for MFC/IMC structure with disconnected output of  $R$  and correctly tuned  $R_m$  controller ( $A = 0.9$ )

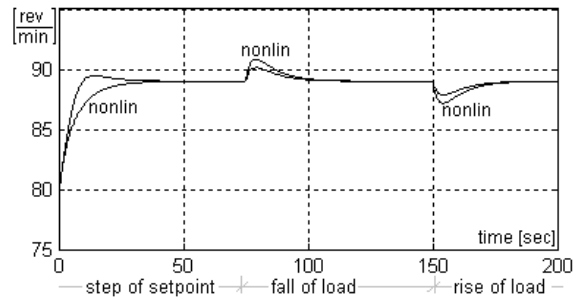


Fig. 15. Unit step responses of linear and nonlinear MFC/IMC structure with disconnected output of  $R$  and correctly tuned  $R_m$  controller at the operating point  $A = 0.9$

Block diagram of a control system with disconnected output of model  $M(s)$  is shown in Fig. 16, unit step responses in Fig. 17 and plot of complementary sensitivity functions  $T$  in Fig. 18.

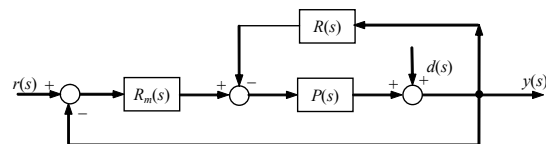


Fig. 16. Block diagram of a control system without model  $M(s)$

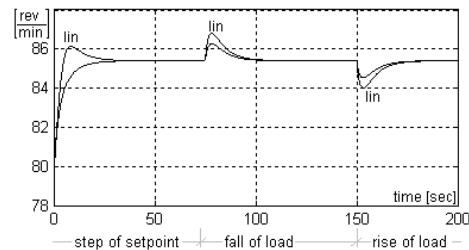


Fig. 17. Unit step responses of linear and nonlinear MFC/IMC structure without model and correctly tuned  $R$  and  $R_m$  controllers at  $A = 0.9$

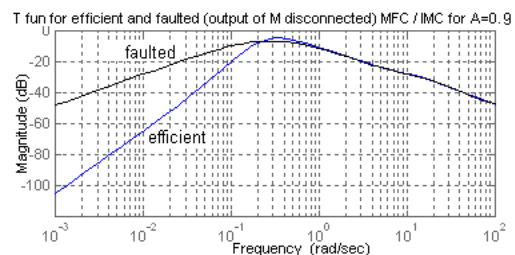


Fig. 18. T function plot for MFC/IMC with disconnected output of  $M$  and correctly tuned controllers at the operating point  $A = 0.9$

From the graphs in Figs. 12, 14 and 18 it follows that disconnection of the output controller  $R_m(s)$  (Fig. 12) slightly changes the properties of the MFC/IMC structure from disturbances rejection point of view. In remaining cases (disconnection of the controller  $R(s)$  – Fig. 14; disconnection of the model  $M(s)$  – Fig. 18) rejection disturbances are worse in low frequency range.

Ad. e) Process parameters perturbations.

The following exemplary simulation experiments were conducted in this case:

- Five-times enlargement of the process time constant – Fig. 19 and Fig. 20.

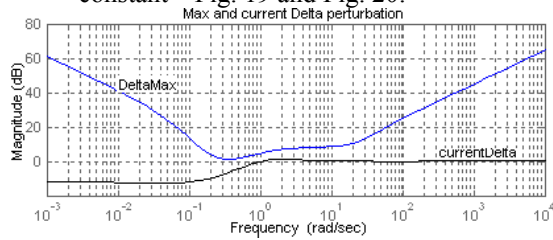


Fig. 19. T function plot for MFC/IMC (five-times enlargement of process time constant, correctly tuned controllers,  $A = 0.9$ )

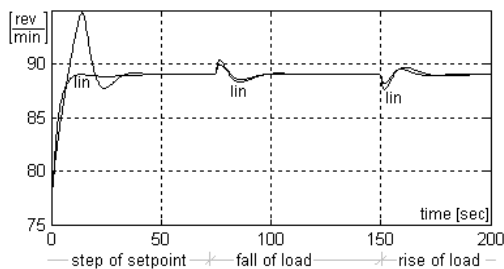


Fig. 20. Unit step responses in linear and nonlinear structure for five-times enlargement of process time constant, correctly tuned controllers and at the operating point  $A = 0.9$

- Five-times enlargement of the process time constant and disconnected output of the controller  $R(s)$  – Fig. 21 and Fig. 22.

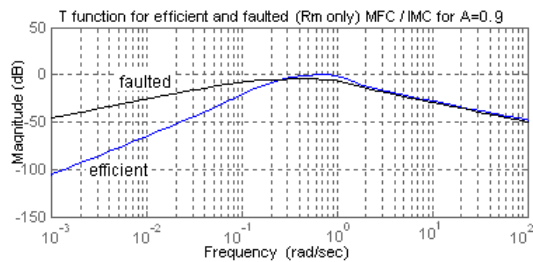


Fig. 21. T function plot for five-times enlargement of process time constant, disconnected  $R$  controller and correctly tuned  $R_m$  controller,  $A = 0.9$ )

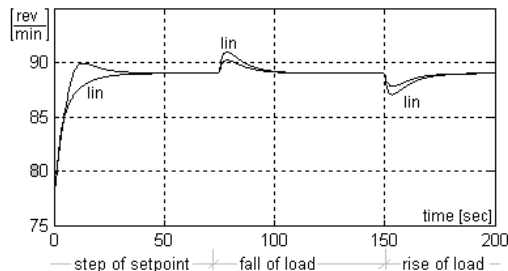


Fig. 22. Step responses for five-times enlargement of process time constant, disconnected  $R$  and correctly tuned  $R_m$  controller, ( $A = 0.9$ )

- Five-times enlargement of the process time constant and disconnected output of the model  $M(s)$  – Fig. 23 and Fig. 24.

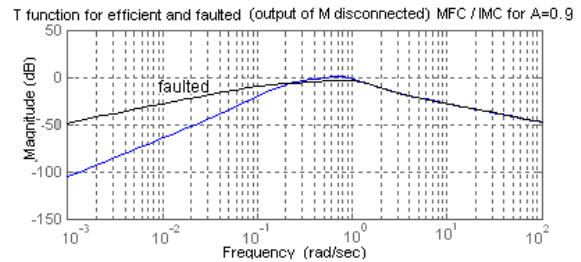


Fig. 23. T function plot for MFC/IMC for five-times enlargement of process time constant, correctly tuned controllers, disconnected model,  $A = 0.9$

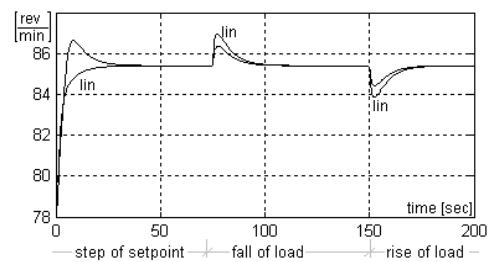


Fig. 24. Step responses of linear and nonlinear structure (five-times enlargement of process time constant, correctly tuned controllers, disconnected model,  $A = 0.9$ )

Ad. f) The simultaneous change of the model and process parameters.

The triple enlargement of the object gain coefficient  $k_c$  as well as simultaneous 3.5 enlargement of the model gain coefficient  $k_{cm}$  in the linear and nonlinear MFC/IMC structure (for  $A = 0.9$ ) does not vary the step responses: performance index IAE for nonlinear system is equal to 1.53 and 1.54 for linear.

If the object gain coefficient  $k_c$  is enlarged four times, and simultaneously the model gain coefficient  $k_{cm}$  will stay without changes ( $k_{cm} = 0.8$ ), the values of the IAE are equal to (for  $A = 0.9$ ): 2.08 for nonlinear system (if  $k_c = k_{cm} = 0.8$  IAE is equal to 5.13) and 3.46 for linear system (if  $k_c = k_{cm} = 0.8$  IAE is equal to 5.23).

If the object gain coefficient  $k_c$  is enlarged twice (for larger gains nonlinear system is unstable) and simultaneously the model gain coefficient  $k_{cm}$  will stay without changes ( $k_{cm} = 0.8$ ) then the values of the IAE criterion are equal to (for  $A = 0.9$ ): 5.25 for nonlinear and 4.35 for linear systems.

## 5. CONCLUSIONS

The carried out research allows to consider MFC/IMC structure as fault tolerant control. It is robust for the following perturbations:

- 1) Changes of operating points in the case of nonlinear process (Figs. 4, 5);

- 2) Model inaccuracy (Figs. 6, 7); model inaccuracy has been simulated by changes of the process gain coefficient;
- 3) Wrong tuning parameters of controllers (Figs. 8, 9);
- 4) Catastrophic failures denote the degenerating structure MFC/IMC (see section 4.2.d and Figs. 23, 24) with exception of the situation with disconnected model  $M(s)$ , because MFC/IMC transforms into fixed-value control loop.
- 5) Changes of the process parameters (Figs. 19, 20);
- 6) Changes of the process parameters with simultaneous disconnecting of the correcting controller (Figs. 21, 22);
- 7) Simultaneous changes of parameters of the process and model.

## REFERENCES

- [1] Brzózka J.: *Układ regulacji prędkości obrotowej typu MFC z regulatorem rozmytym*, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Morskiej w Szczecinie nr 71, 2004, pp. 89-99.
- [2] Brzózka J.: *Analysis of nonlinear MFC/IMC structure for a ship engine speed control*, V Konferencja Explo-Ship 2008, submitted for publication.
- [3] Kowalski Zb.: *Badania symulacyjne podsystemów napędowych statku*, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Elektryka nr 49, 1980.
- [4] Masanori I. et al.: *Main engine revolution control for ship with direct drive volume control system*, Proceedings of the 6th International Symposium on Marine Engineering Tokyo, 2000.
- [5] Skoczowski S. et al.: *Odporna regulacja PID o dwóch stopniach swobody*, Warszawa, PWN-MIKOM 2006.

## Acknowledgments

The author would like to thank Teresa Kurowska, Ph. D. Eng. for her valuable suggestions and comments which help improve this paper.



**BRZÓZKA Jerzy** received his Ph.D.Eng. degree in automatic control in 1982. He is currently Head of Department of Vessel's Control Systems in the Maritime University of Szczecin (Poland). His current research interests include robust, PID, intelligent and fault-tolerant control.



## SIMULATION MODEL FOR TESTING PATROL-INTERVENTION VEHICLE

Przemysław SIMIŃSKI, Maciej ZAJĄC

Military Institute of Armour and Automotive Technology (WITPiS)  
05-070 Sulejów, 1 Okuniewska St., tel. +48 (22) 681 12 04  
e-mail: [zbwo@wp.pl](mailto:zbwo@wp.pl)

### Summary

Experimental research studies of vehicles are of high cognitive importance. However, they are expensive, time-consuming and sometimes dangerous, especially when they refer to edge safety parameters of a vehicle motion. Their scope can be limited if researchers conducting the studies have at their disposal a mathematical model of the vehicle motion and dynamics and a simulation program allowing for carrying out research in „virtual space.” A start-up of the simulation process requires gathering a relevant and require amount of data. If the simulation research studies that have been conducted are used for experimental verification, it is essential to obtain them to carry out a „package” of a series of experiments and a detailed design documentation analysis. Such a proceeding has been conducted with reference to research and development project of Ministry of Science and Higher Education (MNiSzW) No. R0000901 entitled „Determination of an impact that selected design and maintenance parameters of patrol-intervention vehicle have on values of boundary parameters of steerability and steadiness of the vehicle”. As part of its implementation, a model has inter alia been constructed using a multi-body-system class of software. The model has also gone through its experimental verification process basing on a test of a double change of traffic lane recommended by ISO standards.

Keywords: modeling, simulation, MBS programs.

### MODEL SYMULACYJNY DO BADAŃ SAMOCHODU PATROLOWO-INTERWENCYJNEGO

#### Streszczenie

Badania eksperymentalne pojazdów mają bardzo duże znaczenie poznawcze. Są jednak drogie, czasochłonne i niekiedy niebezpieczne, szczególnie jeśli dotyczą granicznych parametrów bezpieczeństwa ruchu pojazdu. Ich zakres może być ograniczony, jeżeli prowadzący badania dysponuje modelem matematycznym ruchu i dynamiki pojazdu oraz programem symulacyjnym umożliwiającym prowadzenie badań w „przestrzeni wirtualnej”. Uruchomienie procesu symulacji wymaga zgromadzenia odpowiednie, wymaganej ilości danych. Jeśli prowadzone badania symulacyjne będą wykorzystywane do weryfikacji eksperymentalnej, do ich pozyskania niezbędne jest przeprowadzenie „pakietu” szeregu eksperymentów oraz szczegółowej analizy dokumentacji konstrukcyjnej. Takie postępowanie zostało przeprowadzone w związku z projektem badawczo-rozwojowemu MNiSzW nr R0000901 pod tytułem „Określenie wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych samochodu patrolowo-interwencyjnego na wartości parametrów granicznych kierowności i stateczności tego pojazdu”. W ramach jego realizacji zbudowano, między innymi, model z wykorzystaniem oprogramowania klasy multi body system. Model też został poddany procesowi weryfikacji eksperymentalnej bazując na teście podwójnej zmiany pasa ruchu zalecanym przez unormowania ISO.

Słowa kluczowe: model, symulacja, program MBS.

### 1. MODEL GENERAL DESCRIPTION

The goal was to prepare a simulation model reflecting a real object, namely the patrol-intervention vehicle „Dzik” (wild bore).

Out of the whole series of presently available professional software programs for dynamic and kinematical analysis of multi-weight systems, such as e.g.: DADS, ADAMS, SIMPACK, MEDYNA or NEWEUL, it was DADS program that was used for modeling the wheeled vehicle.

In the first phase, the model data (inter alia position of the main and local coordinate systems, geometrical dimensions, inertia and weight parameters, as well as dampening and elastic characteristics) is entered and then presented in a form of a group of elements by using a graphic interface DADSModel. Next, the system of differential equations, describing a motion of the model, is generated using Lagrange's equation of the second kind. Then position, velocity, and accelerations of individual element of the system are

determined as well as their interaction (forces, moments).

Modeling results can be presented in a form of time-runs of selected quantities, or using computer animation illustrating a behavior of the entire system from any point of view.

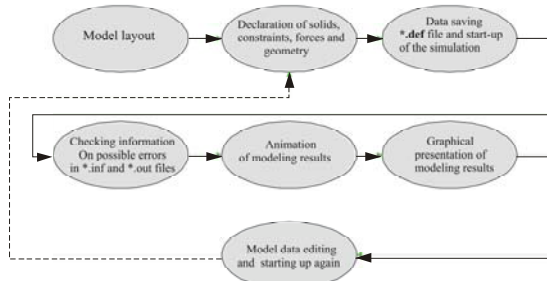


Fig. 1. Modeling phases in DADS program

The model created in DADS program is saved in \*.def file where the following four types of basic information are stored:

- DADS model elements, such as coordinate systems, solids, constraints, forces and limitations;
- information on appearance and surroundings – color of surroundings, observation angle and point of the model, etc.;
- information on hierarchy of animation – which elements of geometry are allocated to which solids;
- sizes of geometrical figures.

## 2. DATA TO THE MODEL

Theoretical model of any structure usually consists of a nominal, physical, mathematical and simulation models. Mathematical description in a form of differential equations for each variable of the status allows simultaneously for very easy switch into simulation model. Such a model is nowadays a relevant computer program allowing for numerical integration of differential equations of the mathematical model with a possibility for observing in time function and recording of values of individual variable of the status and output quantities.

### 2.1. Nominal Model of the Vehicle

The object of research studies was a patrol-intervention vehicle also being used by Military Police and on the basis of which special over-constructions are made.

Functionally, the vehicle is divided into two main compartments: passenger and engine. Basic elements of the vehicle as a mechanical system are as follows: rigid body shell with a frame, engine with power transmission system and driving system.

Placed on the frame, the body shell is a rigid solid inside of which mounted are inter alia driving motor with power of 150 KM, power transmission system, special equipment and a separated

workplace for the driver and the crew. Total weight of the vehicle is 6.2 t.

### 2.2. Physical Model of the Vehicle

In the process of physical model development, it is essential to consider those features of the vehicle that have a crucial impact on the course of dynamic processes and loads shifting between elements of the vehicle [2]. In this process, the vehicle is substituted by an equivalent system of a few solids and material points, its shapes are simplified, impacts of minor importance are omitted, homogeneity of material is assumed, and deformation exposure of elements (weights) [1, 3] are disregarded.

The following assumptions have been adopted when preparing the physical model of the wheeled vehicle:

- the vehicle consists of body shell, four wheels (of which the first two are torsional), two axles of rotation;
- changes in weights of individual solids, effecting for instance from fuel consumption, are minor which allows to assume that they are constant;
- the vehicle body is a rigid solid of known weight and weight inertia moments;
- elastic and silencing elements are weightless elements;
- the vehicle performs small vibrations around static balance position;
- constraints that have been imposed on the system are holonomic, scleronomic, and double-sided;
- velocity of the vehicle relocation is constant.

While modeling the coordinate system has been adopted that is related to the center of gravity of the entire vehicle, illustrated on Fig. 1.

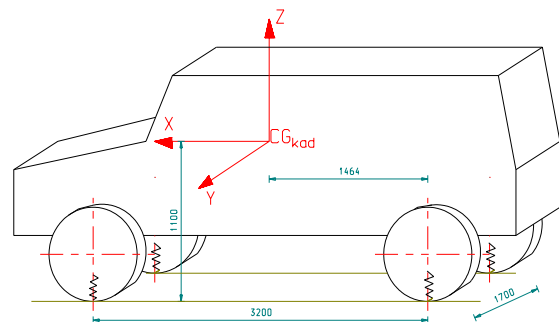


Fig. 1. Adopted coordinate system of the body shell and more important linear values of the vehicle

### 2.3. Simulation Model of the Vehicle

The following preliminary assumptions have been made for the vehicle modeling:

- body shell weight: 5013 kg;
- wheel weight: 98 kg;
- front axle unit weight: 466 kg;
- rear axle unit weight: 496 kg;
- wheels track: 1700 mm;
- axle base: 3200 mm;
- wheel static radius: 465 mm;
- front axle springs base: 690 mm;



- rear axle springs base: 830 mm;
- front axle shock absorbers base: 732 mm;
- rear axle shock absorbers base: 960 mm;
- rolling resistance coefficient: 0.15;
- adhesion coefficient: 0.9;
- king-pin advance angle:  $7.0^\circ$ ;
- king-pin inclination angle:  $11.0^\circ$ ;

For modeling purposes, local coordinate systems related to solids have been adopted and relevant inertia moments have been defined against the systems, which would reach e.g. for body shell:

$$I_{X\_kadl} = 4841 [kg \cdot m^2],$$

$$I_{Y\_kadl} = 17671 [kg \cdot m^2],$$

$$I_{Z\_kadl} = 18334 [kg \cdot m^2].$$

Front and rear shock absorbers as well as front and rear shock absorbers have been the elastic-silencing elements included in the vehicle model. Additionally, impact of lateral control rods in the suspension and tires elastic vulnerability have been considered.

Characteristics of the above-mentioned elements have been determined in experimental way by WITPiS research team (tires and lateral control rods) and delivered by the chassis manufacturer (characteristics of shock absorbers and silencers).

The model has taken the steering system driver ratio into consideration, but not the steering plays of the steering system.

A total of 7 solids have been listed in the model, including:

- body shell: having a possibility of shifting along 3 axes and rotations around them;
- 2 front torsional wheels,
- 2 rear wheels;
- front axle unit: having a possibility of vertical shifts and angular relocations against the body shell;
- rear axle unit: having a possibility of vertical shifts and angular relocations against the body shell;

Extortions have been included in the model:

- in a form of torque being applied to the front axle and aiming to move the vehicle at a given velocity;
- in a form of angular relocation of front axle wheels against the front axle unit, aiming at causing a turning maneuver.

Fig. 2. illustrates a view of the entire vehicle model created in DADS program together with marked characteristic coordinate systems. The subsequent Figures 3 and 4 present in close-up front and rear axles together with icons symbolizing elastic-silencing elements and with icons defining relative relocations of solids.

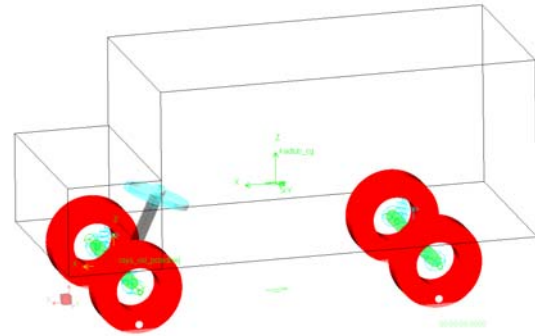


Fig. 2. View of the vehicle model in DADS program

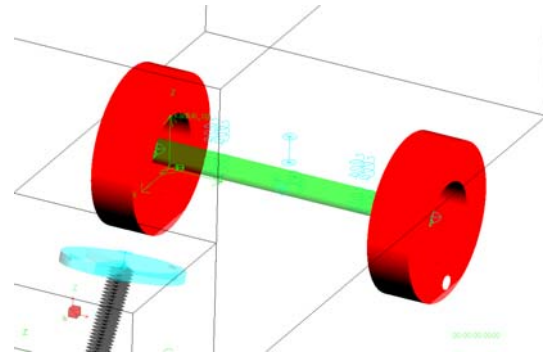


Fig. 3. View of the vehicle rear axle unit in DADS program

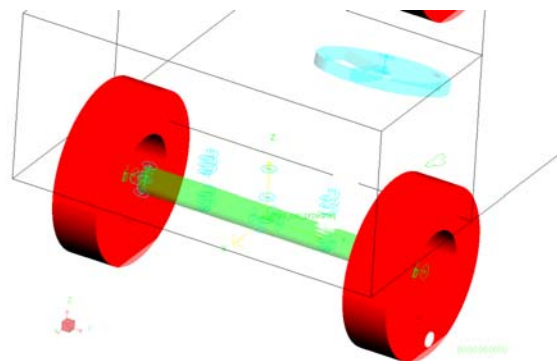


Fig. 4. View of the vehicle front axle unit in DADS program

### 3. PRELIMINARY VERIFICATION OF THE MODEL

The main goal of the first phase has been to develop a computer model of the patrol-intervention vehicle, while the intension of phase II has been to verify the model against results of experimental research tests.

Nevertheless, when preparing the model it is necessary to make in parallel a preliminary verification at each phase of the model development in order to eliminate cumulation of possible errors and inability to detect them in the future.

Results, delivered by ZPS WITPiS and obtained during a test of a maneuver of a double change of traffic lane at various velocities of attack, have been used in the phase of preliminary verification of the model. Attack velocities and angular positions of the



steering wheel, obtained during actual measurements, were being entered into the model.

The vehicle's center of gravity position was being assessed while preliminary verification.

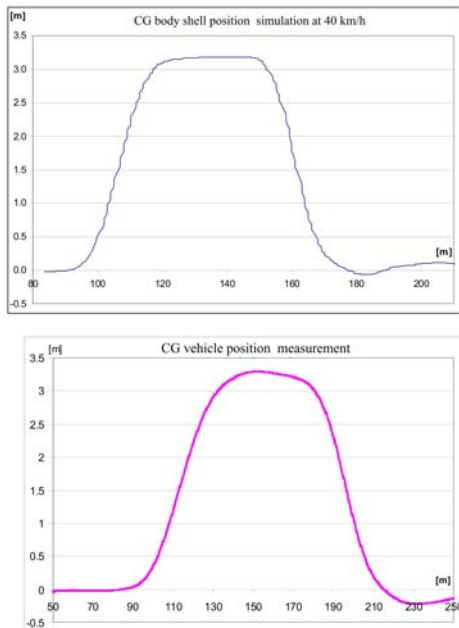


Fig. 5. Comparison of a position of the center of gravity of the vehicle for simulation purposes and real measurements at  $V=40$  km/h

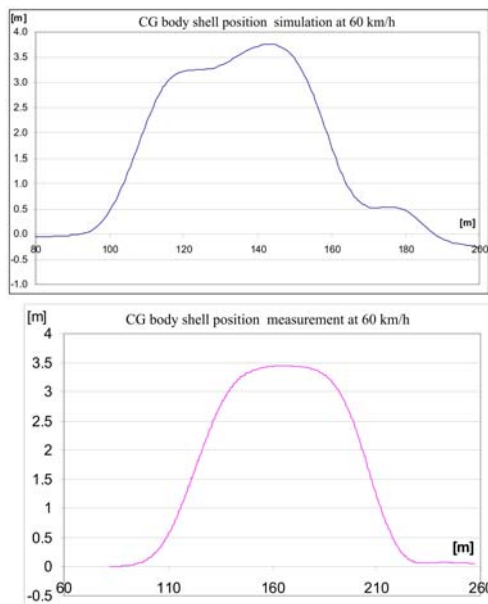


Fig. 6. Comparison of a position of the center of gravity of the vehicle for simulation purposes and real measurements at  $V=60$  km/h

#### 4. SUMMARY

The hereto developed simulation model of the vehicle has been to a considerable degree parameterized, which means that it allows for changing a value of a specific parameter in options „Parameters” – in the main window of the model.

The result of conducted preliminary computer simulations, basing on the aforementioned simplifying assumptions, proves that to a certain extent the model reflects a real object, nevertheless it requires further work focusing on more complete verification in the aspect of defined values that have been obtained while taking measurements, which will be continued in further work phases.

#### REFERENCES

- [1] Borkowski W., Konopka S., Prochowski L.: *Dynamics of machines*. WNT. Warsaw 1996.
- [2] Cannon R. H.: *Dynamics of physical systems*. WNT. Warsaw 1973.
- [3] Żółtowski B.: *Research of dynamics of machines*. Wyd. Markar-BZ. Bydgoszcz 2002.



PhD Przemysław SIMIŃSKI is Head of Automotive Division in Military Institute of Armour and Automotive Technology. He is engaged in research work simulation and experimental tests for wheeled vehicles.

PhD Maciej ZAJĄC is a specialist in Polish Land Forces Command. He is engaged in research work simulation and experimental tests for tracked vehicles.

## APPLICATION OF ALTERNATING ELECTROMAGNETIC FIELDS IN TECHNICAL DIAGNOSTICS OF ENGINEERING OBJECTS OF LONG-TERM USAGE

E. GRUDZIŃSKI<sup>1</sup>, P. DUB<sup>2</sup>, P. DRABYCH<sup>2</sup>, L. DYKMAROVA<sup>2</sup>, V. NICHOGA<sup>2</sup>, L. SOPILNYK<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Wrocław University of Technology, Wrocław, Poland

<sup>2</sup>Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

<sup>3</sup>Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
nich@ipm.lviv.ua, [eugeniusz.grudzinski@pwr.wroc.pl](mailto:eugeniusz.grudzinski@pwr.wroc.pl)

### Summary

Electromagnetic methods, which are based on determination of the characteristics of the electromagnetic fields radiated by inspected objects when alternating electrical currents flow in them, are widely used in engineering practice. Some results of investigations connected with application of alternating electromagnetic fields for searching defects of oil and gas pipes and rails in motion are presented in the report.

Keywords: Alternating electromagnetic field, Technical diagnostics, Long-term usage.

### 1. INTRODUCTION

Continuous development of new objects of railway transport, power engineering, various branches of industry and agriculture leads to increase of number and concentration of stretched engineering objects of long-term usage (such as oil and gas pipelines, main and town water pipes, urban and long-distance cables of various using, rails and the like). More accurate information about such communication and rails situation and technical state inspection (in particular, determination of insulation covering damages and investigation of corrosion processes in pipelines, detecting of rail cracks) are the conditions of their effective usage and trouble-free operation.

Effective usage and fail-safety of underground hidden engineering communications are guaranteed by possessing information about their location and inspection of their technical state, determination of places of insulation damages, abnormal groundings, and zones of appearance and progress of corrosion processes.

Electromagnetic methods, based on the measurement of some parameters of the electromagnetic field (EMF) caused by the alternating current that flows along the axis of an underground communication or a rail and is introduced there by special generators or by a station of cathodic protection, are now one of the most effective methods for solution of the mentioned problems [1-8].

Electromagnetic method as one of the most effective one for solving the mentioned complex of problems has been developed in the Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine during 20 years. Remote inspection of underground communications is realized using the current which is introduced into

a wire by a special generator or as harmonics of pipeline cathodic protection current.

In some cases the parameters of the underground communication magnetic field (MF) are measured in two points situated along the communication and values of current in these points are calculated. If difference between two current values is too big we can draw a conclusion that insulation covering is damaged. In other methods changes of electrical field (EF) can give information about such damages.

Also alternating current field measurement method (ACFM) can be used for detection of defects in rails.

### 2. DETERMINATION OF DEFECTS IN UNDERGROUND COMMUNICATIONS

There are many methods of searching underground communications and determining their coordinates. Contemporary searching-measuring devices measure mainly the magnetic field of the cathodic protection current ( $f=100$  Hz) in pipelines, special generator of alternating current or proper signals of communication lines.

Our investigations have shown that measurement of parameters of alternating current field can give some information about pipe-ground impedance and dimensions of damages of the pipe insulation [4].

The mentioned methods are insufficiently effective in the cases when there are some other communications near the inspected pipeline or cable with similar signal that can be considered as an additive interference.

Such interference can be essentially decreased by usage of difference measurements [1-3]. This method is illustrated by Fig.1, where linear communication 1 is situated in ground 2. For measuring MF of the current I in the communication two identical coils L1 and L2 with cores are used. For low-frequency MF.

$$H_1 = \frac{I}{2\pi h}, \quad (1)$$

$$H_2 = \frac{I}{2\pi(h+a)}. \quad (2)$$

The measuring device measures  $E_2$  – the output signal of  $L2$ , which is proportional to  $H_2$ , and  $\Delta E = E_1 - E_2$  – difference of the output signals of  $L1$  and  $L2$ . Equality  $\Delta E = 0$  means that the measuring device determines the communication axis.

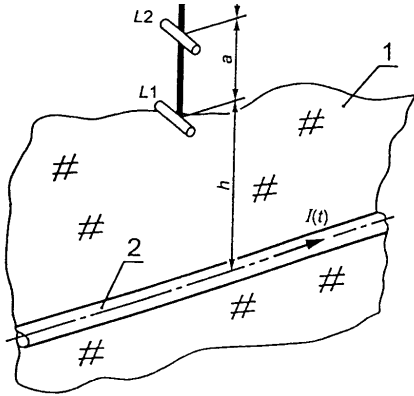


Fig. 1. Scheme of searching an underground communication and determining its coordinates

We can obtain taking into account Eqs. (1) and (2)

$$h = \frac{\Delta E}{E_2}. \quad (3)$$

$$I = 2\pi E_1. \quad (4)$$

This method is used in the IMK-5 equipment that is described in Section 5.

Existent electromagnetic searching-measuring systems, that use more effective non-contact methods, measure, as a rule, only the magnetic component of the EMF radiated by a communication. And the electrical component, which has some additional information about an investigated object, is measured now only in contact methods. Thus problems of determination, investigation and usage of new informative characteristics of electrical component of underground communications EMF are, without doubt, very actual (especially, elaboration of non-contact methods of electrical field measurement).

In the report the problem of determination of the electrical component of EMF of a metallic underground communication which model is represented as a stretched conductor (wire) with taking into account presence of boundary between two mediums (ground and air in our case) is considered according to methods described in [4].

### 3. RAIL DIAGNOSTICS BY APPLICATION OF ALTERNATING CURRENT

The method of alternating current field measurement (ACFM) is now developed in the Karpenko Physico-Mechanical Institute. It is based on the application of alternating current that is introduced into the rail by contact method or by using a special source of magnetic field that induced current in the rail [5, 8]. The induced current flows in the rail and creates magnetic field which spatial coordinates are measured by usage of induction sensors. The rail cracks and other damages cause disturbances in the magnetic field. Using those disturbances allows detecting defects and determining their character and dimensions. The method can be used during motion. The typical view of signal in the induction sensors for three components for the case of transversal crack in the rail is shown at Fig. 2.

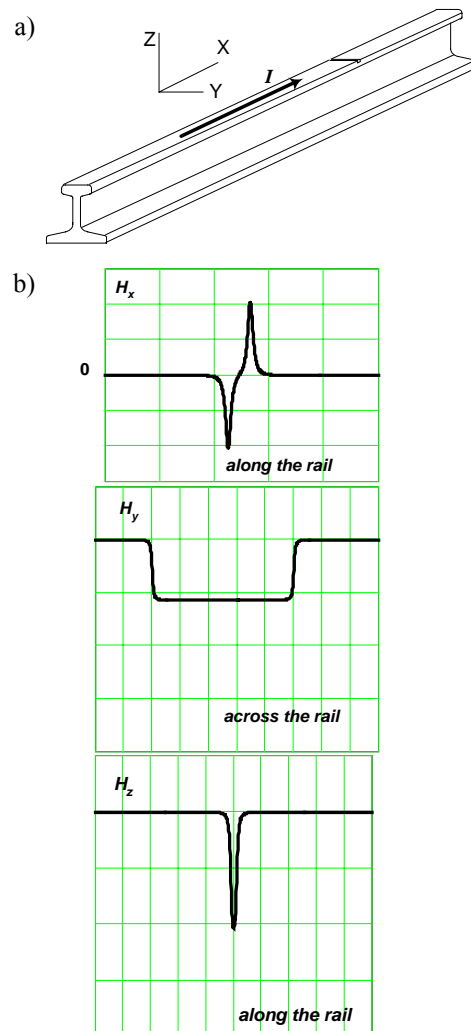


Fig. 2. Typical view of signal in the induction sensors for three components for the case of transversal crack in the rail:

- a) axes orientation and the rail with the crack,  
b) magnetic field components

#### 4. ESTIMATION OF THE INFORMATIVE PARAMETERS OF ELECTROMAGNETIC FIELDS USED DURING TECHNICAL DIAGNOSTICS

During searching and electromagnetic inspection of the technical objects of long-term usage not only informative signals but also interference fields of continuous and impulse character influence on receiving sensors. That fact causes stochastic character of input signal. The signal structure and methods of such interference suppression are described, mainly, in [1-3].

The temporal and amplitude values (elements) of signal are stochastic values because of presence of additive noise  $\eta(t)$ . Their series can be presented for statistical processing by aggregate of discrete stochastic signals of the following type

$$\{\xi_i, i \in Z\}, \quad (5)$$

where  $\xi_i$  –  $i$  amplitude, temporal or integral magnitude of a signal.

During impulse electromagnetic investigation there are the following informative elements:  $i$ -magnitude of the initial amplitude of the radiated dying oscillations,  $i$ -magnitude of the amplitudes sum and  $i$  integral characteristics.

The amplitude and the phase are informative parameters of a measuring signal when using harmonic electromagnetic.

Estimation of informative parameters of impulse and continuous stochastic signals are realized, as a rule, using only single realization. That demands fulfillment of local stationarity condition for discrete stochastic processes (5). If the problem of estimation of the  $s$  moment of the process (5) is discussed, the condition of local stationarity can be formulated as

$$|\hat{m}_i^s - \hat{m}_j^s| < \varepsilon, i, j \in (r, r+M) \subset Z, \quad (6)$$

where  $\hat{m}_i^s, \hat{m}_j^s$  – estimation of  $s$  moments of values  $\xi_{in}, \xi_{jn}$ , obtained as averaging of statistical ensemble of the realization,  $n$  – the realization number,  $\varepsilon$  – estimation tolerated error,  $M = const$ ,  $(r, r+M)$  – the local stationarity interval.

During searching and electromagnetic inspection of hidden objects it is necessary not only to determine estimation of informative signals parameters but also carry out their functional transformation, for example, when determining depth of location  $h$  and current amplitude  $I_m$  of an underground communication it is needed to fulfill calculation based on the formulas:

$$h = a \frac{\hat{E}_2}{\hat{E}_1 - \hat{E}_2}, I_m = 2\pi \hat{E}_1, \quad (7)$$

where  $\hat{E}_1, \hat{E}_2$  – estimation of the electromotive forces induced in induction sensors by the communication field.

Recurrent algorithms, described by inhomogeneous difference equations of the first

order, are used to guarantee synchronous realization of two tasks: determination of stochastic signal characteristics and specific functional transformation of their evaluation:

$$\Delta Q_i = aF(\xi_i, \zeta_i) - b\Phi(\xi_i, \zeta_i)Q(i-1), \quad (8)$$

where  $\Delta Q_i = Q(i) - Q(i-1)$  – change of the input parameter of computing transformer after registration of  $i$ -magnitude of the signal informative elements  $\xi_i, \zeta_i$ , and  $i \in A = 0, 1, 2, 3, \dots$ ;  $a$  i  $b$  – constant coefficients;  $F(\xi_i, \zeta_i)$  and  $\Phi(\xi_i, \zeta_i)$  – functions of the discrete magnitudes transformations  $\xi_i, \zeta_i$ . In our case additive sums of amplitude values  $E_1$  i  $E_2$  of induction sensors and instantaneous values  $\eta_{1i}$  and  $\eta_{2i}$  of interference  $\eta_1(t)$  and  $\eta_2(t)$ , that are induced in them, can be considered as  $\xi_i, \zeta_i$ , i.e. the registered signal can be described by the mathematical model in the shape of discrete stochastic signals of the following type:

$$\{E_{1i}\} \text{ and } \{E_{2i}\}, \text{ or } \{\Delta E_i\}, \quad (9)$$

where  $E_{1i} = E_1 + \eta_{1i}$ ,  $E_{2i} = E_2 + \eta_{2i}$  and  $\Delta E_i = E_{1i} - E_{2i}$ .

Using Eq. (8) it is possible to formulate the following algorithms of synthesis of averaging depth measurers  $h$ :

$$\Delta Q_{1i} = a_1 E_{2i} - b_1 \Delta E_i Q_1(i-1), \quad (10)$$

$$\Delta Q_{2i} = a_2 \frac{E_{2i}}{\Delta E_i} - b_2 Q_2(i-1). \quad (11)$$

Recurrent expressions (10) i (11) can be realized using discrete analogue and digital elements or using microcomputer devices.

Technique of determination of statistical and dynamic characteristics developed on the basis of recurrent formulas of averaging computational devices is used in several technical realizations [1-3, 7].

#### 5. THE IMK-5 SYSTEM FOR TECHNICAL DIAGNOSTICS OF UNDERGROUND ENGINEERING COMMUNICATIONS

The IMK-5 information-measuring device (Fig. 3) [7] is described in this section as an example of manufactured devices used described investigations. It is intended for searching, locating and detecting of insulation faults of main oil, gas and product pipelines and other underground communications (power lines, communication, telecommunication lines and others), and for rapid territory investigation before ground work conduction with the purpose of the indicated communication detection to prevent their damage.

The device operates on the basis of investigation of magnetic and electric components of alternate electromagnetic fields radiated by a communication.

The device allows determining an axis, a depth and insulation faults of a communication at the depth to 5 m.

An axis determination error is less than  $\pm 20$  sm, and a depth error is less than  $\pm 10\%$ .

Underground communication locating is conducted by difference signal of two magnetic sensors located on the same pole that gives it advantages over analogous devices by noise-immunity and axis and depth determination precision in the conditions of high noise level from power grid of industrial equipment and neighbour communications.

Insulation fault places are localized by remote determination of numerical characteristics of electric component of electromagnetic field on ground surface over communication axis.

At determination of axis and depth of a communication, there are three operating modes 50, 100 and 222 Hz. 222 Hz frequency is used at work under close conditions (a great deal of communications is concentrated) or at absence of 50 and 100 Hz currents in metal communications, and also for insulation fault locating. These signals are generated by the GS-2 generator.

In the device there are a sound indication for axis search, a digital one for depth registration and an analogue one for insulation fault location registration.

The IMK-5 dimensions are 860 x 230 x 60 mm; device weight - 2,7 kg.

The GS-2 generator dimensions are 300 x 190 x 130 mm; weight - 3,5 kg.



Fig. 3. General view of the IMK-5

## 6. CONCLUSIONS

In the report the following problems were considered: determination of location and insulation state of the underground communications and pipelines by investigating parameters of magnetic and electrical fields radiated by such objects, the most efficient methods of determination of corrosion state of pipelines by non-contact methods, new alternating current field measurement method of rail diagnostics. Technical parameters of the IMK-5 device for diagnostics of underground engineering communications that was elaborated in the Physico-mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine are given.

## REFERENCES

- [1] П. П. Драбич. Структура та обробка стохастичних сигналів під час електромагнітних досліджень. Відбір і обробка інформації. – Львів: ФМІ НАН України. – Вип. 15 (91). – 2001. С. 123-132.
- [2] О. П. Драбич, П. П. Драбич, І. М. Яворський. Властивості когерентних оцінок параметрів зашумленого потоку імпульсних коливних сигналів. Відбір і обробка інформації. – Львів: ФМІ НАН України. – Вип. 12 (88). – 1998. С. 71-76.
- [3] Драбич П. П., Драбич О. П., Стецько І. Г. Електромагнітні прилади і системи пошуку і обстеження підземних магістральних трубопроводів. Ринок інсталяційний. Львів: ЕКОінформ. – 2001. – №9.
- [4] L. Dikmarova, R. Dzhala, V. Nichoga, P. Dub. External Electromagnetic Field of Underground Pipeline in the Problems of Corrosion Protection. Proceedings of 5th International Conference on Applied Electromagnetics (ПЕС2001), Niš, Yugoslavia, 8-10 October 2001. – P. 41-45.
- [5] I. Javorskij, I. Isayev, V. Nichoga, G. Trokhym, E. Grudziński. Statistical Analysis of Rail Electromagnetic Testing Signals. Diagnostics, Poland. – Vol. 30, Tom.1. – P. 217-220.
- [6] Л. П. Дикмарова, В. А. Ничога, П. Б. Дуб.: О возможности определения коррозионного состояния подземных трубопроводов бесконтактными методами. Датчики и системы, №12, 2004, С.6-9.
- [7] Електромагнітна пошуково-вимірвальна система IMK-5 / Драбич П.П., Драбич О.П., Дуб П.Б., Пугач М.Д., Стецько І.Г., Яворський І.М. // Наука та інновації. – 2006. Т. 2. № 5. – С. 41-52.
- [8] В. О. Нічога, П. Б. Дуб, В. М. Іванчук, Ю. М. Романишин. Дослідження сигналів магнітодинамічної дефектоскопії на Львівській залізниці. Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів (серія). Випуск 13: Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій: Зб. наук праць. – Львів: Фізико-механічний інститут НАН України, 2008. – С. 8-19.

**V. Nichoga, P. Drabych, Dykmarova, and P. Dub** are with the Department of Stochastic Signals Extracting and processing of the Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine.

**Eugeniusz GRUDZIŃSKI** is with the Electromagnetic Environment Protection Laboratory of the Technical University of Wrocław, Wrocław, Poland.

**Liubomyr SOPILNYK** is with Lviv Polytechnic National University.

## FAULT DETECTION AND ISOLATION FOR DYNAMIC PROCESSES USING RECURRENT NEURAL NETWORKS

Piotr PRZYSTAŁKA

Silesian University of Technology  
Department of Fundamentals of Machinery Design  
18a Konarskiego Str., 44-100 Gliwice, [pp@polsl.pl](mailto:pp@polsl.pl)

### Summary

The paper focuses on the problem of fault detection and isolation for dynamic processes using selected recurrent neural networks. The main objective is to show how to employ some discoveries of the chaos theory for modeling processes by means of globally and locally recurrent neural networks. Both types of neural models are used in fault detection and isolation block. The performance of the FDI system is examined using two types of neural models: Jordan/Elman tower neural networks and networks with dynamic neural units. The paper contains numerical examples that illustrate the merits and limits of these two approaches.

Keywords: fault detection and isolation, Jordan and Elman neural networks,  
locally recurrent neural networks, chaos theory.

### DETEKCJA I LOKALIZACJA USZKODZEŃ PROCESÓW DYNAMICZNYCH Z UŻYCIEM SIECI REKURENCYJNYCH

### Streszczenie

Treść artykułu wiąże się z problemem detekcji i lokalizacji uszkodzeń dla szerokiej gamy procesów dynamicznych z użyciem wybranych rekurencyjnych sieci neuronowych. Głównym celem jest pokazanie w jaki sposób mogą zostać zastosowane niektóre z odkryć teorii chaosu do modelowania procesów z użyciem globalnych i lokalnych struktur neuronowych. Oba typy modeli neuronowych zostały użyte w bloku detekcji i lokalizacji uszkodzeń. Sprawność układu diagnostycznego porównana została dla modeli procesów z zastosowaniem: sieci wielokontekstowych Jordana/Elmana i sieci z neuronami dynamicznymi. W artykule zamieszczono przykłady numeryczne wskazujące na zalety i wady obu podejść.

Słowa kluczowe: detekcja i lokalizacja uszkodzeń, sieci Jordana i Elmana,  
sieci lokalnie rekurencyjne, teoria chaosu.

## 1. INTRODUCTION

The increasing complexity of technical means is known to be one of the most important problems in the modern control system design and analysis. Chemical refineries, electrical furnaces, aircrafts and even small inspection robots are complex systems and in some cases cannot be precisely described by classical mathematical models [3, 9, 10]. On the other hand, modern technical systems can be controlled despite faults affecting its components [2]. Due to these facts, fault diagnosis methods and fault-tolerant control design using soft computing techniques are gaining more and more attention in recent years [7, 8].

There are a large number of real-world control problems that can not be solved by conventional (hard) computing methods and it is well-founded to use the human mind-based reasoning which is included in soft computing [23]. Nevertheless, soft computing is not always a sufficient solution for our task. In numerous industrial applications hard computing plays a major role. As it can be observed,

soft computing techniques are usually combined with traditional hard computing approaches in industrial products instead of using them separately [7].

In recent years, artificial neural networks, especially recurrent ones have attracted considerable research interest in the fields of control and diagnostic systems [1, 9]. On the one hand, results and data from industrial applications confirm human safety and economic efficiency of such approaches [7, 10], but on the other, there is still the need to elaborate much more general neural models that might be used for modeling both deterministic and stochastic processes simultaneously [8, 17].

Chaos together with the theory of relativity and quantum mechanics is considered as one of the three monumental discoveries of the twentieth century [24]. The peculiarities of chaotic systems can be given as follows: strong dependence of the behavior on initial conditions, the sensitivity to the changes of system parameters, presence of strong harmonics in the signals, fractional dimension of space state trajectories, at least one positive Lyapunov exponent

that characterizes the rate of separation of infinitesimally close trajectories [24].

The paper contains numerical examples illustrating the performance of recurrent neural networks in two kinds of problems: time-series prediction and fault diagnosis of a simplified three-tank benchmark system. The first task is to create a neural model of a process given by the differential equations. The main objective is to show how to employ some discoveries of the chaos theory for training considered neural networks. In this paper, two parts of this approach are used: applications of some chaotic systems to improve learning algorithms for recurrent neural networks and phase-space reconstruction as the first step in the modeling of dynamic processes. The second task is to build the fault detection and isolation block for a benchmark problem based on recurrent neural networks. Finally, the last section summarizes the important features of these approaches and the paper concludes with the future work.

## 2. RECURRENT NEURAL NETWORKS

Generally speaking, recurrent neural networks can be viewed as universal approximators for spatio-temporal data [11, 12]. They can be classified into two categories: globally (totally or partially) recurrent and locally recurrent networks. In the first class, there are structures with feedback connections between simple static neurons of different layers or/and these of the same layer. The second one encompasses neural structures similar to static feedforward topologies, however they include dynamic neural units with internal feedback connections [9].

### 2.1. Jordan/Elman tower neural networks

Jordan and Elman networks were first introduced in [4, 5] and were classified as partially recurrent networks [9, 19]. These structures can learn sequential patterns and are usually employed to learn the grammatical structure of a set of sentences. However there are also their applications in the domain of system identification theory [18]. Jordan/Elman tower networks used herein differ from standard Jordan/Elman topologies in that they may have more than one state vector (Fig. 1). It is well-founded that such multi-state architectures have better learning abilities on certain tasks than standard Jordan/Elman ones of similar weight complexity [19, 20].

Outputs of the considered types of Jordan and Elman networks are defined as follows:

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{LW}^2 \sigma(\mathbf{IW}^1 \mathbf{u}(k) + \mathbf{p}(k) + \mathbf{b}^1) + \mathbf{b}^2 \quad (1)$$

a) for multi-context Jordan networks:

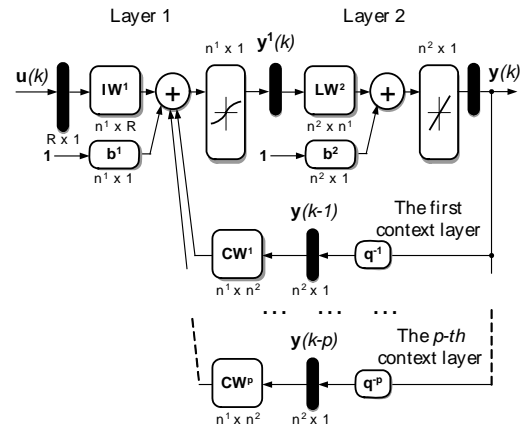
$$\mathbf{p}(k) = \mathbf{CW}^1 \mathbf{y}(k-1) + \dots + \mathbf{CW}^p \mathbf{y}(k-p) \quad (2)$$

b) for multi-context Elman networks:

$$\mathbf{p}(k) = \mathbf{CW}^1 \mathbf{y}^1(k-1) + \dots + \mathbf{CW}^p \mathbf{y}^1(k-p) \quad (3)$$

where  $\mathbf{IW}$ ,  $\mathbf{LW}$  are input and layer weight matrixes,  $\mathbf{y}(k-i)$  and  $\mathbf{y}^1(k-i)$  represent output and hidden layer states,  $\mathbf{CW}^i$  denoting the weight matrix in the  $i$ -th context layer,  $\mathbf{b}$  is a bias vector,  $\sigma$  is a non-linear function.

(a) multi-context Jordan net



(b) multi-context Elman net

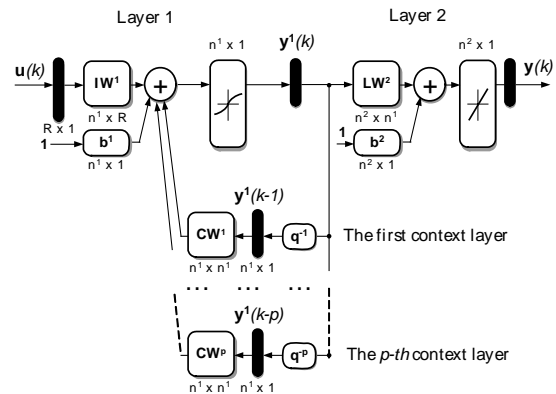


Fig. 1. Partially recurrent networks [19, 20]

### 2.2. Locally recurrent neural network

Typical locally recurrent architecture is obtained by introducing dynamic elementary processors into the structure of a feedforward network [9]. Such models are frequently called locally recurrent globally feedforward neural networks. Some of the most important strategies for developing dynamic units and locally recurrent topologies, and their applications in areas of technical diagnostics can be found in [1, 8, 9, 10, 11].

The topology of the network used herein is illustrated in Fig. 2. This structure has been introduced and discussed by the author in his previous papers [13, 14, 15]. In the first layer there are simple static neurons with a non-linear output function. The second hidden layer includes dynamic neurons with a non-linear output function. Such units are achieved by introducing linear dynamic



systems into its structure. The last layer consists of simple static units but the output function is linear.

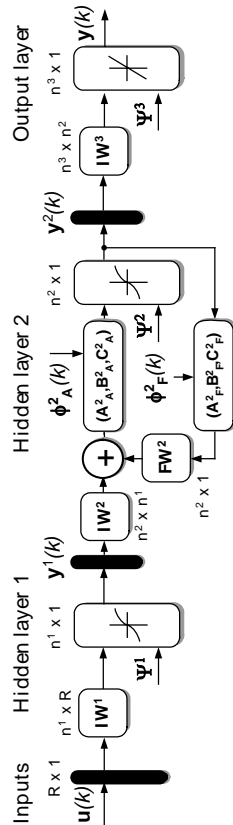


Fig. 2. Locally recurrent network

The output of the  $i$ -th layer of a locally recurrent network is computed using a non-linear or linear transform operator:

$$\mathbf{y}^i(k) = \sigma^i(\xi_2^i(k), \Psi^i) \quad (4)$$

Internal states of neurons in the activation block of the  $i$ -th layer can be written using the polynomial notation in a vector form:

$$\mathbf{A}_A^i(q^{-1}) \circ \xi_2^i(k) = \mathbf{B}_A^i(q^{-1}) \circ \xi_1^i(k) + \mathbf{C}_A^i(q^{-1}) \circ \phi_A^i(k) \quad (5)$$

and also for the feedback block:

$$\mathbf{A}_F^i(q^{-1}) \circ \xi_3^i(k) = \mathbf{B}_F^i(q^{-1}) \circ \mathbf{y}^i(k) + \mathbf{C}_F^i(q^{-1}) \circ \phi_F^i(k) \quad (6)$$

An associative input activation of neurons of the  $i$ -th layer is given by the following expression:

$$\xi_1^i(k) = \mathbf{IW}^i \mathbf{p}^i(k) + \mathbf{FW}^i \circ \xi_3^i(k) \quad (7)$$

where  $\mathbf{IW}^i$  is the matrix of external input weights,  $\mathbf{FW}^i$  is the vector of feedback weights,  $\xi_n^i(k)$  denotes the vector with activation or feedback states of neurons in the  $i$ -th layer,  $\phi_{A/F}^i(k)$  represents the vector of the random process.

### 3. NEURAL MODELLING

The main objective of training process is to minimize some loss function. Due to this purpose and also to prevent other troubles such as the stability of a model and the local minima problem, a hybrid scheme is used for both types of neural structures. A global algorithm is able to reach the region near an optimum point relatively quickly by minimizing the combined function:

$$E(\Theta) = \sum_m (\mathbf{y}(\mathbf{u}^m, \Theta) - \mathbf{t}^m)^2 + \beta \sum_i \Theta_i^2 \quad (8)$$

where  $\beta$  is a black box parameter,  $\mathbf{y}(\cdot)$  is a mapping from the input activities  $\mathbf{u}$  to the output activities  $\mathbf{y}$ ,  $\mathbf{t}$  is the target output,  $\Theta_i$  is a network parameter. The second term in Eq. 8 is an additive weight-depend energy.

As one can read in the previous paper of the author [14, 15] for the global optimization several algorithms may be used, for instance: Monte Carlo method, evolutionary algorithm, simulated annealing. Then the solution from the global optimization algorithm is used as an initial point for a local method that is faster and more efficient for local search. It may be realized by minimizing the function (8) for  $\beta=0$  by means of one of the following gradient-based algorithms: the Levenberg-Marquardt method for relative small networks or the BFGS method for larger networks [16].

The framework proposed by [6] is implemented in order to calculate the gradients and Jacobians for Elman/Jordan tower networks. There are two approaches considered: backpropagation-through-time is used in the BFGS formula, whereas real-time recurrent learning is adapted for Jacobian calculation in the Levenberg-Marquardt method. For the locally recurrent network proposed by the author the gradient vector and Jacobian matrix are derived using a numerical differentiation method (e.g. using gradient-based stochastic optimization algorithm) [14]. Therefore there is no need to have the gradient or Jacobian information calculate analytically, but on the other hand, the algorithm works slow [15, 16].

To obtain good training and generalization abilities the optimal structure of a network should be found. Heuristic rules are usually used in the first step to determine an initial structure of the network [13]. Next, it is possible to apply direct search methods to change complexity of the network during the process of optimization of neural models by increasing or reducing the number of hidden layers (context layers), the number of units in layers, changing structures of dynamic systems embedded in the units, etc. It is strongly connected with a process of model evaluation. In this paper, several measures are employed such as:

a) Mean Absolute Percentage Error:

$$MAPE = \frac{1}{jm} \sum_j \sum_m \left| \frac{y_j(\mathbf{u}^m) - t_j^m}{t_j^m} \right| \quad (9)$$

b) Akaike Information Criterion:

$$AIC = \log(E_T(\Theta)) + 2 \frac{d}{m} \quad (10)$$

c) Minimal Description length Criterion:

$$MDL = m \log(E_T(\Theta)) + d \log(m) \quad (11)$$

where  $j$  is the number of outputs,  $m$  is the length of the data set,  $d$  is the number of estimated parameters,  $E_T(\cdot)$  is the loss function (Eq. 8) that is computed for a testing data set ( $\beta=0$ ).

### 3.1. Chaotic rules in global optimization algorithms

In order to improve the computational efficiency of the training process two modifications in global optimization algorithms are proposed by the author. A chaotic mutation operator similar to this used in [21] is introduced and a chaotic modification of the basic simulated annealing is adapted [22].

#### Chaotic mutation operator

In this paper, the chaotic mutation function adds chaotic numbers taken from a Hénon distribution to each entry of the parent vector. The Hénon map is given by the following equations:

$$\begin{cases} x_{j+1} = 1 - ax_j^2 + y_j \\ y_{j+1} = bx_j \end{cases} \quad (12)$$

where  $a=1.4$ ,  $b=0.3$ . The variance of this distribution is determined by the parameters Scale ( $\lambda_0$ ) and Shrink ( $\mu$ ) at each iteration. The Scale parameter determines the variance at the first generation. The Shrink parameter controls how the variance shrinks as generations go by.

$$\lambda_k = \lambda_{k-1} \left(1 - \mu \frac{k}{J}\right) \quad (13)$$

where  $J$  is the maximum number of iterations. The corresponding networks parameters are obtained by:

$$\Theta_{k+1} = \Theta_k + \lambda_k \mathbf{Y}_k \quad (14)$$

where  $\mathbf{Y}_k = \{y_j (j=1,2,\dots,d)\}$ .

#### Chaotic simulated annealing

The key idea of CSA [22] is to replace the Gaussian distribution by a chaotic sequence in the conventional simulated annealing. It is realized by applying the following well-known logistic map:

$$C_{k+1} = 4C_k(1 - C_k) \quad (15)$$

There are three steps needed to adapt this algorithm for training neural models:

- chaotic initialization:  $C_0^i (i=1,2,\dots,d)$
- initialize the temperature  $T_0$
- conventional annealing iterations: For each of the initial value  $C_0^i$ , generate  $C_j^i (j=1,2,\dots,J)$  by Eq. 15, where  $J$  is the maximum number of chaotic annealing iterations. The corresponding

networks parameters are obtained by:  $\Theta_j^i = (1-\alpha)C_j^{i*} + \alpha C_j^i$ , where  $\alpha$  is a constant.

### 3.2. Pseudo phase-space reconstruction

Phase space reconstruction is usually the first step in the analysis of complex dynamic systems. In a large number of cases during observing real multi-dimensional systems, there is no possibility to measure all of the variables simultaneously. Suppose we can observe only a one-dimensional time series  $g(k)$ . The most common approach to attractor reconstruction is the method of delays. An method converts the time series  $g(k)$  into vectors  $\mathbf{Y}(k)$  using time delay  $\Delta$ :

$$\mathbf{Y}(k) = [g(k) \quad g(k + \Delta) \quad \dots \quad g(k + \eta\Delta)]^T \quad (12)$$

where  $\eta=D-1$ ,  $D$  is the embedding dimension,  $\Delta$  is the reconstruction delay. The quality of the reconstruction strongly depends upon these two parameters. The reconstruction delay is usually determined using mutual information, whereas for the second parameter one may make use of the false nearest neighbor analysis [15, 24].

## 4. SIMULATION STUDIES

### 4.1. Time-series prediction

In the following, the Duffing oscillation model is given in the form of a Takagi-Sugeno fuzzy model [24]:

$$R_D = \begin{cases} \text{If } x_1(t) \text{ is } M_1, \text{ then } \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_1 \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_1 u(t), \\ \text{If } x_1(t) \text{ is } M_2, \text{ then } \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_2 \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_2 u(t), \end{cases}$$

where  $\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \quad x_2(t)]^T$  and  $u(t) = 12\cos(t)$ ,

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.1 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -d^2 & -0.1 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ and}$$

fuzzy membership functions:  $M_1(x_1(t))=1-x_1(t)/d^2$ ,  $M_2(x_1(t))=x_1(t)/d^2$ ,  $d=50$ .

To obtain the time series values at integer points, the fourth-order Runge-Kutta method to find the numerical solution to the above Duffing system was applied (fixed-step size equals 0.01). Moreover, an additive noise was added (SNR=27dB) to this time series and a dawn-sample procedure was executed keeping every fifth sample starting with the first. The time-series prediction problem is formulated as follow: for known values of time series up to the point in discrete time, shall we say,  $k$  to predict the value at some point in the future, shall we say,  $k+H$ :

$$\langle g(k) \quad g(k - \Delta) \quad \dots \quad g(k - \eta\Delta) \rangle \rightarrow g(k + H)$$

where: the delay parameter is selected using the mutual information  $H=\Delta=9$ , whereas the embedding dimension is chosen using the false nearest neighbor analysis  $D=5$  (see Sec. 3.2 for more details).

The first 1000 data values were used for training dynamic neural models while other 1000 data samples were applied in the testing stage (for Duffing orbit  $x_1$  only). For this task several

structures of globally and locally recurrent neural networks were examined in order to model chaotic behavior of the system. In the Fig. 3 there are presented results obtained for different hybrid training schemas of the exemplary Jordan neural network (four inputs, four hidden neurons, two context layers and one output). There were two hybrid schemas used: the SA-LM schema (110 iter. of the simulated annealing with  $T_0=200$  and 35 iter. of the Levenberg-Marquardt method) and the EA-LM schema (30 iter. of the evolutionary algorithm with  $\lambda_0=0.8$ ,  $\mu=0.75$  and 35 iter. of the LM method, a description of other parameters is omitted here but can be found in [14]). The averaging results show that chaotic modifications of conventional global algorithms lead to improve the performance of the training process. Similar effects were achieved for other recurrent structures.

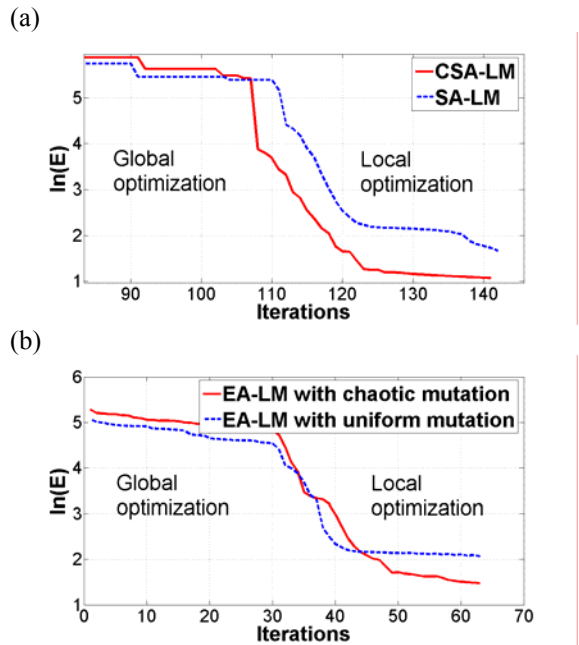


Fig. 3. Hybrid trainings of the Jordan neural network via different schemas

In Tab. 1 selected results are included. These attempts were done for the same EA-LM schema as above. As one can observe the best results are obtained for Jordan and LRNN networks and worse for Elman structures.

Tab. 1. Selected results obtained for different recurrent neural structures (testing stage)

Net	Structure	Param.	MAPE	AIC	MDL
Jordan	4-4 <sup>(1)</sup> -1	29	2.187	1.204	1325
Jordan	4-4 <sup>(1,2)</sup> -1	33	2.257	1.162	1302
Jordan	4-5 <sup>(1,2)</sup> -1	41	1.928	0.922	1106
Jordan	4-5 <sup>(1,2,3)</sup> -1	46	2.710	1.661	1856
Elman	4-4 <sup>(1)</sup> -1	41	3.864	2.315	2473
Elman	4-4 <sup>(1,2)</sup> -1	57	10.91	4.297	4498
LRNN	4-4 <sup>(1,2,-)</sup> -1	37	6.129	4.473	4573
LRNN	4-5 <sup>(1,2,-)</sup> -1	46	2.551	1.442	1641
LRNN	4-3-2 <sup>(2,1,-)</sup> -1	32	2.675	1.839	1962
LRNN	4-4-4 <sup>(2,2,-)</sup> -1	61	2.403	1.816	2089

4.2. The three-tank benchmark problem

Let us consider the three coupled tanks depicted in Fig. 4 [13]. The main aim of the control system is to keep the water level in the tank  $T_3$  constant, while a water requirement  $q_{30}$  is changed randomly with an uniform distribution. The measured signals are: streams of the medium  $q_1, q_2$  that flow into the first and second tank, control signals  $U_1$  and  $U_2$ , levels in tanks  $L_1, L_2, L_3$  and, additionally, discrete signals  $h_{3L}$  and  $h_{3H}$  from two capacitive proximity switches signaling whether the medium level in the tank  $T_3$  is above or below the position of the sensor.

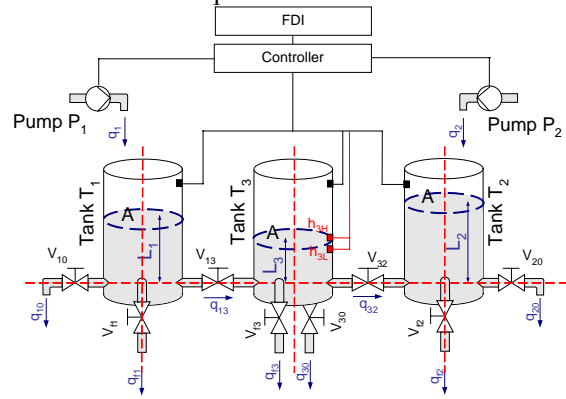


Fig. 4. The three-tank system

For this example many different types of faults like clogs and leakages may be acquired (see Tab. 2). In this paper only one fault is analyzed. Process faults  $f_1, f_2$  and  $f_3$  are investigated: undesirable leakages from tanks appear after 33 min. for the next 33 min. Faults  $f_7$  and  $f_6$  are realized by closing valves  $V_{13}$  and  $V_{32}$  in the middle of the simulation. Sensor faults are created by subtraction a 30% signal level from their output on the time window as in previous cases.

In general, it is very unlikely to have a chance to acquire the faulty data from industrial installations. However, in some cases, it is possible to create a precise mathematical model (i.e. using analytical methods) of a process taking into account fault-tolerant philosophy [9]. Such models are used in order to generate data for training neural models (off-line). The main aim of this paper is to compare different types of neural networks structures in case of the fault-tolerant control benchmark test and the problem of availability of data is not discussed in detail.

Tab. 2. Set of faults for a three-tank system

Fault	Fault description
$f_0$	nominal conditions
$f_1$	undesirable leakage from the tank $T_1$
$f_2$	undesirable leakage from the tank $T_2$
$f_3$	undesirable leakage from the tank $T_3$
$f_4$	Fault of the measuring channel 1
$f_5$	Fault of the measuring channel 2
$f_6$	Fault of the measuring channel 3
$f_7$	Clogging of the valve $V_{13}$
$f_8$	Clogging of the valve $V_{32}$

**Fault detection and isolation system**

The main idea of the FDI system (Fig. 5) is the same as in the previous paper of the author [13]. The group of three neural models (NN1<sub>1</sub>, NN1<sub>2</sub>, NN1<sub>3</sub>) is used for residual generation, whereas the neural classifier NN2 is used for mapping the space of statistic features of residuals into the space of faults. In the features estimation block five statistic measures for each residual are applied: mean error (me), mean absolute error (mae), mean squared error (mse), standard deviation of errors (sde), variance of errors (ve). Statistic measures of residual signals are computed using a moving time-window of size  $\Delta k=200$ .

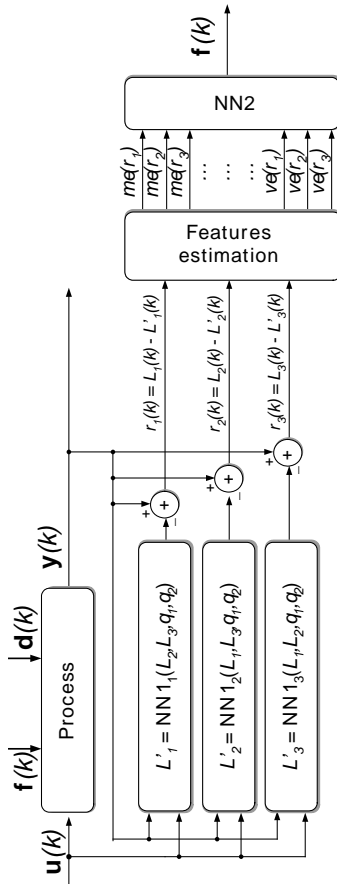


Fig. 5. Neural model-based fault detection and isolation

Three classes of neural networks were considered for residual generation block: L – locally recurrent net, J – multi-context Jordan net, E – multi-context Elman net. Each of them was trained

using suitable faultless data (4000 samples). Structures of respective networks were determined basing on heuristic rules discussed in the literature [13]. The processing error for the training set was defined as the sum of squares errors. On the other hand, the error for the testing set was chosen as the mean absolute percentage error. In the training stage, networks parameters were adjusted for a maximum number of epochs or until the goal error was less than  $10^{-2}$ . It led to decrease *mape* below 2% for each neural model.

**Locally recurrent neural networks**  $(4 - 5_{(0)}^{(-2,-)} - 1)$

The notation in brackets means that the network consists of three processing layers with four inputs, five non-linear dynamic neurons and one linear output neuron. Only one hidden layer with hyperbolic tangent output function was sufficient to identify NN1<sub>i</sub> models accurately (*mape* < 1%). Neural models were trained by means of the EA-LM hybrid scheme with chaotic mutation operator (30 generations of the EA and 35 iterations of the LM).

**Multi-context Jordan neural networks**  $(4 - 6^{(1,2)} - 1)$

The network consists of four processing layers with four inputs, six non-linear neurons, one linear output neuron and two context layers ( $q^{-1}, q^{-2}$ ). The training process was carried out using the same learning-pattern set and also the same EA-LM hybrid schema as in the previous case.

**Multi-context Elman neural networks**  $(4 - 6^{(1,2)} - 1)$

These structures are similar to the ones discussed previously, however, the internal states of the network are computed using signals from the hidden layer instead of these from the output.

Fault detection and isolation were realized by means of the multilayer perceptron network (M). The structure 15-10-10-8 with hyperbolic tangent output functions in hidden layers and linear function in the output one was enough for mapping the space of statistical features of residuals into the space of faults. Training patterns were obtained for no-fault and fault states (256 examples). Scaled conjugate gradient back propagation method was used for updating network parameters (the maximum number of epochs was equal to 200).

Table 3 presents results (%) obtained for testing data sets. Four FDI schemas are included: L-M – locally recurrent nets for residuals generation and the multilayer net for mapping statistical features of residuals into the space of faults, J-M multi-context Jordan nets and the multilayer net, E-M - multi-context Elman nets and the multilayer net.

The best results the author has received for the L-M schema. As one can observe, the performance of the described FDI system also increased when compared to the results obtained in the paper [13].

Tab. 3. Results of fault detection and isolation

FDI schema	FAULT								
	$f_0$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$
L-M	100	100	100	100	100	100	100	100	100
J-M	100	100	93	100	93	100	100	93	93
E-M	100	100	43	100	100	100	100	93	100
<i>L-M</i>	98	75	72	62	98	96	98	100	100

\* *italic designation* denotes results for neural models described in [13]

## 5. CONCLUSION AND OUTLOOK

Recurrent neural networks are well-known to be popular black-box type models for system identification and time series prediction. Partially recurrent and locally recurrent networks are frequently used in the area of the technical diagnostics within FDI systems. In this paper, it was shown that the applications of such architectures aided by training algorithms with chaotic modifications lead to the improvement of the performance of FDI systems. It can be stated that all FDI schemes provide the fault detection efficiency greater than 95%. However, fault isolation by means of the L-M scheme is more effective.

Finally, it can be assumed that much more complicated neural structures and training algorithms should be continuously developed to determine all potential advantages of this technique.

## 6. FUTURE WORK

The author plans to adapt this approach in the fault-tolerant control system of the inspection robot that is developed in the Department of Fundamentals of Machinery Design, Silesian University of Technology at Gliwice, carried out within the Multi-Year Programme "Development of innovativeness systems of manufacturing and maintenance 2004-2008".

## ACKNOWLEDGMENTS

The author would like to express his thank to Prof. W. Moczulski for his valuable comments and suggestions to improve the paper.

The paper has been prepared with financial support of Ministry of Science and Higher Education in the work of the grant No. N N514 3412 33.

## REFERENCES

- [1] Ayoubi M.: *Nonlinear dynamic systems identification with dynamic neural networks for fault diagnosis in technical processes*. Humans, Information and Technology, pages 2120–2125, October 1994.
- [2] Blanke M., Kinnaert M., Lunze J. and Staroswiecki M.: *Diagnosis and fault-tolerant control*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003.

- [3] Caccavale F. and Villani L.: *Fault Diagnosis and Fault Tolerance for Mechatronic Systems: Recent Advances*. Springer Tracts in Advanced Robotics. Springer Berlin / Heidelberg, 2003.
- [4] Elman J.: *Finding structure in time*. Cognitive Science, 14(2):179–211, 1990.
- [5] Jordan M.: *Serial Order: A Parallel Distributed Processing Approach*. Technical report. California Univ., San Diego, La Jolla. Inst. For Cognitive Science, 1986.
- [6] De Jesus O. and Hagan M.: *Backpropagation Algorithms for a Broad Class of Dynamic Networks*. IEEE Transactions on Neural Networks, pages 14–27, January 2007.
- [7] Kamiya A., Seppo J., Rajkumar R. and Shigenobu K.: *Fusion of soft computing and hard computing for large-scale plants: a general model*. Applied Soft Computing, 5(3):265–279, 2005.
- [8] Korbicz J.: *Robust fault detection using analytical and soft computing methods*. Bulletin of the Polish Academy of Sciences : Technical Sciences, 54(1):75–88, 2006.
- [9] Korbicz J., Kościelny J., Kowalczyk Z. and Cholewa W. (Eds.): *Fault Diagnosis. Models, Artificial Intelligence, Applications*. Springer Berlin / Heidelberg, 2004.
- [10] Patton R., Frank P. and Robert C.: *Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg, 2000.
- [11] Patan K.: *Stability Analysis and the Stabilization of a Class of Discrete-Time Dynamic Neural Networks*, IEEE Transactions on Neural Networks, May 2007.
- [12] Patan K.: *Approximation of state-space trajectories by locally recurrent globally feed-forward neural networks*. Neural Networks, pages doi:10.1016/j.neunet.2007.10.004, 2007.
- [13] Przystałka P.: *Model-based fault detection and isolation using locally recurrent neural networks*. Proceedings of the 9th International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing, Zakopane, Poland, June 22-26, 2008, (to be printed).
- [14] Przystałka P.: *Hybrid learning algorithm for locally recurrent neural networks*. Fault diagnosis and fault tolerant control, Academic Publishing House EXIT, pages 255–262, September 2007.
- [15] Przystałka P.: *Heuristic modeling using recurrent neural networks: simulated and real-data experiments*. Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, 14(4):715–727, November 2007.
- [16] Przystałka, P.: *Heuristic modeling of objects and processes using dynamic neural networks*. Diagnostyka, 2/38:15–18, 2006.
- [17] Schlang M., Lang B., Poppe T., Runkler T. and Weinzierl K.: *Current and future development in neural computation in steel processing*. Control Engineering Practice, 9(9):975–986, 2001.

- [18] Tomanek A., Przystałka P. and Wyczółkowski R.: *Optimization of Jordan and Elman neural networks through distributed computing environment*. Methods of Artificial Intelligence, pages 69–70, November 2007.
- [19] William W.: *A Comparison of Architectural Alternatives for Recurrent Networks*. Proceedings of the fourth Australian Conference on Neural Networks, pages 189–192, February 1993.
- [20] William W.: *Stability of learning in classes of recurrent and feedforward networks*. Proceedings of the sixth Australian Conference on Neural Networks, pages 142–145, February 1995.
- [21] Xiaohua Y., Zhifeng Y., Xinan Y. and Jianqiang L.: *Chaos gray-coded genetic algorithm and its application for pollution source identifications in convection diffusion equation*. Elsevier B.V. pp. 1676-1688, 2008.
- [22] Yao D., Zeng M. and Yongjie Li: *Chaotic simulated annealing algorithm applied to ERP dipole localization*. Proceedings of the International Conference on Communications, Circuits and Systems, pp 908-911, May 2005.
- [23] Zadeh, Lotfi A.: *Fuzzy Logic, Neural Networks and Soft Computing*. Communications of the ACM, 37(3):77–84, March 1994.
- [24] Zhong L., Halang W. and Chen G.: *Integration of Fuzzy Logic and Chaos Theory*. Studies in Fuzziness and Soft Computing. Springer-Verlag Berlin / Heidelberg, 2006.



**Piotr PRZYSTAŁKA** is currently a PhD student at the Department of Fundamentals of Machinery Design at Silesian University of Technology in Gliwice. He received the M.Sc. degree in design and exploitation of the machines from the same department in 2004. He deals with modeling linear, non-linear and chaotic dynamic systems and the applications of artificial neural networks in fault-tolerant control systems.



## THE PATTERN SPECTRUM OF THE ELECTRICAL MACHINE WITH USING CLASSICAL DISCRETE ORTHOGONAL POLYNOMIALS

Zenon SYROKA

Uniwersytet Warmiński – Mazurski w Olsztynie, Wydział Nauk Technicznych  
Katedra Elektrotechniki i Energetyki, 10 – 719 Oczapowskiego 11, [syrokaz@onet.eu](mailto:syrokaz@onet.eu)

### Summary

In this article is presented the method of creating the spectrum pattern of the electrical machines with using conception of the general spectrum. Discrete orthogonal polynomials were used because of they very good properties of Fourier series expansion. Classical discrete Fourier series is used to time and frequency signal analysis. The method of calculation the probability density function of the measurements diagnostic signal electrical machine (subtract with pattern) and the conception of calculation the T – periodical kinematical transform was presented.

Keywords: Spectrum analysis, Fourier series, classical discrete orthogonal polynomial.

### WZORZEC WIDMOWY MASZYN ELEKTRYCZNEJ Z WYKORZYSTANIEM KLASYCZNYCH DYSKRETNYCH WIELOMIANÓW ORTOGONALNYCH

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono metodę tworzenia wzorca widmowego maszyn elektrycznych z wykorzystaniem pojęcia widma uogólnionego. Użyto do tego celu klasyczne wielomiany ortogonalne ze względu na ich dobre właściwości do rozwijania sygnałów w szeregi Fouriera. Klasyczny dyskretny szereg Fouriera względem ortogonalnej bazy wielomianów trygonometrycznych stosowany jest do analizy czasowej lub częstotliwościowej. Pokazano również metodę obliczenia funkcji gęstości prawdopodobieństwa błędu (różnicy w stosunku do wzorca) dla poszczególnych prążków uogólnionego widma sygnału pomiarowego (diagnostycznego) maszyny elektrycznej. Pokazano koncepcję obliczenia T – okresowej transformacji kinematycznej.

Słowa kluczowe: analiza widmowa, szeregi Fouriera, klasyczne dyskretne wielomiany ortogonalne.

## 1. INTRODUCTION

The Fourier spectrum of the discrete periodically signal (period equal  $N$  – number samples of signal over time  $T$ )  $s_p[n]$  which has bounded average power called the set  $\{c(k): k = 0, 1, 2, \dots, N-1\}$  coefficients the Fourier series expansion of these signals.

The Fourier series the  $N$  – periodical discrete signal (sampled signal)  $s_p[n]$  has finite number of  $N$  discrete components.

The periodicals signal has discrete spectrum.

The mathematical formulas dependence, the DFT, discrete Fourier series and the  $N$  –periodical signal  $s_p[n]$  are identically [4, 5] only if the signals in  $s_o[n]$  observation time are equal to the period  $N$  of the signal  $s_p[n]$ .

In practical parameter  $N$  is often unknown and must be calculated.

The spectrum analysis is made with the  $L$  –point DFT based on  $L$  samples of the signal  $s_p[n]$ .

The  $L$  parameter defines the observed time and it's the main factor of the spectrum analysis of the diagnostic signal of the electrical machine.

The reproduced signal with  $L$  samples have period  $L$  ( $L \neq N$ ) and it's unlike then the original signal  $s_p[n]$ .

The reproduced and original signals are equal if the time analysis of the signal  $s_o[n]$  has integer number the period of the original signal  $s_p[n]$ .

This is background of the calculation method of the spectrum pattern of the electrical machine.

## 2. CLASICAL DISCRETE ORTHOGONAL POLYNOMIAL

The Set of the polynomial  $\{P_n(x)\}$  is called the orthogonal with weight  $w(x)$  if [5, 6]:

$$\int_D w(x) P_n(x) P_m(x) dx = \begin{cases} 0 & \text{for } n \neq m \\ k_n & \text{for } n = m \end{cases} \quad (1)$$

The weight function is defined in following way [7]:

$$\text{For } x \in [a, b]$$

$$w(x) = (b-x)^\alpha (x-a)^\beta \quad \text{where } \alpha > -1 \text{ i } \beta > -1 \quad (2)$$

For  $x \in [a, \infty]$

$$w(x) = e^{-x} (x-a)^\beta \quad \text{where } \alpha > -1 \quad (3)$$

For  $x \in [-\infty, +\infty]$

$$w(x) = e^{-x^2} \quad (4)$$

The analytical form of orthogonal polynomials is defined by the Rodriguez Theorem [7]

$$P_n(x) = \frac{1}{\mu_n} \frac{1}{w(x)} \frac{d^n}{dx^n} [w(x)H^n(x)]$$

Where  $\mu_n$  is a constant and  $w(x)$  is a weight function.

The function  $H(x)$  is defined in following way:

For weight function (1)

$$H(x) = (b-x)(x-a) \quad (5)$$

For weight function (2)

$$H(x) = x - a \quad (6)$$

For weight function (3)

$$H(x) = 1 \quad (7)$$

To classical orthogonal polynomials belongs:

1. The Legendre polynomials, for  $x \in [-1, 1]$  and

$$w(x) = 1 \quad (8)$$

2. The Laguerre polynomials, for  $x \in (a, \infty)$  and

$$w(x) = e^{-x} (x-a)^\alpha \quad (9)$$

3. The Hermite polynomials, for  $x \in (-\infty, +\infty)$  and

$$w(x) = e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (10)$$

4. Chebyshev polynomials (first kind), for

$$x \in (-1, 1) \text{ and } w(x) = (1-x^2)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

### 3. SPECTRUM PATTERN

The analysis of the measurements signals is performed in discrete time domain. The duration of the measurements signals is  $t_p$  and it's sampled with frequency  $f = 1/T$ . The period of measurement signal  $N_o$  is calculated on the ground of the rotational speed of the machine and defined as number of samples in time period  $T_o$ .

The samples number is equal:

$$nN_o + r = N \quad (12)$$

Where

$N_o$  – number samples of the measurements signal per period,

$n$  – number of the period,

$N$  – number of the all samples,

$r$  – the rest samples.

The rest  $r$  is the cause of the calculation error in DFT method.

The series expansion of the measurements signal is in the time interval length  $nN_o, (n-1)N_o, \dots, N_o$ .

The expansion coefficients are the spectrum pattern of the machine. This method is presented in fig. 1.

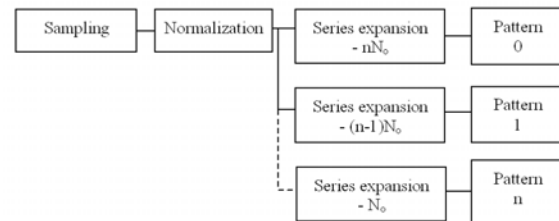


Fig. 1. The method of the calculating the pattern spectrum

Compares the pattern spectrum well working machine with the pattern spectrum any working machine the spectrum pattern of the error any worked machine is obtained. It is possible to assigne the damage of the machine and calculates probability density function of the error.

The spectrum pattern of the machine is used in the wireless diagnostic systems [10].

The measurements signal always has the limited time duration  $t_p$

$$t \in [0, t_p] \quad (13)$$

#### The Legendre spectrum pattern

The Legendre series expansion convert the interval (13) into  $[-1, 1]$ .

$$t \in [0, t_p] \Rightarrow x \in [-1, 1] \quad (14)$$

The substitution of the conversion is given by:

$$\Delta x = \frac{2}{N} = \frac{2}{t_p} \Delta t \quad (15)$$

The Legendre polynomial is given by [9]:

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} (x^2 - 1)^n \quad (16)$$

The Legendre – Fourier series is given by [9]:

$$s(x) = \sum_{j=0}^{\infty} c_n P_n(x) \quad \text{where } -1 < x < 1 \quad (16)$$

The series coefficients [9]:

$$c_n = \frac{2n+1}{2} \int_{-1}^1 s(x) P_n(x) dx \quad \text{where } n = 0, 1, \dots \quad (17)$$

The measured and sampled signal is given by:

$$s_N \left( k \Delta t \frac{2}{t_p} \right) = \sum_{k=0}^{N-1} s \left( k \Delta t \frac{2}{t_p} \right) \quad (18)$$

Where

$k$  – number of the samples.

Use in (18) dependence (15) obtained

$$s_N(k\Delta x) = \sum_{k=0}^{N-1} s(k\Delta x) = \sum_{k=0}^{N-1} s \left( k \frac{2}{N} \right) \quad (19)$$

The discrete Legendre series is given by:

$$s(k\Delta x) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n P_n(k\Delta x) \quad (20)$$

or

$$s\left(k \frac{2}{N}\right) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n P_n\left(k \frac{2}{N}\right) \quad (21)$$

The discrete Legendre series coefficients are given by:

$$c_n = \frac{2n+1}{2} \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s\left(k \frac{2}{N}\right) P_n\left(k \frac{2}{N}\right) \quad (22)$$

**The Laguerre spectrum pattern**

The Laguerre series expansion converts the interval (13) into  $[0, \infty]$ .

$$t \in [0, t_p] \Rightarrow x \in [0, \infty] \quad (23)$$

The substitution of the conversion is given by:

$$\Delta x = \frac{t_p}{N} \quad (24)$$

The Laguerre polynomial is given by [9]:

$$L_n^{(\alpha)}(x) = \frac{1}{\mu_n} \frac{1}{e^{-x}(x-a)^\alpha} \frac{d^n}{dx^n} [e^{-x}(x-a)^\alpha (x-a)^n] \quad (25)$$

The Laguerre – Fourier series is given by [9]:

$$s(x) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n L_n^{(\alpha)}(x) \quad (26)$$

The series coefficients [9]:

$$c_n = \frac{n!}{\Gamma(n+\alpha+1)} \int_0^{\infty} s(x) x^\alpha e^{-x} L_n^{(\alpha)}(x) dx \quad (27)$$

The measured and sampled signal is given by:

$$s_N(k\Delta x) = \sum_{k=0}^{N-1} s(k\Delta x) = \sum_{k=0}^{N-1} s\left(k \frac{t_p}{N}\right) \quad (27)$$

The discrete Laguerre series is given by:

$$s(k\Delta x) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n L_n^{(\alpha)}(k\Delta x) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n L_n^{(\alpha)}\left(k \frac{t_p}{N}\right) \quad (28)$$

The discrete Laguerre series coefficients are given by:

$$c_n = \frac{n!}{\Gamma(n+\alpha+1)} \frac{t_p}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s\left(k \frac{t_p}{N}\right) e^{-k \frac{t_p}{N}} L_n^{(\alpha)}\left(k \frac{t_p}{N}\right) \quad (29)$$

**The Hermite spectrum pattern**

The Hermite series expansion converts the interval (13) into  $[-\infty, \infty]$

$$t \in [0, t_p] \Rightarrow x \in [-\infty, \infty] \quad (30)$$

The substitution of the conversion is given by:

$$\Delta x = \frac{t_p}{N} \quad (31)$$

The Hermite polynomial is given by [9]:

$$H_n(x) = \frac{1}{\mu_n} \frac{1}{w(x)} \frac{d^n}{dx^n} [w(x)H^n(x)] = \frac{1}{\mu_n} \frac{1}{e^{-x^2}} \frac{d^n}{dx^n} (e^{-x^2}) \quad (32)$$

The Hermite – Fourier series is given by [9]:

$$s(x) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n H_n(x) \quad (33)$$

The series coefficients [9]:

$$c_n = \frac{1}{2^n n! \sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(x) H_n(x) dx \quad (34)$$

The measured and sampled signal is given by:

$$s_N(k\Delta x) = \sum_{k=0}^{N-1} s(k\Delta x) = \sum_{k=0}^{N-1} s\left(k \frac{t_p}{N}\right) \quad (35)$$

The discrete Hermite series is given by:

$$s(k\Delta x) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n H_n(k\Delta x) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n H_n\left(k \frac{t_p}{N}\right) \quad (36)$$

The discrete Hermite series coefficients are given by:

$$c_n = \frac{1}{2^n n! \sqrt{\pi}} \frac{t_p}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s\left(k \frac{t_p}{N}\right) H_n\left(k \frac{t_p}{N}\right) \quad (37)$$

**The Chebyshev spectrum pattern**

The Chebyshev series expansion convert the interval (13) into  $[-1, 1]$ .

$$t \in [0, t_p] \Rightarrow x \in [-1, 1] \quad (38)$$

The substitution of the conversion is given by:

$$\Delta x = \frac{2}{N} = \frac{2}{t_p} \Delta t \quad (39)$$

The Chebyshev polynomial is given by [9]:

$$T_n(x) = \frac{1}{\mu_n} \frac{1}{(1-x^2)^{\frac{1}{2}}} \frac{d^n}{dx^n} \left[ (1-x^2)^{\frac{1}{2}} (1-x^2)^n \right] \quad (40)$$

The Chebyshev – Fourier series is given by [9]:

$$s(x) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n T_n(x) \quad (41)$$

The series coefficients [9]:

$$c_n = \frac{2}{\pi} \int_{-1}^1 s(x) (1-x^2)^{-\frac{1}{2}} T_n(x) dx \quad (42)$$

The measured and sampled signal is given by:

$$s_N(k\Delta x) = s_N\left(k \frac{2}{N}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} s\left(k \frac{2}{N}\right) \quad (43)$$

The discrete Chebyshev series is given by:

$$s\left(k \frac{2}{N}\right) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n T_n\left(k \frac{2}{N}\right) \quad (44)$$

The discrete Chebyshev series coefficients are given by:

$$c_n = \frac{2}{\pi} \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s\left(k \frac{2}{N}\right) \frac{T_n\left(k \frac{2}{N}\right)}{\sqrt{1-\left(k \frac{2}{N}\right)^2}} \quad (45)$$

**4. T- PERIODICAL KINEMATICAL TRANSFORM**

Spectrum pattern of the element of the machine is the vector the coefficients of the series. Sets n elements patterns is the matrix. The matrix has k column and n+1 line. The last line is presented by the disturbance.

$$\begin{bmatrix} x_{00} & x_{01} & x_{02} & \dots & x_{0k} \\ x_{10} & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n0} & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \\ z_0 & z_1 & z_2 & \dots & z_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_0 \\ T_1 \\ \dots \\ T_{k-1} \\ T_k \end{bmatrix} = [y_0 \ y_1 \ \dots \ y_k \ y_z]$$

The spectrum pattern of the measured signal is the line vectors the coefficients of the series. The last coefficient is presented by the disturbance. See in fig. 2.

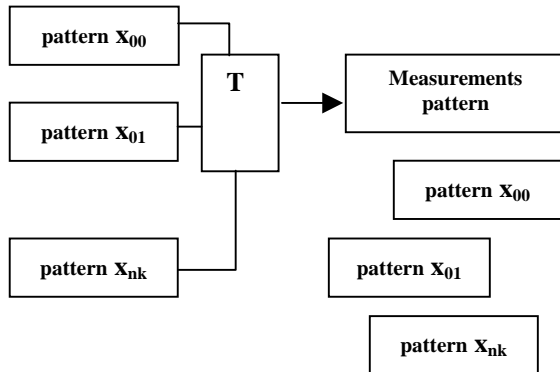


Fig. 2. The method of calculations the T- periodical kinematical transform

The T- periodical kinematical transform is the column vector. It has  $k$  elements.

## BIBLIOGRAPHY

- [1] G. E. Andrews, R. Askey, R. Roy: *Special Function*, Cambridge University Press, 2001.
- [2] H Bateman, A Erdelyi, *Higher Transcendental Functions*, Volume II, wydanie rosyjskie Moskwa 1974.
- [3] P. Brémaud: *Mathematical Principles of Signal Processing – Fourier and Wavelet Analysis*. Springer, New York 2001.
- [4] J. W Brown, R. V Churchill, *Fourier Series and Boundary Value Problems*, McGraw-Hill Higher Education, New York 2001.
- [5] R. E. Edwards: *Fourier Series A Modern Introduction*, Volume I, Springer-Verlag, Berlin 1979.
- [6] C. Gasquet, P. Witomski: *Fourier Analysis and Applications: Filtering, Numerical Computation, Wavelets*. Springer, New York 1998.
- [7] A Kufner, J Kadlec, *Fourier Series*, Academia Prague 1971.
- [8] Cz. Cempel: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*, PWN Warszawa 1989.
- [9] Z. Syroka: *Próbkowanie sygnałów diagnostycznych. Część III. Próbkowanie w przestrzeni Hilberta za pomocą nieklasycznych jąder*. Diagnostyka, Nr 2(42)/2007, s35 – 41.
- [10] Z. Syroka: *Bezprzewodowy system diagnostyczny*, Zgłoszenie patentowe nr: P-382991, 27.07.2007.



Ph. D. **Zenon SYROKA** is working in Department of Electronic and Energetic UWM in Olsztyn. He has graduated in Department of Electronics of Military Academy of Technology in Warsaw, and Department of Mathematic and Computer Science of University

of Mikołaj Kopernik in Toruń. He is interested in radiocommunication, telecommunication system, signal analysis, digital processing, practical applications of the results mathematic and computer science and related to technology and engineering, analog and digital electronics device, programmable logic array, programmable logic controller. He is programist in C, Pascal, Matlab, VHDL. He is an author of many articles on this theme.

## CONDITION MONITORING OF MARINE POWER PLANTS

Piotr BIELAWSKI

Maritime University of Szczecin, Chair of Machine Diagnostics and Repairs  
ul. Podgórna 51/53, 70-205 Szczecin, fax 091 431 85 42, e-mail [P.Bielawski@am.szczecin.pl](mailto:P.Bielawski@am.szczecin.pl)

### Summary

Due to frequent failures of machine elements, international organizations dealing with the safety at sea and shipowners alike are interested in the introduction of available diagnostic methods as well as the development of new ones. In the case of a machine set such as the electric motor – working machine, vibroacoustic methods based on vibration and acoustic emission measurements on bearing casings give promising results. Most problems are encountered when such machine sets are to be diagnosed, where one of the machines features a piston-crank mechanism. We can identify the conditions of crosshead thrust bearing and the piston - piston rod connection. Wider possibilities exist when it comes to the condition identification of elements in methods using longitudinal and torsional vibrations of the crankshaft free end. In this case it is possible to monitor the condition of crank bearings, main bearings and the alignment of the crankshaft.

Keywords: marine power plants, machine failures, vibroacoustic signals, vibration signals.

### DIAGNOSTYKA SIŁOWNI OKRĘTOWYCH

#### Streszczenie

Ze względu na częste uszkodzenia elementów urządzeń, organizacja międzynarodowa zajmująca się bezpieczeństwem na morzu oraz armatorzy zainteresowani są wprowadzaniem dostępnych i rozwojem nowych metod diagnozowania. W przypadku pary maszyn silnik elektryczny – maszyna robocza obiecujące wyniki daje stosowanie metod wibroakustycznych bazujących na pomiarach drgań i emisji akustycznej na obudowach łożysk. Najwięcej problemów stwarza diagnozowanie zespołów, gdzie jedna z maszyn jest maszyną z mechanizmem tłokowo-korbowym. Możliwa jest identyfikacja stanu łożyska wzdłużnego wóznika i stanu połączenia tłoka z trzonem tłokowym. Dużo większe możliwości identyfikacji stanu elementów kryją się w metodach wykorzystujących drgania wzdłużne i skrętne wolnego końca wału korbowego. Możliwa jest identyfikacja stanu łożysk korbowych, łożysk ramowych i ułożenia wału korbowego.

Słowa kluczowe: siłownie okrętowe, uszkodzenia urządzeń, sygnały wibroakustyczne, sygnały drganiowe.

## 1. INTRODUCTION

The marine power plant is an assembly of machines converting the energy contained in liquid and gas energy carriers first into heat and mechanical energy, then into hydraulic and electric energy. The transmission of mechanical power from the diesel engine to the propeller may take place by mechanical devices of power transmission (including gearing) or by electrical transmission.

The marine power plant has to satisfy certain requirements: high availability, safety and efficiency. These requirements are stipulated in legal regulations of the port and flag states and result from the aims and policy of the ship owner – a shipping company. If we use the terms strictly connected with quality systems, the requirements to be met by marine power plants may be brought down to specific requirements for desired effectiveness and efficiency both in operation and maintenance of the power plant. For appropriate quality of operation to

be achieved we have to maintain a good technical condition of power converting machines and mechanical power transmission units; the assurance of good technical condition of these machines and devices is what power plant maintenance aims at. In both cases the identification of machinery technical condition is necessary.

The identification of technical condition of marine power plant machinery may go along two ways: the identification of specific features of a machine or of specific features of its components – condition parameters of machine components. Such identification is based on reliability characteristics of the same type machines based on overhauls and measurements of diagnostic symptoms determined while a machine is running. The identification based on overhauls has a priority due to obligatory safety regulations. Although the obligation to perform overhauls of machines in the power plant allows to maintain a certain standard of the safety of the ship and the environment, it actually results in an illusory

sense that the machines are in good condition, high costs of such overhauls, risk of damage done during an overhaul, and finally, in hindering progress in the field of machine diagnostics (condition monitoring). In spite of overhauls, failures of machine components which lead to major breakdowns are relatively frequent. For this reason international organizations concerned with the safety at sea and shipowners are interested in implementing available diagnostic methods and appliances and developing new ones to enhance the quality of ships in operation.

## **2. METHODS AND MEANS OF POWER PLANT MACHINERY DIAGNOSTICS**

Statistics show that:

- marine accidents happen almost daily, many of them involve body injuries or loss of life. As many as 60% of these accidents are related with propulsion system failures [1];
- on average two large ships sink weekly. Investigations to find the causes have never been as detailed as in the case of an airplane crash. 'Bad weather' is among causes of sinkings. Over the past 20 years bad weather has been blamed for going down to the bottom of 200 very large crude carriers and container ships of more than 200 m in length [2].

The 'sea state' is in direct relation with 'the weather'. In transatlantic shipping the sea state may feature maximum waves more than 30 meters high, as confirmed by satellite surveillance [2]. Their origin is not quite known.

As reliable analyses of ship sinkings are not available, we can assume that 'dangerous' sea state caused mainly by 'bad' weather leads to ship hull deformations and/or damage and thus has a destructive effect on the ship's propulsion system. One cannot exclude that many sinkings have been directly caused by a failure of the propulsion system.

At present diesel engines are primarily those machines that are subject to condition monitoring (damages paid due to failures of main engines account for 46% of all damages paid [3]) as well as stern bearings of the shafting. There are methods and means of diagnosing aimed at either component failure or disturbances in the operation of the mentioned machines elements. The element temperature in the vicinity of friction heat is a basic diagnostic symptom.

Where stern bearings are concerned, apart from their bush temperature, another symptom is the presence of foreign particles in a sample of oil lubricating the stern bearing. Besides, transducers controlling the tightness of sealings which protect the stern bearing from sea water are used. Condition monitoring of the gear transmission located between the propeller shaft and the diesel engine is limited to measurements of pressure, oil flow intensity and oil temperature as well as slide bearing temperature.

In diesel engines, condition monitoring consists in measuring temperatures of such components as cylinder liners, main bearings and crank bearings. The so called indicator diagrams provide information, among others, on the condition of combustion chamber. The diagrams show combustion pressure as a function of crankshaft rotation angle (if combustion pressure cannot be measured, it is replaced by other quantities such as tensile forces acting on cylinder head bolts, forces between the cylinder head and liner, or exhaust gas pressures in exhaust manifolds). Eddy current transducers placed in cylinder liners, particularly those of slow-speed engines) provide data allowing to some extent to infer on the condition of piston rings (first piston ring is sometimes of special design). In medium-speed engines transducers measure the content of lubricating oil in the air in the crankcase in order to detect the concentration that might result in a fire or explosion. A new development in condition monitoring is a possibility of examining inlet and outlet valves condition by acoustic emission measurements and analysis. The conception has returned of measuring the 'fall' of the piston-crosshead-connecting rod. This is aimed at the determination of the sum of backlashes in connecting rod, crank and main bearings.

There are a number of machines in the engineroom that belong to the so called auxiliary systems. These include the charge exchange (air / turbocharging), lubricating system, injection system, cooling etc. Diagnosing of charge exchange, lubrication and cooling systems is mainly based on measurement and analysis of thermodynamic quantities (primarily temperature and pressure, sometimes combined with flow intensity measurement) of working media: air, exhausts, oil and water. In the case of the injection system occasionally the pressures in the injection process are measured, as well as head vibrations, injector needle lift and acoustic emission on the head. It follows from [3] that main propulsion combustion engines, despite monitoring by above mentioned methods, are characterized by frequent failures and high repair costs; most failures occur in turbochargers, crankshaft and bearings of the piston-crank mechanism.

## **3. INTRODUCTION AND DEVELOPMENT OF METHODS AND TOOLS FOR POWER PLANT MACHINERY DIAGNOSTICS**

Machines in the marine power plant are installed within a limited space of the engineroom. Combined in units such as engine – working machine, they are mounted on foundation beds rigidly connected with the ship's hull. As a result, vibrations generated by one machine are conveyed on other machines, while hull deformations may affect machine bodies. There is also a risk of thermal deformations of bearing supports. The above circumstances justify the



implementation and development of machine unit diagnostic methods.

The most numerous group of marine machines are those working in pairs, in which quite common are units such as an electric motor – working rotor machine. Their characteristic feature (concerning both flow and displacement machines) is the fact that the direction of resultant working force acting on the rotor changes in a narrow range, and the average value of the resultant working force is always larger than zero and relatively low amplitude. While monitoring such machine pairs, we obtain promising results by the application of vibroacoustic methods based on measurements of vibration and acoustic emission on roller bearing casings. While working on the methodology of measurements, we found discrepancies between what we had expected according to the relevant publications and actual results. For instance, the measurement oriented vertically-horizontally-axially relative to the unit foundation in shipboard operating conditions did not yield expected results; vibrations from other working machines located near the examined one, sometimes relatively far from it, sum up and modulate with vibrations being measured. Therefore, it is necessary to specify optimal measurement conditions for each machine, in which the level of disturbances from other sources is the lowest [4].

One particular example of the said machine units are thrusters, composed of a propeller, intersecting axis gear and electric motor, with the first two components placed in water, thus unavailable from the inside of the ship. Successful diagnostics requires that actual loads are taken into consideration in drawing diagnostic conclusions. Research has shown that it is possible to identify the condition of the transmission gear by vibration measurement performed at the gear flange, while the propeller condition can be identified by measurement and analysis of acoustic emission measured at the shell of the thruster tunnel (in places accessible inside the ship) [5]. In order to facilitate diagnostics of thruster gearing, some thruster manufacturers have started installing fixed vibration transducers inside the gearing body.

Those machine units are most difficult to diagnose where one of the machines has a piston-crank mechanism. The application of vibroacoustic methods calls for the knowledge of dynamic characteristics and load of the machine unit as well as the course of forces generating vibrations. It is possible to identify the condition of the thrust bearing of the crosshead and the condition of piston-piston rod connection by measurements and analysis of the crosshead guide body vibrations. Much wider possibilities of identifying the machine component condition are offered by methods where longitudinal and torsional vibrations of the crankshaft free end are used. We can identify the condition of crank and main bearings and the position of the crankshaft [6].

#### **4. CONCEPTION OF DIAGNOSTICS USING LONGITUDINAL AND TORSIONAL VIBRATIONS**

Deformations of a machine body, uneven wear of support bearings and non-aligned position of shafts of the machine unit (e.g. combustion engine – propeller shaft and propeller) are due to such causes as creeping of shims. These deformations lead to the occurrence of substantial additional forces and moments – additional loads on bearings and shafts. In order to avoid damage caused by this type of load, one should exclude from operation those machines where deviations of bearing and shaft coaxiality exceed admissible values. One solution to this problem may be the identification of shaft deformation while it is rotating – diagnosing of the shaft positioning, i.e. alignment.

The grounds for such proposal are contained in author's publication [6], where it has been indicated that the same signal – the longitudinal vibrations signal of the shaft free end can be used for diagnosing the condition of crank bearings and the shaft position. The crankshaft free end may also be used for measurements of torsional vibrations and/or angular acceleration of the shaft. These quantities convey information on the technical condition of tribological nodes, such as piston-liner pairs and some main bearings.

It has been observed empirically that one of the measures of varied reactions in the bearing supporting the crankshaft – shaft deflection – has an influence on the path of longitudinal vibrations of the crankshaft free end. A model was developed which describes relationships between the crank deflections and axial displacements of the free end. The model has not been fully verified yet. Besides, it does not account for the effect of non-uniform loads of engine cylinders.

Periodical signals of longitudinal vibrations are overlapped with transitive signals generated by variable resultant forces from each cylinder. Experimental research has confirmed the influence of load and technical condition, particularly of the crank bearing, on longitudinal vibrations; quality dependence between bearing slackness and relevant measures of longitudinal vibrations has been determined. It has been confirmed that the desired signal would be that of longitudinal vibrations accelerations as a function of the crankshaft rotation angle.

The rotating movement of the crankshaft is not uniform due to periodical developing of the torque by each cylinder in turn. With a constant external load, the instantaneous angular acceleration is proportional to the instantaneously acting torque. Torsional vibrations of the whole machine unit rotor combine with the rotating movement of the shaft free end. It has been determined experimentally that the accelerations value of torsional vibrations of the shaft free end significantly depends on the condition

of engine main bearings placed in the kinematic pairs of torsional vibrations.

It has been proved [7] that it is possible to determine from torsional vibrations the resultant forces that act on each crankpin. This better utilizes diagnostic information contained in vibration signals, e.g. for the creation of longitudinal vibration measures oriented on crank bearing failures (measures independent of load).

As the angular accelerations, distances and accelerations of longitudinal vibrations as a function of crankshaft rotation angle provide information useful in diagnostics, appropriate transducers are needed for measurements of these phenomena. Transducers commercially offered at present measure the distance of torsional and longitudinal vibrations relative to a constant reference point. We can calculate mathematically speed and acceleration if vibration distance is known. However, for diagnostic use the desired symptoms have to be measured directly. It matters whether the diagnostic signal has been directly measured or is a derivative signal. That is because during differentiation some information contained in constant values of the differentiated signal is lost while signal components generated by all errors are amplified. For this reason the elements of a track for position and angle measurements have to meet high requirements in terms of assembly and performance accuracy. Therefore, it is necessary to either find or make transducers of longitudinal and torsional vibration accelerations.

Apart from torsional and longitudinal vibrations, the crankshaft and its free end produce transverse vibration. Consequently, the measurements of vibrational symptoms by transducers with a constant reference point contain strong disturbing signals; besides a transducer may be damaged. Therefore, it becomes necessary to develop transducers without a constant reference point. As presented in [8] there are transducers that can be adapted and used in the construction of an integrated transducer of engine crankshaft free end vibrations.

Work is in progress on constructing an integrated transducer composed of ferrari, electrodynamic and eddy current transducers. Although a substantial effect of errors from the transducer rotating part relative to the machine body was identified, these errors can be corrected by applying two pairs of transducers shifted by 180 degrees and averaging the signal. However, a better solution for an angular acceleration transducer turned out to be a special mounting of the non-movable part of the transducer so that this non-movable part makes all the motions along with the shaft except rotary motion.

## 5. CONCLUSIONS

1) Identification of marine machinery condition based on overhauls and methods used so far is not satisfactory.

- 2) Diagnostics using vibroacoustic methods, especially when combined with load measurement methods is effective in the case of units composed of rotor machines.
- 3) In the case of machine units, where one machine has a piston-crank mechanism, the knowledge of dynamic characteristics and loads as well as the course of forces generating vibrations makes it possible to identify the conditions of such components as crosshead thrust bearing, piston-piston rod connection, crank and main bearings and the crankshaft position.

## LITERATURE

- [1] Gragen U.: *Sicherheit durch Manövrierfähigkeit*, Hansa, 9/2004.
- [2] CORDIS FOCUS Nr 251, 9. August 2004.
- [3] *Expanding possibilities. Does a component based approach open the door to integrated monitoring?* MER February 2007.
- [4] Bielawski P., Burnos T.: *Diagnozowanie obsługowe okrętowych maszyn wirnikowych*. In: *Diagnostyka Procesów i Systemów*, praca pod red. J. Korbicz i inni, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2007.
- [5] Burnos T.: *Model diagnostyczny okrętowego agregatu typu ster strumieniowy*. Praca doktorska, Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin 2006.
- [6] Bielawski P.: *Elementy diagnostyki drganiowej mechanizmów tłokowo-korbowych maszyn okrętowych*. Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie, Studia Nr 39, Szczecin 2002.
- [7] Drzewieniecki J.: *Opracowanie miar drgań wzdłużnych wału korbowego średnioobrotowego silnika okrętowego jako symptomu diagnostycznego niezależnego od obciążenia*. Praca doktorska, Politechnika Szczecińska, Szczecin 2002.
- [8] Bielawski P.: *Diagnozowanie mechanizmów tłokowo-korbowych agregatów: sygnały i problemy pomiarowe*, *Pomiary Automatyka Kontrola* 2005, nr 9 bis, s. 236–238.



Prof. **Piotr BIELAWSKI**

The scope of his scientific research includes methods and means of machine component quality control, machine assembly and its quality assessment, marine machinery condition monitoring, particularly machines with the piston-crank mechanism, fault analysis, maintenance of marine machines.

## ASSESSMENT OF WELDED JOINTS QUALITY BY MEANS OF ANALYSIS OF THEIR THERMOVISION IMAGES RECORDED DURING WELDING PROCESS

Marek FIDALI, Anna TIMOFIEJCZUK

Department of Fundamentals of Machinery Design, Silesian University of Technology at Gliwice  
Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice, fax: 32 237 13 60, [mfidali@polsl.pl](mailto:mfidali@polsl.pl), [atimofiejczuk@polsl.pl](mailto:atimofiejczuk@polsl.pl)

### Summary

The paper deals with methods of thermovision image processing and analysis applied in a vision system used for welded joint quality assessment. In the paper some ways of thermogram analysis were proposed. Results were presented in forms of new images called profilograms. Some regions of these images were analyzed with the use of a method based on F-images obtained with the use of image Fourier transform.

Keywords: thermovision, welding process, image analysis.

### OCENA JAKOŚCI POŁĄCZEŃ SPAWANYCH NA PODSTAWIE WYNIKÓW ANALIZY OBRAZÓW TERMOWIZYJNYCH ZAREJESTROWANYCH PODCZAS PROCESU SPAWANIA

### Streszczenie

Referat dotyczy metod przetwarzania i analizy obrazów termowizyjnych zastosowanych w systemie używanym do oceny jakości złączy spawanych. Zaproponowano sposoby analizy termogramów. Wyniki analizy są przedstawiane jako nowe obrazy nazywane profilogramami. Dla wybranych regionów obrazów termowizyjnych zastosowano analizę opartą na wyznaczeniu F-obrazów, które są wynikiem zastosowania transformaty Fouriera.

Słowa kluczowe: termowizja, proces spawania, analiza obrazów.

## 1. INTRODUCTION

The way a welding process is carried out significantly influences the quality of welds. In most cases a correct welded joint is assumed to be the joint characterized not only by required mechanical properties but also by aesthetic appearance [9, 13]. Abnormality of the process is a result of numerous factors which are often random. Examples are instability of passing a filled wire, dirt smudges, inaccurate preparation of element edges, deformations of elements (e.g. thermal deformation). These factors are reasons of common welding defects, such as excessive undercut, partial or lack of joint penetration, cracks, overheating, excessive convexity or concavity of a face of weld, blisters, bubbles and holes [4-6, 12-13, 15-18].

Maintenance of a correct welding process as well as high quality welds can be obtained by means of process parameters control. One describes different approaches to such process inspection. Examples are measurements of amperage, voltage and flow of shielding gas [12-13, 21]. An alternative way of maintenance the process is to employ visual control [3, 7, 10-11, 19, 22]. The process can be observed both in infrared and visible electromagnetic bands. Approaches based on visual control are enumerated in bibliography as one of the most promising ways of maintenance of welding processes and assessment of joints. The most essential aspect of the application of such methods is to make possible rapid

identification of abnormalities occurring during the process, what is especially important in case of lot production. It happens that the same failures can occur repeatedly, what is often related to significant production losses.

The main problem concerning the application of vision systems seems to be a proper image analysis. Methods based on image analysis applied in welding processes have been used for seam tracking [11, 13], a weld pool size controlling [19], weld geometry controlling and weld quality assessing [3] as well as for adaptive controlling of welding processes [23].

Issues described in the paper are parts of investigations aimed at development of an approach to automatic welding process control. According to established assumptions, the vision system consisted of three cameras. A crucial role was played by an IR camera, which observed welding arc and pool, and getting cold joints. Observation of the process was aided by two CCD cameras, which recorded correspondingly images representing the arc and joint. There were two goals of image analysis. The first one is to assess the stability of the welding process. It was performed through determination of geometrical parameters of the arc. Secondly, some common defects of joints were supposed to be detected.

Presented experiments were carried out with the use of samples divided into groups characterized by: correctly prepared surface, surface covered with rust, and parts covered with some impurities [2].

A concept of the general approach applied in the system was presented in [1, 8].

Results presented in the paper were limited to analysis of thermovision images. Analysis of images recorded by CCD cameras was presented in [1, 8].

## 2. SYSTEM FOR WELDING PROCESS MONITORING

The welding process can be realized with the use of different devices. In the industry automated welding stands often equipped with robots are commonly used. They allow MIG or MAG welding. Usually in such automated processes elements to be joined move and the welding torch is motionless. The vision system elaborated within the framework of the research described in the paper has been assigned to such processes. General overview of the system was presented in Fig. 1.

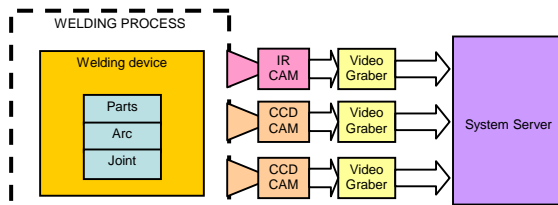


Fig. 1. General structure of the monitoring system

The system let us to record, archive, process, analyze and recognize two types of images acquired by three cameras (Fig. 2):

- hot area that included sub-areas of arc, fluid metal, solidification phases and welded elements,
- self-cooling area that involved the joint and welded elements.

Detailed characteristics of hardware and software parts were presented in [8]. The hardware part of the applied vision system consisted of three cameras and light sources mounted on a special support. One of the devices is IR camera with resolution 320x240 px, spectral range 8-13  $\mu\text{m}$ , temperature measurement range  $-40 \div 1200$   $^{\circ}\text{C}$ , frame rate 50 f/s, thermal resolution above 100 mK. Two remaining devices were CCD industrial cameras with resolution 786x1024 px and frame rate, 30 f/s. Devices were equipped with replaceable lenses with focal lengths 25 and 50 mm. One of the CCD cameras which observed arc and pool areas was equipped with a blacken filter. All cameras were connected via FireWire interfaces to PC station where images were acquired and processed.

Synchronization of acquiring, recording and analyzing data was performed by special software which was included within the second part of the system. This part was elaborated with the use of LabView.

Elaborated procedures let us record three images synchronously and process them by applying filtering, ROI (region of interest) extracting and

thresholding. Image analysis was based on identification of characteristic objects in images. Image recognition dealt with determination of fault types and abnormalities of the welding process. Recognition was performed on the basis of features resulting from analysis.

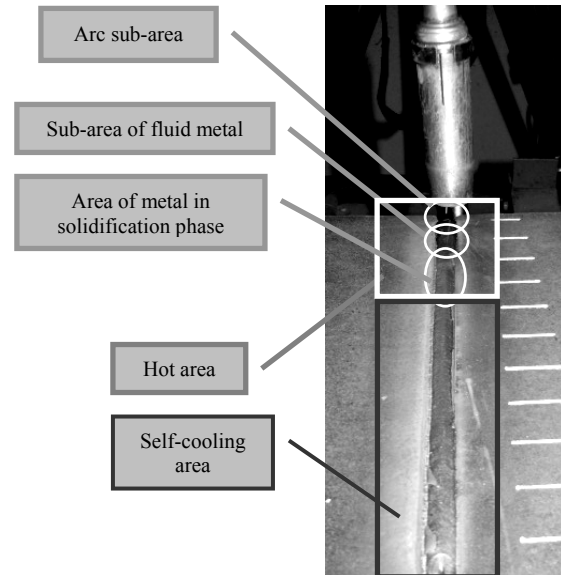


Fig. 2. Exemplary joint and observation areas

## 3. IMAGE ACQUISITION

A prototype version of the vision system was tested in Laboratory of Welding Research of Silesian University of Technology (Fig. 3). Welded plates were made of 0H18N9 (PN-71/H-86020) of thickness equal to 2 mm and the plate edges were beveled. During the process typical welding defects were observed. The following cases were taken into consideration: too small distance between welded elements ( $S=0$  mm), proper distance ( $0 \leq S \leq 0,8$  mm), too big distance ( $S > 0,8$  mm) and varying width of gap between plates. Some impurities (e.g. oil, paint) were also introduced. In order to simulate abnormality of the process, its parameters were being changed. The welding device and placements of cameras were shown in Fig. 3. During experiments plates were moved along the straight line and the welding torch was stationary.

Images of resolution 320x240 px (infrared camera) and 786x1024 px (ImagingSource CCD cameras) were recorded.

The main goal of these tests was to acquire series of images and verify initial assumptions related to placements of cameras, sources of lights as well as parameters of image recording.

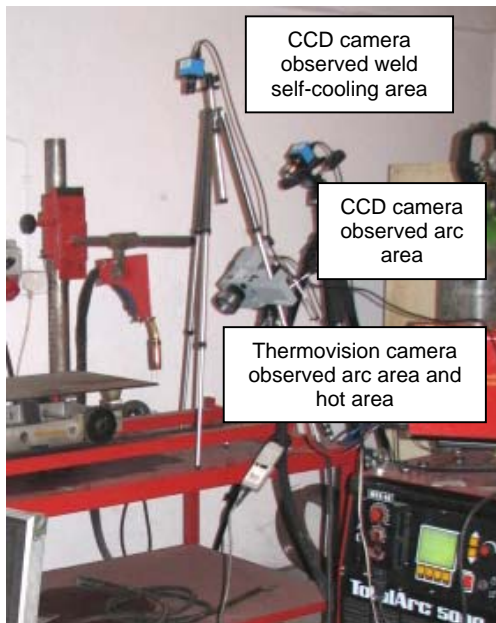


Fig. 3. A prototype version of the system under laboratory tests

Special attention was paid to plan the infrared observation of the process carefully. Due to huge dynamic thermal changes of welding processes numerous factors related to the process and external environment were required to be taken into account. All of them significantly influenced thermograms recorded during the process. Fundamental disturbances were considered to be changes of emissivity of joints in temperature function and radiation reflexes in metallic, low-emission weld surface as well as in welded elements [21]. Reflexivity observed during the process was strongly dependent on placement of welded elements, camera and also a way welded elements were being moved. In case of long, flat elements, which were being moved along the straight line the influence of reflections was great. A position of IR camera played also a significant role. The observation in each direction that was different from perpendicular one introduced additional unclear areas in recorded images. The reason was limited depth of focus of an optical set of the camera. Apart from that, metal spattering generated additional areas in images manifesting themselves as hot artifacts. They were also dangerous for the lens, so it must not be neglected. Protection against the spattering required special protective filters and covers, which made radiation reaching IR detector weaker. In order to obtain proper values of temperature compensation settings had to be taken into account. It should be emphasized that all enumerated factors influencing thermograms were encountered during experiments described in the paper.

Despite these negative phenomena images recorded by IR camera could be considered as a huge source of information related to the welding process. They enabled us to identify changes of

process states as well as the joint quality. However, it must be emphasized that identification of abnormality of the process as well as detection joint faults on the basis of complicated sets of information like thermograms, was not simple. To extract valid information series of image analyses had to be applied.

#### 4. PROCESSING AND ANALYSIS OF THERMOVISION IMAGES

Thermovision images recorded during the experiments were necessary to be processed and analyzed with the use of special approaches [1,20]. A basic procedure employed in order to minimize processing time and focus elaborated analysis on specified objects was based on distinguishing some regions of interest (ROI). These regions could be analyzed by means of different, separately elaborated and adjusted methods. Results of such operations were shown in Fig. 4.

Images, and particular their ROIs, from sequence recorded during the process could be analyzed in different manner. Results of such analysis were a huge set of features. A particular approach could be the application of image transformation (eg. Fourier). As the result new images could be evaluated. The new additional images were considered also to be sources of diagnostic information. Thermovision as well as additional image could be analyzed separately as well as sequences.

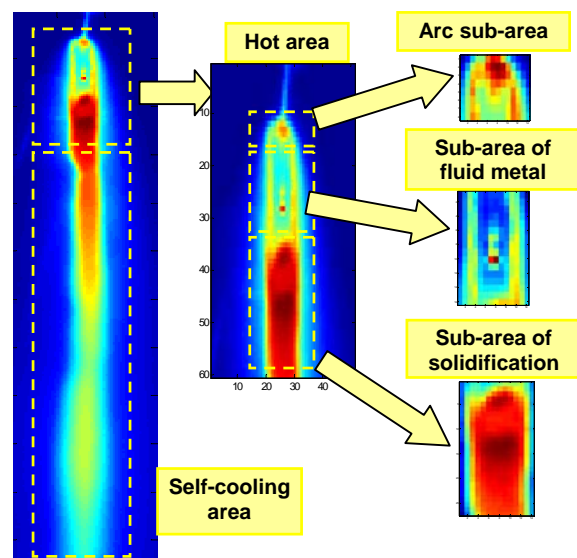


Fig. 4. Analyzed regions of interest of thermovision images

Results of analysis of image sequences could be treated as diagnostic signals. The specific image parameters were estimated as time functions. Possible ways of analysis of thermovision images considered as single images as well as sequences were shown in Fig. 5.



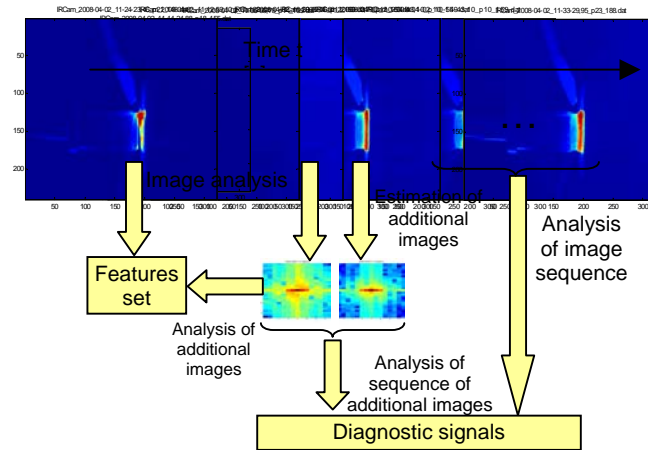


Fig. 5. Approaches to thermovision image analysis

The first operation performed after ROIs selection was segmentation. Elaborated procedures were based on temperature distribution. An operation carried out directly after segmentation was image binarization. In this case, determination of a proper threshold value was considered to be one of the biggest problems of this operation. There have been no any clear rule selecting this value. At present state of the research the value was selected experimentally.

Among different methods that could be used for analysis of binary images (binary ROIs) an approach based on estimation of percentage numbers of pixels above the threshold related to selected areas (objects visible in ROIs) was tested. In this case, not only single values but also their changes along image sequences were calculated. Estimation of changes of enumerated parameters as time functions let us treat them as diagnostic signals. The signals enabled us to identify process abnormalities that directly affected the joint quality. This approach could be applied to arc and also solidification sub-areas. Exemplary results of characterized procedures were presented in Fig. 6.

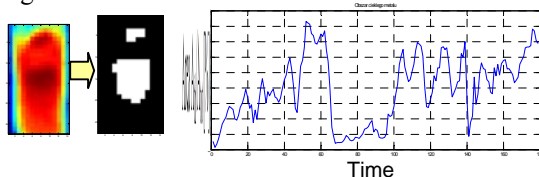


Fig. 6. Image binarization and diagnostic signal estimated for solidification sub-area

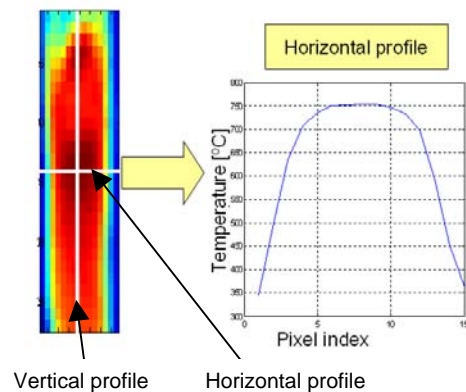


Fig. 7. A way of estimation of horizontal profile

Another approach proposed for thermovision images analysis consisted in estimation of horizontal and vertical temperature profiles. They were calculated along straight lines which were perpendicular and parallel to the main axis of the joint. Results of the operation were shown in Fig. 7. Such profiles could be also treated as specific functions. They were analyzed with the use of statistical analysis commonly employed to impulse and transient signal estimation.

Additionally, ordering the profiles according to time made it possible to acquire two dimensional diagnostic signals called profilograms (Fig. 9). Such plots provided us with information related to instability of the welding process.



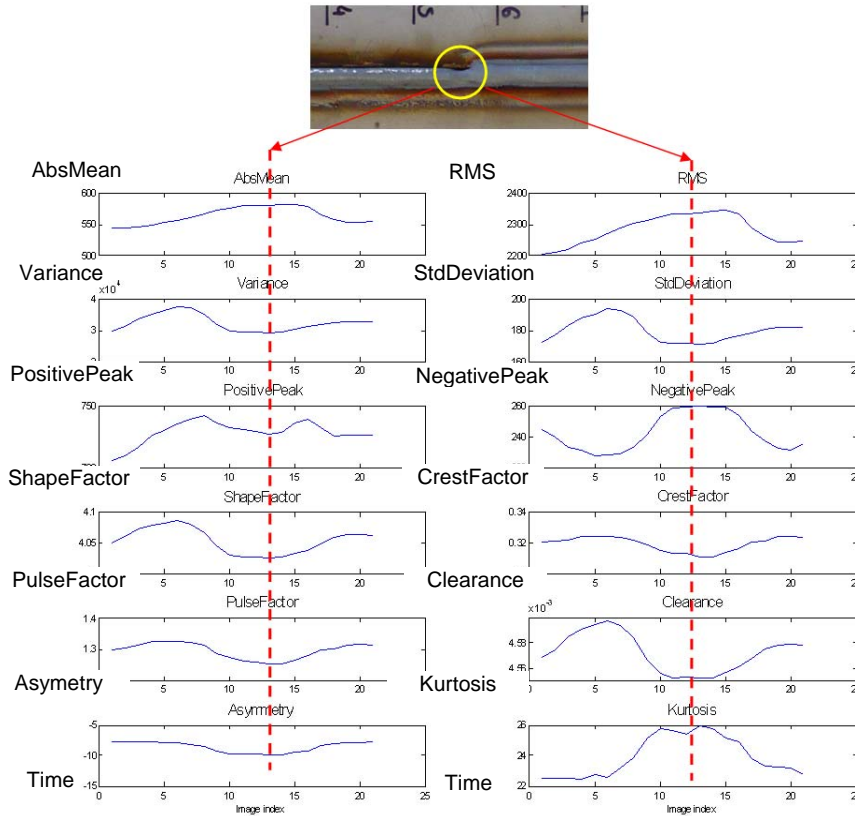


Fig. 8. Exemplary results of analysis of the horizontal profile

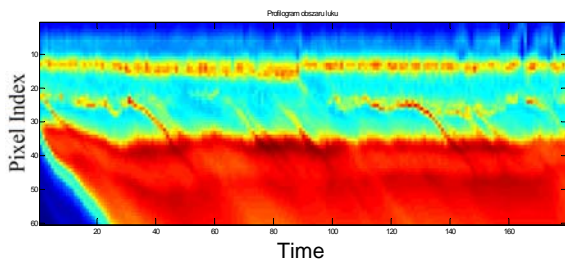


Fig. 9. Exemplary profilogram of arc area

In Fig. 10 there were estimated profilograms for selected regions of joints presented. Profilograms were results of analysis of hot sub-areas. Below the profilograms diagnostic signals which represented values of relative area estimated for binary images of solidification sub-area were shown. In the figures correlation between irregularity of width of joints and result of performed analysis was clearly noticeable.

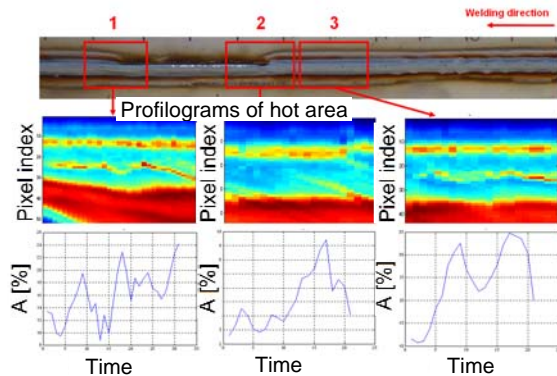


Fig. 10. Exemplary profilograms and diagnostic signals for selected parts of the joint

Summing up the application of described approaches, it is necessary to state that each image out of the group of recorded thermograms was put through transformation into a new image which let us obtain new types of features unnoticeable before. One of the applications was commonly known 2D Fourier transformation, which results were F-images that were represented by amlitodograms (Fig. 11). Features such as Mean Longitugal Fourier Power (MLPF), Mean Transversal Fourier Power (MTPF), or Mean Circular Fourier Power (MCFP) were estimated on the basis of F-images.

The first two features were values of Fourier spectrum calculated respectively for horizontal and vertical areas with reference to image axes (Fig. 11).

The widths of these areas were calculated as percentage values. MCFP parameter was estimated as mean Fourier power calculated along a circle. The value was also determined as a percentage estimator.

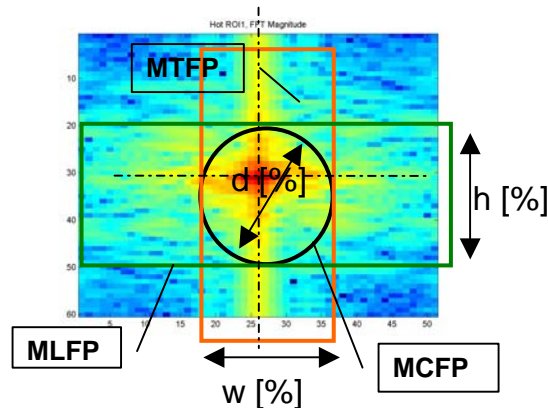


Fig. 11. Examples of estimation of F-image

Spectral parameters observed as time function could be also treated as specific diagnostic signals. An example of such signal can be a scanogram that was a result of estimation of a given feature for different values of parameter ( $h$ ,  $w$  or  $d$ ) for sequence of F-images. An example of diagnostic signal calculated for MCFP feature was presented in Fig. 12.

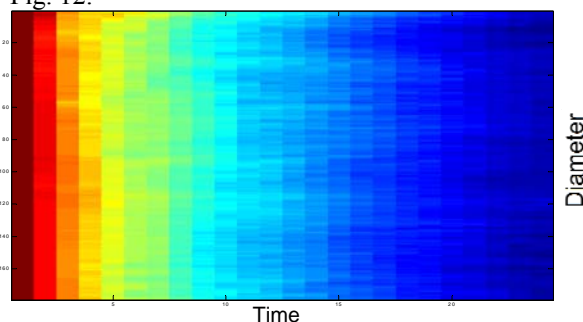
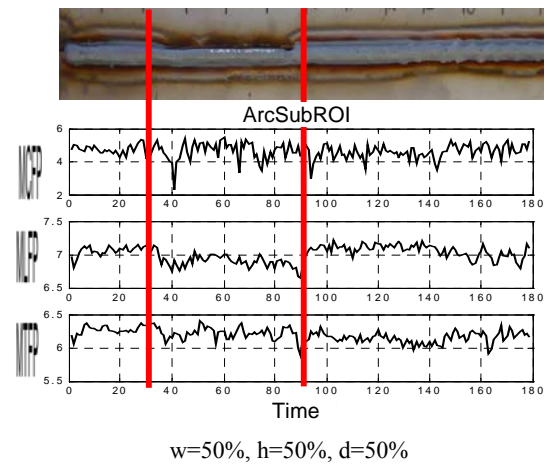


Fig. 12. Scanogram as two dimensional diagnostic signals of MCFP

In Fig. 13 there was one dimensional diagnostic signals presented. The signal was estimated on the basis of values of spectral features. Values of parameters  $w$ ,  $h$ ,  $d$  were determined a priori. Such features made it possible to identify e.g. overheating and lack of continuity of the joint.



$w=50\%$ ,  $h=50\%$ ,  $d=50\%$

Fig. 13. Diagnostic signals estimated on the basis of spectral parameters

## CONCLUSIONS

In the paper elements of an approach to automatic controlling of welding processes and welded joints were presented. Particular attention was paid to thermogram processing and analysis. During the research presented in the paper numerous approaches were tested to be applied. To make the process of image evaluation easier and focused on some specific objects the first step of image processing was determination of ROIs (regions of interests). At present stage of the research they have been established during system calibration. Objects identified within selected ROIs were relatively uncomplicated so that, simple geometrical features were possible to be calculated. Depending on the image type different sets of features could be considered into account. To obtain optimal characteristics of identified objects correlation analysis was applied. Results were limited sets of relevant and mutually not correlated features. They will be the background for definition of patterns representing abnormalities of the welding process as well as weld defects. These patterns and relevant features are going to be used in further steps of the research. Additionally, some image recognition approaches are also planned to be developed.

## BIBLIOGRAPHY

- [1] Bzymek A., Fidali M., Timofiejczuk A.: *Methods of image processing in vision system for assessing welded joints quality*. Recent Advances in Mechatronics. Jabłoński R., Turkowski M., Szewczyk R. (ed.), Springer, 258-262, 2007.
- [2] Bzymek A.: *Estimation of welding arc shape changes with the use of image analysis methods*. Methods of Artificial Intelligence AI-METH 2007, Gliwice 2007.
- [3] Cook G. E., Barnett R. J.: *Automated visual inspection and interpretation system for weld quality evaluation*, Industry Applications

- Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95., Conference Record of the 1995 IEEE
- [4] Czuchryj J.: *Quality control of welding process*, KaBe , Krosno 2002. (In Polish)
- [5] Czuchryj J.: *Evaluation of welds according to European norms: systematics and reasons of occurrence of weld defects*. Wyd. 3, Biuro Gamma, Warszawa 2003. (In Polish)
- [6] Czuchryj J.: *Evaluation of welds according to European norms: visual control*. Wyd. 2, Biuro Gamma, Warszawa 2003. (In Polish)
- [7] Fan H, Ravalá N. K., Wikle H. C., Chin B. A.: *Low-cost infrared sensing system for monitoring the welding process in the presence of plate inclination angle*. Journal of Materials Processing Technology vol. 140, no 1: 668-675, 2003.
- [8] Fidali M., Timofiejczuk A. and Bzymek A.: *A concept of vision system for assessment of welding process and welded joints*. Konferencja "Diagnostyka Systemów i Procesów", Słubice 2007 (in Polish)
- [9] Gibczyńska T., Rejman E.: *Fundamentals of machinery design, welded joints*, RWUPR, Rzeszów 1993. (In Polish)
- [10] Huang R. S., Liu L. M., Song G.: *Infrared temperature measurement and interference analysis of magnesium alloys in hybrid laser-TIG welding process*. Mater. Sci. Eng. A, 2006, doi:10.1016/j.msea.2006.10.069.
- [11] Kim J. S., Son Y. T., Cho H. S., Koh K.II.: *A robust method for vision-based seam tracking in robotic arc welding*, Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control 1995
- [12] Klimpel A., Szymański A.: *Kontrola i zapewnienie jakości w spawalnictwie*, Tom 1, Tom 2, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
- [13] Mazur M.: *Fundamentals of welding*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998. (In Polish)
- [14] Porębska M., Skorupa A.: *Cohesion joints*. Wyd. 2, PWN, Warszawa 1997. (In Polish)
- [15] PN-EN ISO 5817:2007. *Welding. Welded joints of steel, nickel, titanium and their alloys (except of beam welding)*. Quality levels according to weld defects, PKN. (In Polish)
- [16] PN-EN 13018 :2004. *Non-destructive inspections. Visual inspections* Badania wizualne. General principles, PKN. (In Polish)
- [17] PN-EN 970: 1999. *Welding. Non-destructive inspections of welded joints*. Visual inspections, PKN. (In Polish)
- [18] PN-EN 1289: 2000. *Non-destructive inspections of welded joints*. Penetrative inspections of welded joints. Acceptance level, PKN. (In Polish)
- [19] Smith J. S., Balfour C.: *Real time top-face vision based control of weld pool size*, An international journal Industrial robot, No 32/2/2005
- [20] Tadeusiewicz R.: *Vision system of industrial robots*. WNT, Warszawa 1992. (In Polish)
- [21] Węglowski M. S.: *Visible radiation as an useful signal in monitoring of welding process*. Pomiary Automatyka Robotyka 10/2006 (In Polish)
- [22] Xu D., Wang L., Tan M.: *Image processing and visual control method for arc welding robot*, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomechanics, Shenyang, China 2004
- [23] Yamamoto M., Kaneko Y., Fujii K., and others.: *Adaptive Control of Pulsed MiG Welding Using Image Processing System*, IEEE 1988.



**Marek FIDALI**, PhD., assistant professor in Department of Fundamentals of Machinery Design. Main area of research: technical diagnostics, thermovision, modal analysis, signal and image processing



**Anna TIMOFIEJCZUK**, PhD., assistant professor in Department of Fundamentals of Machinery Design. Main area of research: time-frequency signal analysis, diagnostic inference, image processing, analysis and recognition,



## DIAGNOSING THE CONDITION OF GEAR TRANSMISSION ON THE BASIS OF PERIODIC AND RESIDUAL COMPONENTS OF THE SIGNAL SPECTRUM

Łukasz JEDLIŃSKI, Janusz KISIEL, Józef JONAK

Lublin University of Technology, Mechanical Faculty, Department of Machine Design  
36 Nadbystrzycka Street, 20-618 Lublin, Poland  
tel. +48 81 53-84-499, email: [l.jedlinski@pollub.pl](mailto:l.jedlinski@pollub.pl), [j.kisiel@pollub.pl](mailto:j.kisiel@pollub.pl), [j.jonak@pollub.pl](mailto:j.jonak@pollub.pl)

### Summary

Assessment of the technical condition of gear transmissions is important because they are widely used in various machines and devices that often perform functions of great significance. The object of the study was an intersecting bevel gear pair, and testing was carried out using a stand. Analysis of the vibration acceleration signal on a time and frequency base did not unequivocally demonstrate any damage related to tooth galling. In this situation, an analysis method was suggested which consisted of signal resolution to obtain signals containing periodic components characteristic for the subassemblies and the damaged parts, as well as the residual spectrum. For signals obtained this way, selected signal parameters were determined and the technical condition of the diagnosed subassemblies and parts was assessed. With the use of this analytic method, it was possible to detect damage and locate where the damage was located in the transmission.

Keywords: bevel gear, diagnostics.

### DIAGNOZOWANIE STANU PRZEKŁADNI ZĘBATEJ W OPARCIU O SKŁADOWE OKRESOWE I WIDMO RESZTKOWE SYGNAŁU

#### Streszczenie

Ocena stanu technicznego przekładni zębatych jest ważna, ponieważ są one powszechnie stosowane w różnych maszynach i urządzeniach, które bardzo często pełnią odpowiedzialne funkcje. Obiektem badań była przekładnia jednostopniowa kątowna, badania odbyły się na stanowisku przemysłowym. Analiza w dziedzinie czasu i częstotliwości sygnału przyspieszeń drgań nie wykazała jednoznacznie uszkodzenia przekładni, którym było zatarcie zębów. Zaproponowano więc metodę analizy która polega na rozkładzie sygnału tak, aby uzyskać sygnały zawierające składowe okresowe charakterystyczne dla diagnozowanych podzespołów i części oraz widmo resztkowe. Dla tak uzyskanych sygnałów wyznaczano wybrane parametry sygnału i dokonano oceny stanu technicznego diagnozowanych podzespołów i części. Stosując tę metodę analizy możliwe było wykrycie uszkodzenia i określenia miejsca uszkodzenia.

Słowa kluczowe: przekładnia zębata kątowna, diagnostyka.

## 1. INTRODUCTION

Gear transmissions, due to their advantages, are widely used in various devices. Human life often depends on their reliability, while machine breakdown may result in high costs. Thus, it is very important to detect damage early and to assess accurately the technical condition of the transmissions.

Using a vibration signal with an intersecting bevel gear in good technical condition, an attempt was made to detect the occurrence of damage. Simple methods of signal analysis in the time and frequency domains did not result in an unambiguous answer to the possible presence of damage. Thus, an analytic method was used which consisted of the filtering of the signal to obtain the harmonics of the subassemblies and parts in question, as well as the residual signal. Then, selected parameters were calculated for both a gear transmission in good

working order and one with damage; the results being used to determine their technical condition. The proposed diagnosis method is similar to the polyharmonic recurrent filtering described by Barczewski [11].

## 2. STUDY OBJECTIVE

The object of the study was an intersecting bevel gear with bevel gear and circular curved teeth. It was constructed of new parts. The number of teeth on the pinion was 19, with 42 on the driven wheel. The transmission on the stand was driven by a motor through an multiplying gear while a load was added using a water brake. The vibration acceleration signals were registered at a pinion rotational speed of 6196 rpm. The gears were damaged during the test and, after the test, metal fragments were found in the oil and the teeth had damaged lateral surfaces due to seizing. The gears were then replaced with



new ones, and the transmission was retested as before.

Vibration acceleration was measured with two piezoelectric triaxial sensors, positioned according to Fig. 1. Sampling frequency was 40,000 Hz.

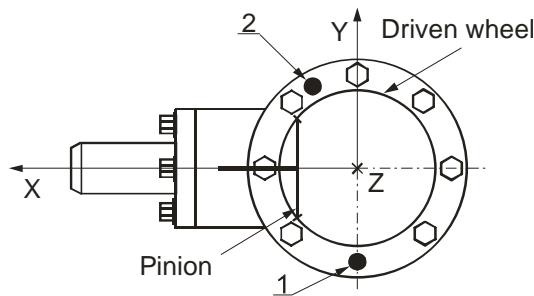


Fig. 1. Location of vibration sensors 1 and 2 on the transmission

### 3. METHOD OF ANALYSIS

The vibroacoustic signal measured with a sensor may be described as [8]:

$$y(t) = k(t) \cdot y_1(t) + m(t) \quad (1)$$

where:

$y_1(t)$  - usable part of the signal, containing information on the kinematic pairs condition,  
 $k(t)$  - multiplicative interferences,  
 $m(t)$  - additive interferences.

Changes in the diagnosis condition such as rotational speed, load, thermal state and measurement path characteristics cause multiple interferences. Additive interferences are caused by signals from other kinematic pairs overlapping the usable signals, as well as by the incomplete description of the kinematic pair condition by the set condition parameter [8]. In order to limit the interference in the signal, it is usually filtered in various ways [2].

The proposed signal analysis method consists of resolving the signal into periodic components connected with the basic harmonics and non-periodic components. Vibration signals from the transmission were analysed according to the scheme presented in Fig. 2. The measurement data were filtered to give signal  $z$  with six meshing frequency components only, a signal with seven harmonics from the first shaft, a signal with seven harmonics from the second shaft, as well as a residual spectrum lacking the harmonics mentioned above. Then, specific point measures were selected (average value  $x_{ave}$ , root-mean-square value  $x_{RMS}$ , signal power  $P$ , peak value  $x_{peak}$ ), as well as dimensionless discriminants (kurtosis  $k$ , peak factor  $C$ , pulse duty factor  $I$  and shape factor  $K_k$ ) of signals, using the formulas [3, 5, 8]:

$$x_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x(n)|,$$

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n)^2},$$

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n)^2,$$

$$x_{peak} = \max |x(n)|,$$

$$k = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - x_{ave})^4}{(\sigma^2)^2},$$

$$C = \frac{x_{peak}}{x_{RMS}},$$

$$I = \frac{x_{peak}}{x_{ave}},$$

$$K_k = \frac{x_{RMS}}{x_{ave}}.$$

where:

$x(n)$  - discrete signal,

$N$  - number of samples in the signal,

$\sigma^2$  - variance.

The same procedure was used out for both the damaged transmission and the transmission in which the damaged gears had been replaced (in good working condition). However, the analytic method used varied from the one described by Barczewski [11]. The first difference is that in the recurrent polyharmonic filtration algorithm the signal is resolved through filtration, where the subsequent harmonics are separated from the spectrum. On the other hand, in the algorithm the same signal is filtered four times, the same number of times as the number of basic harmonics of the subassemblies (parts) in question plus once more to obtain the residual signal. Then, the root-mean-square values of polyharmonics are calculated, while this is done for selected signal parameters in the method presented here.



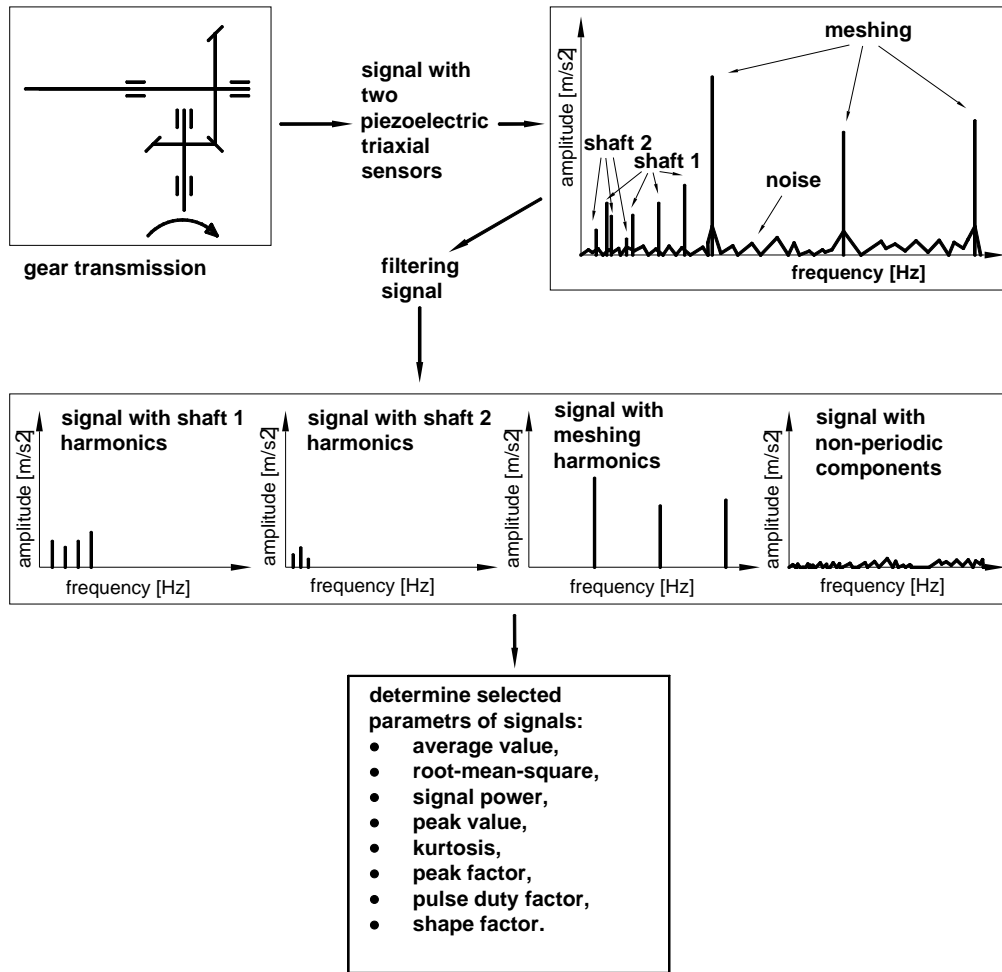


Fig. 2. Scheme of signal processing algorithm

#### 4. PROBLEM DESCRIPTION

Assessment of the technical condition in the time domain did not demonstrate unambiguously any irregularities in transmission gear operation. It consisted of the determination of the parameters for the unprocessed signal for both good condition and damaged transmissions, as well as in comparing their values [1]. Only the signal power indicated the possibility of damage (Fig. 7). Figures 3 and 4 show examples of vibration acceleration for both good and damaged transmissions. Even the use of spectrum analysis did not indicate unambiguously any change in the technical condition of the transmission. The analysis consisted of the identification of the required signal spectrum components (in this case, the meshing harmonics) and comparing the amplitudes obtained from the good condition and the damaged transmissions, as well as in determining changes which occurred in the spectrum [1]. Examples of vibration acceleration spectrums and meshing harmonics are shown in Fig. 5 and 6.

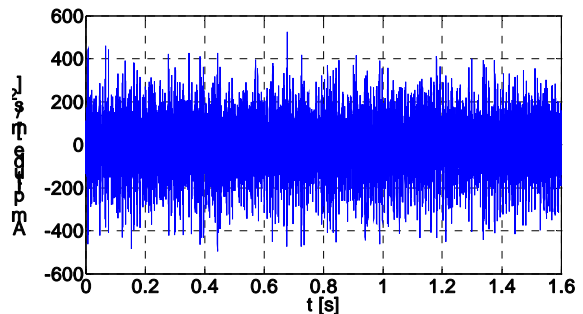


Fig. 3. Example of vibration acceleration for the good-condition transmission

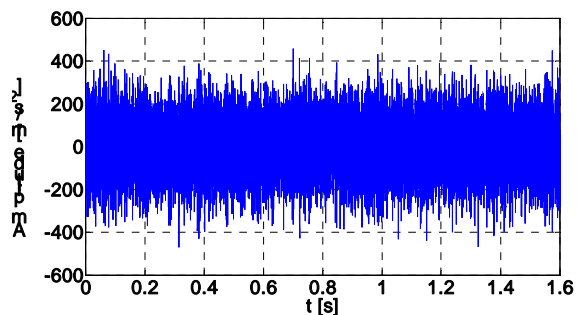


Fig. 4. Example course of vibration acceleration for the damaged transmission

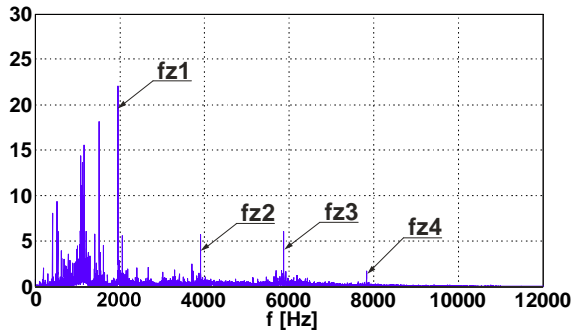


Fig. 5. Example spectrum of vibration acceleration for the good-condition transmission

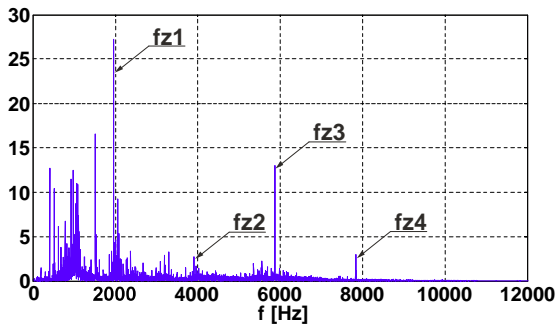


Fig. 6. Example spectrum of vibration acceleration for the damaged transmission

5. RESULT ANALYSIS

The measurement data from the sample were analysed using Matlab software. Figures 7 and 10 show percentage changes in the parameters calculated for the signal from the damaged transmission in relation to the parameters calculated for the signal from the good-condition transmission. Changes in the parameters for unprocessed signals (Fig. 7) and for signals with non-periodic components (Fig. 10) are very similar. Larger changes in the parameters took place in the first case, which means that the removal of multiples from the signal's basic harmonics decreases its sensitivity to damage via the selected signal parameters. The signals from each of the first shaft harmonics (Fig. 9) are similar to each other, which is in accordance with our expectations as there was no frequency-based damage information equalling any of the first shaft harmonics. As the damage was present on all the teeth, the damage should be most visible in the signal parameters for harmonic meshing (Fig. 8). The signal parameters for the meshing harmonics of the good condition and the damaged transmissions differ in many aspects, apart from the peak factor, the pulse duty factor, the shape factor and kurtosis. These signal parameters differed only slightly for all four factors for the good-condition transmission and the damaged one. The signal for meshing harmonics obtained from sensor 1 showed an increase in the average and peak values of almost three times, while for the signal power this

was eight times. For sensor two, the increase is almost twice and three and a half times respectively. Comparing the values of these above four parameters for both sensors in the figures 7 and 8, it may be suggested that the signal obtained from sensor 1 contains more information about the damage.

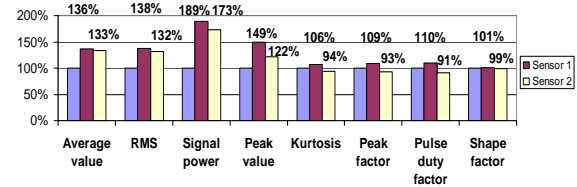


Fig. 7. Percentage changes to parameter values calculated for the damaged transmission in relation to the parameters of the good-condition transmission for the unprocessed signal

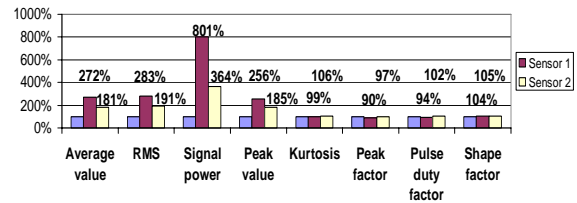


Fig. 8. Percentage changes to parameter values calculated for the damaged transmission in relation to the parameters of the good-condition transmission for the signal with meshing harmonics

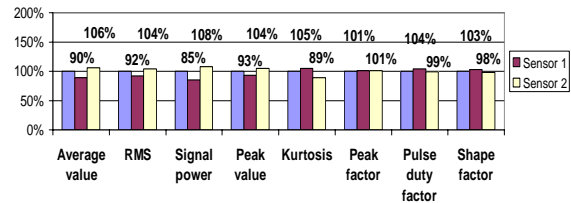


Fig. 9. Percentage changes to parameter values calculated for the damaged transmission in relation to the parameters of the good-condition transmission for the signal with shaft 1 harmonics

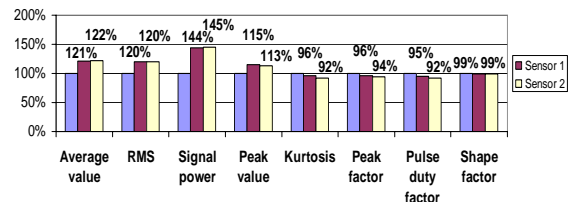


Fig. 10. Percentage changes to parameter values calculated for the damaged transmission in relation to the parameters of the good-condition transmission for the signal with non-periodic components

## 6. SUMMARY

It was possible to detect transmission damage based on the signal analysis. In the case of general vibration measurement and the calculated parameters it was difficult to assess the condition of the transmission. After filtering the signal, it was possible to conclude whether the transmission was damaged or not, and which elements were damaged.

If more than one subassembly has the same frequency (rotational speed), it will be impossible to analyse them separately [11].

An analysis of more transmissions will be able to verify the results presented here and help to determine boundary values for the parameters.

In practical diagnostic use it is important to have access to simple analysis and vibroacoustic signal measures in order to assess initially and determine the type of damage [6, 8]. The method presented here meets this condition.

## REFERENCE

- [1] Bartelmus W., Zimroz R.: *Diagnostyka układów napędowych maszyn górnictwa odkrywkowego*. Górnictwo Odkrywkowe. 2007 R. 49, nr 5-6 (s. 13-23).
- [2] Bartelmus W., Zimroz R.: *Ekstrakcja sygnału informacyjnego na potrzeby wykrywania uszkodzeń lokalnych*. Metody Doświadczalne w budowie i eksploatacji maszyn, Szklarska Poręba 2007, Górnictwo Odkrywkowe. 2007 R. 49, nr 3/4 (s. 181-190).
- [3] Brzózka J., Dorobczyński L.: *Matlab środowisko obliczeń naukowo-technicznych*. Wydawnictwo Mikom, Warszawa 2005.
- [4] Cempel Cz.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1989.
- [5] Lyons R. G.: *Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów*. WKiŁ, Warszawa 2006.
- [6] Madej H., Czech P., Konieczny Ł.: *Wykorzystanie dyskryminant bezwymiarowych w diagnostyce przekładni zębatych*. Diagnostyka vol. 28, 2003 (s. 17-22).
- [7] Matlab for signal processing. Materiały szkoleniowe 2007 by The MathWorks, Inc.
- [8] Niziński S., Michalski R.: *Diagnostyka obiektów technicznych*. Warszawa – Sulejówek – Olsztyn – Radom 2002.
- [9] Rudra Pratap: *Matlab 7 dla naukowców i inżynierów*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007.
- [10] Zieliński T. P.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów*. WKiŁ, Warszawa 2007.
- [11] Żółtowski B., Cempel Cz.: *Inżynieria diagnostyki maszyn*. Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2004 (s. 279-288).



Mgr inż. **Łukasz JEDLIŃSKI** jest asystentem w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej. Zajmuje się przetwarzaniem i analizą sygnałów oraz diagnostyką przekładni.



Dr inż. **Janusz KISIEL** jest adiunktem w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej. Zajmuje się teorią maszyn i mechanizmów, projektowaniem układów mechatronicznych oraz badaniem maszyn.



Prof. dr hab. inż. **Józef JONAK** jest kierownikiem Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Lubelskiej. W swoich pracach zajmuje się zagadnieniami sterowania adaptacyjnego ciężkich maszyn roboczych, mechaniką pękania i symulacjami procesu pękania materiałów kompozytowych, konstrukcją, eksploatacją i diagnostyką przekładni mechanicznych (w tym zwłaszcza śmigłowcowych) oraz komputerowym wspomaganie projektowania maszyn i urządzeń.



## ANALYSIS OF NONLINEAR EFFECTS IN DIAGNOSTICS OF COMPOSITE STRUCTURES

Jacek DZIURDŹ<sup>1</sup>, Wojciech SKÓRSKI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Machine Design Fundamentals, Warsaw University of Technology  
Narbutta str. 84, 02-524 Warszawa, [jdz@simr.pw.edu.pl](mailto:jdz@simr.pw.edu.pl)

<sup>2</sup>The Institute of Aeronautics and Applied Mechanics, Warsaw University of Technology  
Nowowiejska str. 22, 00-655 Warszawa, [wskor@meil.pw.edu.pl](mailto:wskor@meil.pw.edu.pl)

### Summary

The following text presents possibilities of the analysis of nonlinear effects in research of high-durability of carbon fibre composites, on the example of the sailing ship mast. The special attention was returned on the possibility using of modern techniques of measurement deformations with optical fibre sensor with the change of the light wavelength – Fibre Bragg Grating. Analyse the diagnostic problem of condition in consequence dynamics analysis of composite structure.

Keywords: nonlinear effects, diagnostic, carbon fibre composite, Fiber Bragg Grating.

### ANALIZA ZJAWISK NIELINIOWYCH W DIAGNOZOWANIU KONSTRUKCJI KOMPOZYTOWYCH

#### Streszczenie

Tekst przedstawia możliwości analizy zjawisk nieliniowych w badaniach dynamiki wysokowytrzymałych struktur z kompozytów węglowych, na przykładzie masztu jachtu żaglowego. Szczególną uwagę zwrócono na możliwość wykorzystania nowoczesnych technik pomiarów odkształceń z czujnikami światłowodowymi ze zmianą długości fali świetlnej – siatki Bragga. Przeanalizowano problem diagnozowania stanu na podstawie analizy dynamiki konstrukcji kompozytowych.

Słowa kluczowe: zjawiska nieliniowe, diagnostyka, kompozyt węglowe, światłowodowe siatki Bragga.

## 1. INTRODUCTION

Constantly increasing progress in such fields as e.g. chemistry and material engineering, supported additionally by technological potential, is the reason that new materials are appearing in the market. Machine elements made of them are characterised by structural properties significantly different than elements made of “traditional” materials.

There are certain fields completely dominated by, we can even say limited to, the application of composite materials. Typical example is production of equipment for highly competitive sports. Now-a-days composites dominated motoring, gliding and yachting, in the field of small vessels (yachts, motorboats, and amagnetic war-ships), where they are mainly applied for monocoque structures (hulls, fuselages, wings and elements of furnishing). Significant progress, which can be described as being of a revolutionary character, was caused by an introduction of carbon fibres as a reinforcement.

Carbon composites are materials, which can have all strength parameters significantly better than alloy steels (generally metals) at smaller masses (in contrast to other kinds of composites).

In point of fact, composites are not *sensu stricte* “materials” in a purely engineering meaning.

A structure obtains its proper material properties after a final shaping and every further modification, if it is possible at all, only those properties deteriorates. Therefore we can rather say about a composite structure and not a constructional material. Even in the simplest case (beam, outrigger etc.) a structure is:

- anisotropic in a relatively wide range, which depends on the production technology,
- non-linear for elastic influences and composition of stresses,
- practically not undergoing corrosion (a positive aspect) only environment erosion, which causes its very long life and difficult utilization (a negative aspect),
- subject to a material fatigue in a way different than metals,
- unique in much wider range than the steel structure.

Repeatability of material parameters of composite structures requires an ideal repeatability of technological processes of a composite components production (fibres, fabrics) as well as of a composite structure. Thus, each composite structure is different and these differences are so pronounced that they are still subjects of serious scientific investigations – quite often the secret ones. A certain general rule can be found on the basis of now-a-days well developed

“composite mechanics” [1], however, mathematical models are becoming very fast out of date in view of new technologies.

Typical element made of carbon composite is a mast of a sailing yacht. More and more attention is recently paid to a mast structure in an expectation of a further improvement of yacht performances. It might seem, that the designer gets a wide room for manoeuvre having at his disposal the newest designing methods and the cosmic era materials. However, he must confront problems related rather to incomplete theoretical description of the phenomenon or to impossibility of its strict solution.

Thus, there is a need of performing research of a structure dynamics - with non-linear effects taken into consideration.

## 2. NON-LINEAR EFFECTS IN DYNAMICS OF COMPOSITE MASTS

A problem of mechanical vibrations was practically not existing in the case of stiff wooden and metal masts. Its quite different for composite masts.

Vibrations of a system mast-rigging for the so-called “save” system enabling shaping – in a relatively wide range and at the minimal number of ropes - a static deflection compatible with aerodynamic requirements, is presented in Fig. 1 [2].

The basics of the problem constitute completely different relation between a mast stiffness and a rigging stiffness.

It can happen, for the composite mast, that the coefficient of elasticity of tight ropes lashing the modal point is higher than the coefficient of transverse stiffness of the span. In addition, surface vibrations occur in a thin mast shell propagating with various velocities in mutually perpendicular planes, since the mast cross-section is not round and a material is anisotropic. The effect, which might be called “cross-sectional vibrations”, is presented in Figure 2 [2].

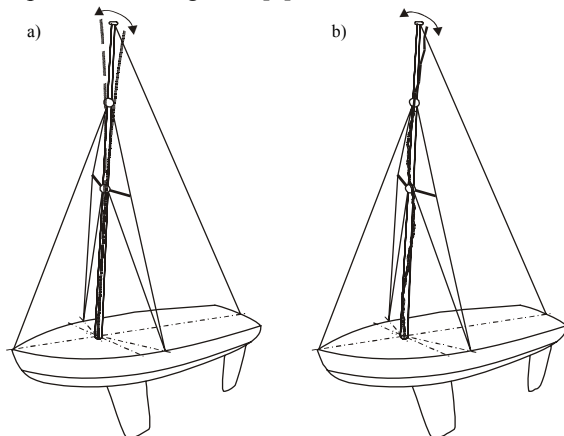


Fig. 1. Basic forms of transverse vibrations of masts:  
a) traditional, b) elastic (composite)

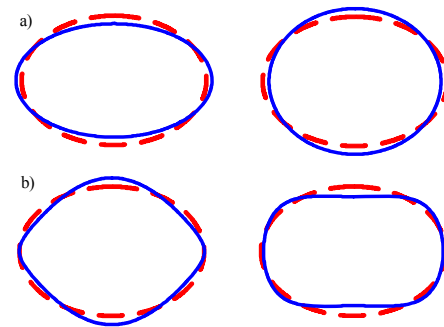


Fig. 2. Main forms of cross-sectional “shape” vibrations

Analysis of a composite mast vibrations caused by impulse forces, is much more complicated than the one of wooden or metal masts (Fig. 3).

Three zones (A, B, C) can be isolated in the vibration spectrum. The spectrum pattern – in the range of low frequencies (A) – corresponds to weakly non-linear vibrations of a beam of a non-symmetrical cross-section. In the range of higher frequencies (B), vibrations become strongly non-linear, while in the range of the highest frequencies (C) vibrations contain surface and cross-sectional vibrations. The dynamic response, in the first zone, is very sensitive e.g. to the location of modal points. The question arises: how to select the location of these points to have an aerodynamically acceptable vibration level without increasing the number of ropes?

The answer, on the basis of solving equations of beam transverse vibrations at the properly assumed boundary conditions (taking into account the rigging elasticity – in a rather complicated form), occurs to be very inaccurate even for the first two harmonics and completely unreasonable for the consecutive ones. Such differential model is unidentifiable. Similar situation concerns, for the time being, the FEM model [3].

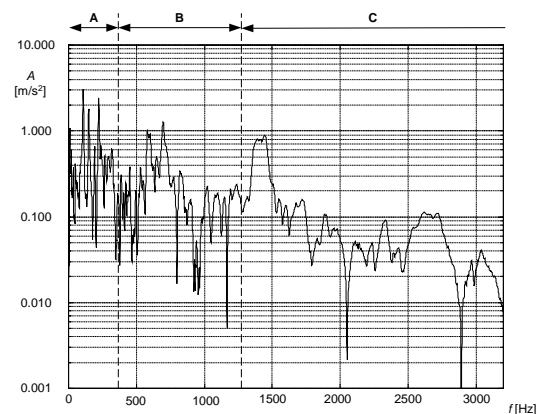


Fig. 3. Spectrum of vibration accelerations of a composite masts with marked zones:  
A – transverse vibrations, B – non-linear effects,  
C – cross-sectional shape vibrations and surface vibrations



Composite material properties are the reason for such situation. Equivalent Young's modulus changes non-linearly both in a displacement function in static tests and in a deformation rate function, and a character of those changes significantly differs for various designs (Fig. 4). Differences are already significant for the first harmonic. For the next two or three harmonics the errors slightly increase, while for the successive ones the results are completely senseless. Thus, the task requires – in its essential part – empirical investigations.

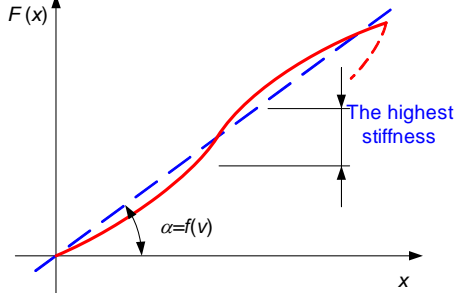


Fig. 4. Example of composite characteristics

### 3. APPLICATION OF A NORMAL COHERENCE FUNCTION

For the linear system the dependence change in the time and frequency domain is effective (Fig. 5):

$$\ddot{\xi}_i + \omega_o^2 = p_i(t) \rightarrow \xi_i = p_i(t) * h_i(t - \tau) \quad (1)$$

$$\Im \xi_i = P_i(\omega) \cdot H_i(\omega, i) \quad (2)$$

which corresponds to the coherence function equal 1.

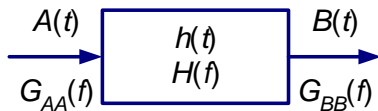


Fig. 5. Schematic presentation of a simple linear system

$$\gamma_{AB}^2(f) = \frac{|G_{AB}(f)|^2}{G_{AA}(f) \cdot G_{BB}(f)} \quad (3)$$

However, for the non-linear system, where the Principle of Superposition is not binding, one can discuss a disturbance as a “deviation” from the linear Equation [4], in a following way (Fig. 6):

$$\ddot{\xi}_i + \omega_o^2 = p_i(t) \rightarrow \quad (4)$$

$$\xi_i = p_i(t) * h_i(t - \tau) + \varphi(\xi_1, \dots, \xi_i) \quad (4)$$

$$\Im \xi_i = P_i(\omega) \cdot H_i(\omega, i) + \Phi(\xi_1, \dots, \xi_i) \quad (5)$$

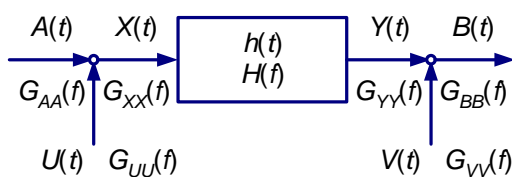


Fig. 6. Schematic presentation of a system with a disturbance

A non-linear disturbance of such a system can be interpreted as a simultaneous disturbance of input and output, which allows to extract the ‘non-linearity’ from the normal coherence function, according to the dependence (Fig. 7):

$$\gamma_{AB}^2(f) = \gamma_{XY}^2(f) / \left( 1 + G_{UU}(f) / G_{AA}(f) + \dots + G_{VV}(f) / G_{BB}(f) + G_{UU}(f) / G_{AA} \dots \dots G_{VV}(f) / (f) G_{BB}(f) \right) \quad (6)$$

$$\gamma_{AB}^2(f) = \frac{\gamma_{XY}^2(f)}{1 + \Delta(f)} = \frac{H_1(f)}{H_2(f)} \cdot \frac{1}{1 + \Delta(f)} \quad (7)$$

$$\gamma_{AB}^2(f) = \frac{\gamma_{XY}^2(f)}{1 + \Delta(f)} = \frac{H_1(f)}{H_2(f)} \cdot \frac{1}{1 + \Delta(f)} \quad (9)$$

$$\Delta(f) \Rightarrow \varphi_i(f)$$

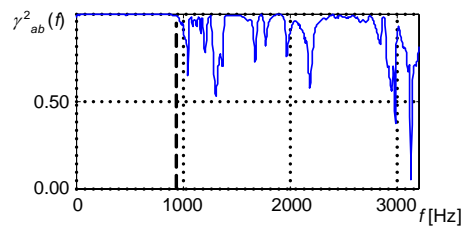


Fig. 7. Example of a normal coherence function for a system with non-linear disturbances

### 4. MEASUREMENTS WITH AN APPLICATION OF BRAGG'S GRATINGS

Composite materials are characterised by a particular property, which is the impossibility of determining the Young's modulus. Instead, an equivalent of the Young's modulus is used, which is changing non-linearly both in a displacement function in static tests and in a deformation rate function, and a character of those changes significantly differs for various structural solution. Due to a significant influence of deformation its accurate determination is required. This concerns especially dynamic tests of masts, in which a preliminary rigging tension is applied to obtain the required shape.

The most often strain gauges systems are used in a measuring technique of deformations. Apart from several advantages they have certain faults, which render difficult their application in dynamic measurements of yacht masts, especially in natural conditions. Now-a-days, together with the technological development, Bragg's gratings appeared (FBG – Fibre Bragg Grating) [5]. They are optical wave sensors, in which changing of a light wave length is applied e.g. for monitoring deformations (since there is a linear dependence: *deformation* → *light wave length change*).

Utilisation of Bragg's gratings requires the application of a spectrum analyser as well as a light source (laser one of a given wave length). The application of various wave lengths allows to use a few Bragg's gratings in series on one optical



wave sensor. Main advantages of their application are as follows:

- change of Bragg's wave length is a linear function of the measured value – in a wide range,
- information on the measured value is coded in a form of the wave length change and therefore noises or power losses do not influence the sensor signal,
- due to a small diameter and low weight they can be placed in composite materials without disturbing their structure,
- they are electromagnetic field resistant,
- no current is flowing, so there is no sparking and they are water influence resistant,
- there is a possibility of installing a few sensors on one optical wave guide (the measuring system only negligibly interferes with a composite structure),
- there are small energy losses, which means that the optical wave guide length does not influence the measurements.

## 5. CONCLUSIONS

Preliminary, comparative examinations with the application of strain gauges and Bragg's gratings were performed in the laboratory conditions. Simultaneously vibration accelerations were recorded in places of deformation measurements. The testing stand for measuring dynamic influences of composite masts is presented in Figure 8. It consists of a stiff foundation, stiff mast fixing and rigging allowing to introduce the given shape of the mast deflection.

Due to the application of the vibration exciter TIRA TV5500/LS the dynamic analysis of mast vibrations can be performed not only for impulse forcing but also for periodical forces (e.g. harmonic) or random ones.

The performed examinations indicate high usefulness of the fibre Bragg's gratings.

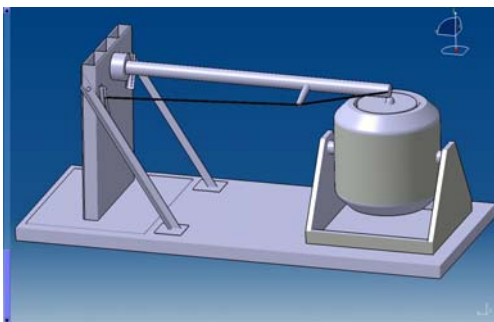


Fig. 8. Scheme of the testing stand

## REFERENCES

- [1] Kurnik W., Tylikowski A.: *Mechanics of laminated elements*, Editorial Office of PW, Warszawa 1997 (in Polish).
- [2] Dąbrowski Z., Dziurdź J., Skórski W. W., *Fault Diagnosis of Carbon Fibre Composite Masts*, First World Congress on Engineering Asset Management, Gold Coast Australia, 11-14.07.2006.
- [3] Dąbrowski Z., Maryniak J., Skórski W.: *Modern Calculation and Testing Methods in Designing of Sailing Yachts*, Publishing House of the Institute of Exploitation Technology – PIB, Warszawa-Radom, 2002 (in Polish).
- [4] Batko W., Dąbrowski Z., Kiciński J.: *Non-linear Effects in Vibroacoustic Diagnostics*, Publishing House of the Institute of Exploitation Technology – PIB, Radom, 2008 (in Polish).
- [5] Czapliński T., Gąsior P., Przygoda A.: *Modelling of Optical Monitoring System of a Fracture Process of a Long-Fibre Composite*, XXI Symposium "Fatigue and Fracture Mechanics", Bydgoszcz - Piecyska, Publishing House ATR Bydgoszcz, 2006 (in Polish).



**Jacek DZIURDŹ**, Ph. D. M. Eng. – graduate of the Faculty of Cars and Working Machines of the Warsaw University of Technology. Adiunct in the Institute of Basics of Machine Building of the Warsaw University of Technology. His research field: machine diagnostics, machine vibroacoustics and signal analysis. Author of more than 40 papers from the field of vibroacoustic diagnostics and digital analysis of signals. Member of the Polish Association of Technical Diagnostics, Secretary of the Vibroacoustics Section of the Acoustics Committee of the Polish Academy of Sciences.



**Wojciech SKÓRSKI**, Ph. D. M. Eng. – graduate of the Faculty of Mechanics, Power Engineering and Aviation of the Warsaw University of Technology. Adiunct in the Institute of Aircraft Engineering and Applied Mechanics. Designer and constructor of sailing yachts.

Deals with building and testing of yachts as well as their equipment.

## TAKING ADVANTAGE OF EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION IN DIAGNOSING GEAR FAULTS

Bogusław ŁAZARZ, Henryk MADEJ, Piotr CZECH

Department of Automotive Vehicle Construction, Faculty of Transport, Silesian University of Technology  
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, e-mail: [boguslaw.lazarz@polsl.pl](mailto:boguslaw.lazarz@polsl.pl), [henryk.madej@polsl.pl](mailto:henryk.madej@polsl.pl),  
[piotr.czech@polsl.pl](mailto:piotr.czech@polsl.pl);

### Summary

The study presents the application of empirical mode decomposition as a tool useful in diagnosing faults in gears. The method is a modern algorithm used for non-linear and non-stationary signals. Using this algorithm, it is possible to decompose a signal into a finite sum of component called intrinsic mode functions (IMF). For each IMF, the number of extremes and the number of transitions through zero is equal or different, by maximum one, and the mean value of envelope determined by the signal extremes equals zero. In practice, natural signals do not meet these conditions.

In the experiment, a gearbox operating in a circulating power system was used, with 16 and 24 pinion and wheel teeth, respectively. The measurements were carried out for a non-damaged gear and for a gear with a modelled fault, operating at various rotational speeds and under different loads.

Keywords: diagnostics, gears, empirical mode decomposition.

### WYKORZYSTANIE EMPIRYCZNEJ DEKOMPOZYCJI SYGNAŁU W DIAGNOSTYCE USZKODZEŃ PRZEKŁADNI ZĘBATYCH

#### Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono zastosowanie empirycznej dekompozycji sygnału jako narzędzia przydatnego w diagnostyce uszkodzeń przekładni zębatych. Metoda ta jest nowoczesnym algorytmem stosowanym dla sygnałów nieliniowych i niestacjonarnych. Wykorzystując ten algorytm można rozłożyć sygnał na skończoną sumę składowych zwanych funkcjami wewnętrznymi (IMF). Dla każdego IMF liczba ekstremów i liczba przejść przez zero jest równa bądź różna o maksimum jeden, a wartość średnia obwiedni określonej przez ekstrema sygnału równa się zero. W praktyce naturalne sygnały nie spełniają tych warunków.

W eksperymencie wykorzystano przekładnię zębatą pracującą w układzie mocy krążącej o licznie zębów zębniaka i koła odpowiednio 16 i 24. Pomiary przeprowadzono dla przekładni nieuszkodzonej oraz z zamodelowanym uszkodzeniem, pracującej przy różnych prędkościach obrotowych i różnych obciążeniach.

Słowa kluczowe: diagnostyka, przekładnie zębate, empiryczna dekompozycja sygnału.

## 1. INTRODUCTION

The development of engineering creates a higher and higher demand for modern means of diagnostics. Changes in the condition of diagnosed gears have a significant influence on the vibroacoustic signal structure. The recorded vibroacoustic signals are processed in order to obtain measures which would be symptoms signifying the intensity and degree of wear [1, 5]. The main aim of diagnosing machines is to detect damages in their early phase. A particular significance in diagnostics is attributed to non-invasive methods, comprising the vibroacoustic diagnosis methods [1, 4, 5]. They utilise the vibration and acoustic signal as information medium. The fault symptoms contained in the signal are difficult to identify based on raw

measurement data. A number of signal analysis methods are used for analysing WA signals and identifying, on their basis, the fault in a gear.

In gearboxes, we deal with modulation phenomena, where high-frequency meshing signals or resonance frequency of gear components are the carrying signals. There are many reasons of amplitude and frequency modulation in gears. During the gear operation, wear and degradation processes occur, which influence the parameters of modulating signals. A confirmation of this is the fact that an analysis of the signal envelope in the frequency bands connected with mesh is one of the most effective methods of diagnosing gears used in practice. Appropriate signal processing in time and frequency domains allows determining the modulation degree of carrying signals.

## 2. DESCRIPTION OF THE MODE DECOMPOSITION ALGORITHM

The authors decided to check the usefulness of empirical mode decomposition (EMD) in gearbox diagnostics, in an experiment.

Decomposition of the diagnostic signal  $x(t)$  into a finite sum of components called intrinsic mode functions (IMF) is conducted in accordance with the algorithm [2÷5]:

- identification of local minimums  $l(t)$  of signal  $x(t)$ ,
- identification of local maximums  $u(t)$  of signal  $x(t)$ ,
- determination of the mean value from the envelope of minimums and maximums  $m_1(t)$ ,
- determination of the first component,  $h(\tau)$ , from dependence:

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t) \quad (1)$$

- identification of local minimums  $l(t)$  of signal  $h_1(t)$ ,
- identification of local maximums  $u(t)$  of signal  $h_1(t)$ , etc.

The algorithm repeats until:

- the number of extremes and reversals of the function sign equals or differs by not more than one,
- the mean value of local minimums and maximums equals zero.

The value determined is called the first intrinsic mode function:

$$IMF_1(t) = h_1(t) \quad (2)$$

Next, this value is removed from the tested base signal  $x(t)$ , yielding the first remainder,  $r_1(t)$ :

$$r_1(t) = x(t) - IMF_1(t) \quad (3)$$

The remainder is treated as the tested base signal,  $x(t)$ , and the whole process is repeated from its beginning.

The process of empirical mode decomposition is completed when the remainder  $r_N(t)$  is constant or monotonic.

The result of application of the algorithm described is the sum of subsequent intrinsic mode functions and the remainder:

$$x(t) = \sum_{i=1}^N IMF_i(t) + r_N(t) \quad (4)$$

In order to illustrate the operation of the EMD algorithm, a model signal was created:

$$x(t) = 2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 15 \cdot t) + 4 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 15 \cdot t) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 0,1 \cdot t) + \sin(2 \cdot \pi \cdot 15 \cdot t) \quad (5)$$

The signal so modelled was then subjected to an empirical decomposition analysis, the results of which are shown in Fig. 2.

## 3. OBJECT OF RESEARCH

The object of research was a gearbox working in a circulating power system, comprising an

electric motor, a belt transmission, the tested gearbox, a closing gear and a tightening clutch. The 15 [kW] electric motor drove the closing gear through the belt transmission. The gearbox load was controlled with a lever with weights, a tightening clutch and torsional shafts. The gear speed was set by means of a frequency converter, which controlled the work of the electric motor. The tested and closing gears had identical ratios and identical axle bases. Parameters of the tested toothed wheels are compiled in Table 1.

Table 1. Parameters of the tested toothed wheels

Parameter	Value
number of pinion teeth	$z_1 = 16$
number of wheel teeth	$z_2 = 24$
angle of teeth line inclination	$\beta = 0^\circ$
addendum modification coefficient for the pinion	$x_1 = 0,8635$
addendum modification coefficient for the wheel	$x_2 = -0,5$
nominal pressure angle	$\alpha = 20^\circ$
nominal module	$m_n = 4,5 \text{ mm}$
transverse contact ratio	$\varepsilon_\alpha = 1,32$
addendum coefficient	$h_{a0} = 1$
tip clearance coefficient	$c_0 = 0,25$
wheel width	$b = 20 \text{ mm}$

In the experiment, measurements were performed of the wheel shaft's transverse vibration speed for a gear without faults and for a gear with a defect in the form of a crack in a tooth root at a depth of  $\Delta X = 1$  [mm] (Fig. 1).

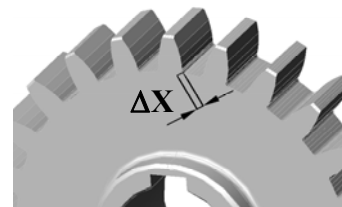


Fig. 1. The modelled wheel defect in the form of a crack in the tooth root

The measuring system consisted of shaft's angular position sensors, a logical unit, a laser vibrometer, a signal analyzer and a computer. Measurement of the wheel shaft transverse vibration was performed in the direction of the force acting between the teeth, using a laser vibrometer, Ometron VH300+. The selected measurement direction allowed recording in the best way the vibration signal modulations occurring in the case of faults of gear components. The logical unit together with two shafts' angular position sensors allowed precise determination of the moment of meshing of the same pair of teeth. The recorded vibration speed signal and the

reference signal from the logical unit were processed in a DSPT SigLab analyzer. The measured signals were recorded in a PC.

The measurements were performed for a gearbox operating at two rotational speeds of the wheel shaft:

-  $n=900$  [r.p.m.],

-  $n=1800$  [r.p.m.],  
and under two loads:

-  $Q=2.58$  [MPa],  
-  $Q=3.85$  [MPa].

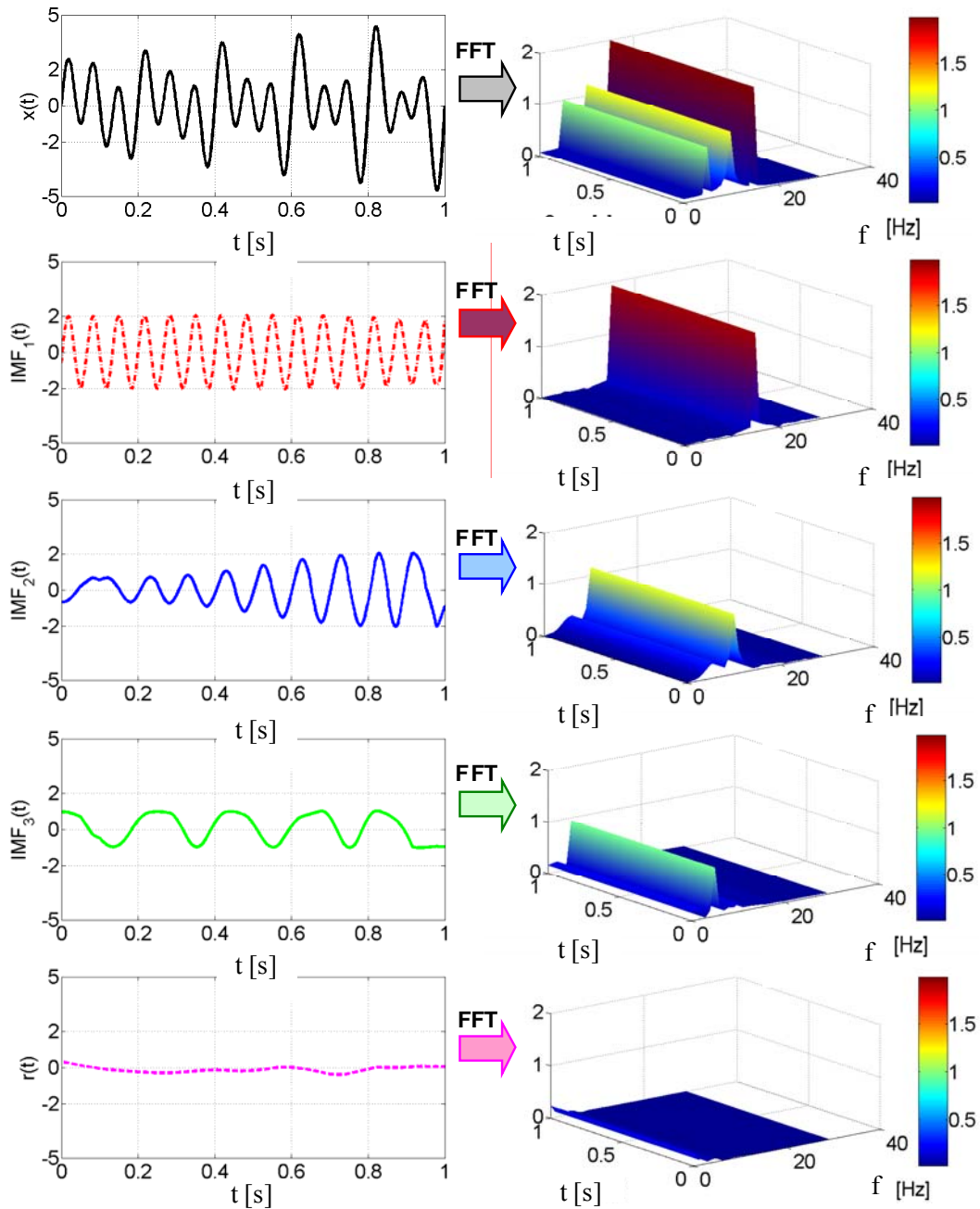


Fig. 2. EMD and spectrum decomposition for the model signal

#### 4. EXPERIMENT RESULTS

In order to check the usefulness of EMD analysis for diagnosing the condition of gearboxes, the recorded vibration speeds were subjected to the operation of a decomposition algorithm. Some examples of the results are shown in Fig. 3÷10.

From the  $x(t)$  base signal components obtained, spectra were determined. Based on the so determined spectra, the signal energy was defined for subsequent decomposition levels. The results obtained are presented in Figs. 11÷14 and in Table 2. In order to depict better the differences in the energy determined from the spectra between the good and poor condition of the gearbox, the results were referred to the good condition, which was assumed to equal 100%.

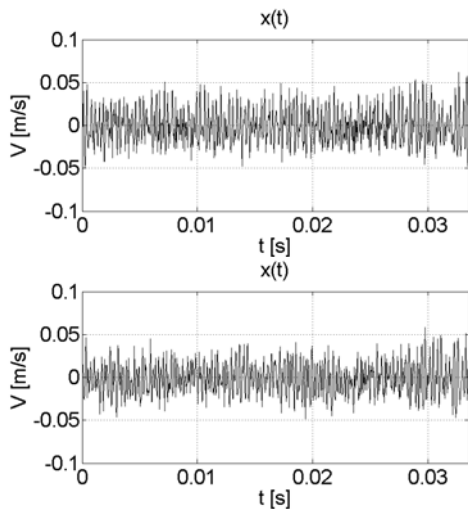


Fig. 3. Recorded signal for the gearbox without faults (a), and with a crack at the tooth root (b)

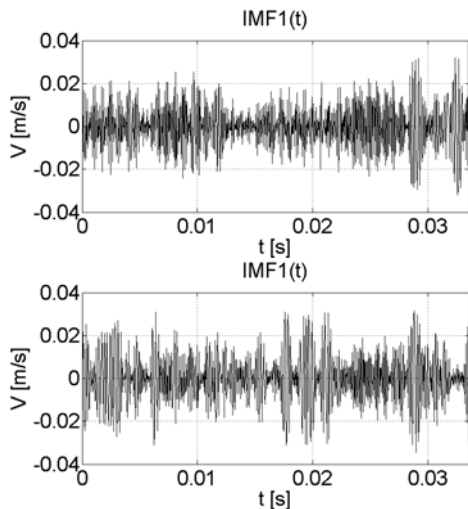


Fig. 4. IMF1 for the gearbox without faults (a), and with a crack at the tooth root (b)

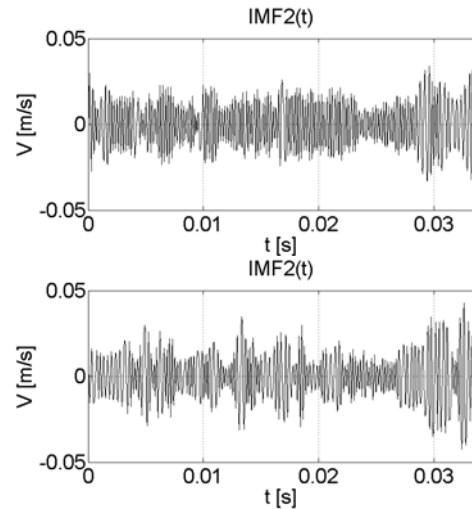


Fig. 5. IMF2 for the gearbox without faults (a), and with a crack at the tooth root (b)

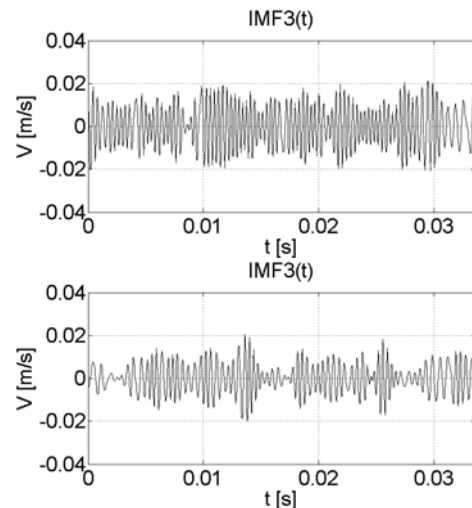


Fig. 6. IMF3 for the gearbox without faults (a), and with a crack at the tooth root (b)

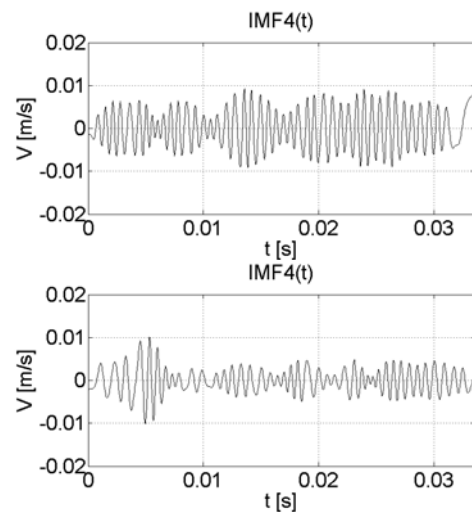


Fig. 7. IMF4 for the gearbox without faults (a), and with a crack at the tooth root (b)



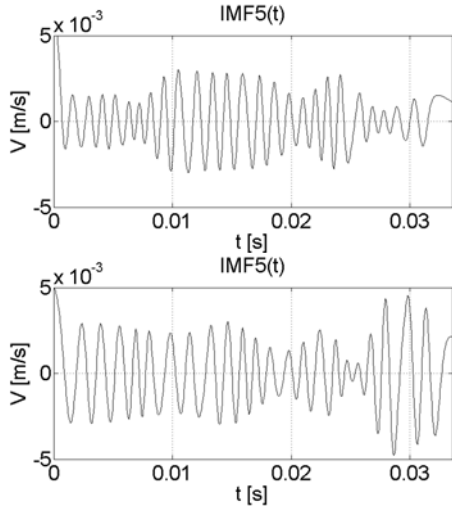


Fig. 8. IMF5 for the gearbox without faults (a), and with a crack at the tooth root (b)

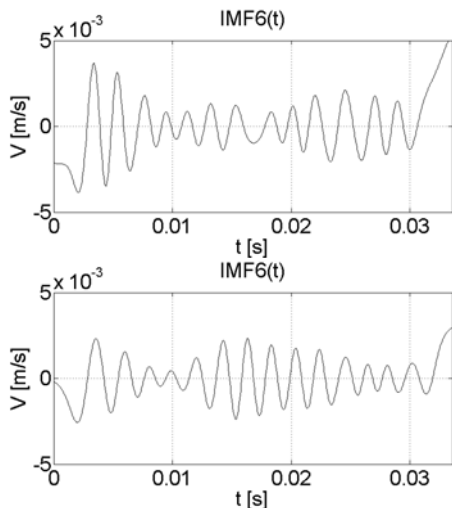


Fig. 9. IMF6 for the gearbox without faults (a), and with a crack at the tooth root (b)

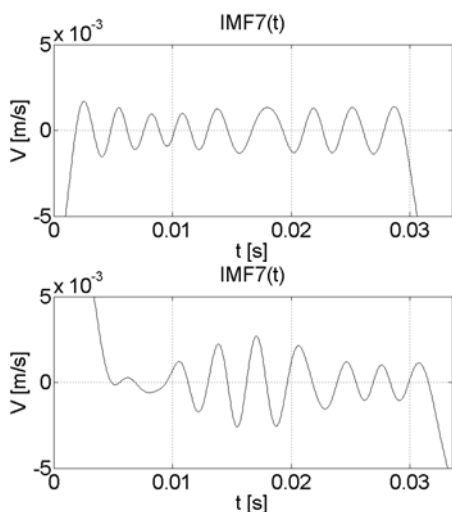


Fig. 10. IMF7 for the gearbox without faults (a), and with a crack at the tooth root (b)

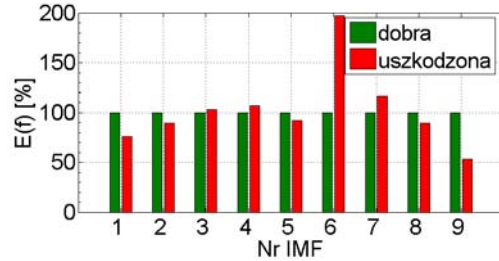


Fig. 11. Spectrum energy (n=900 [r.p.m.], Q=2.58 [MPa])

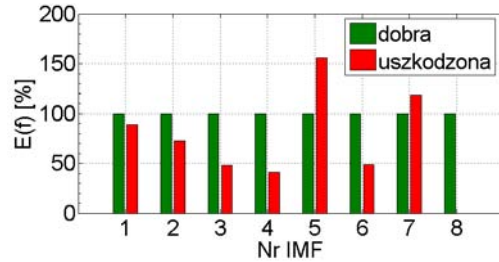


Fig. 12. Spectrum energy (n=1800 [r.p.m.], Q=2.58 [MPa])

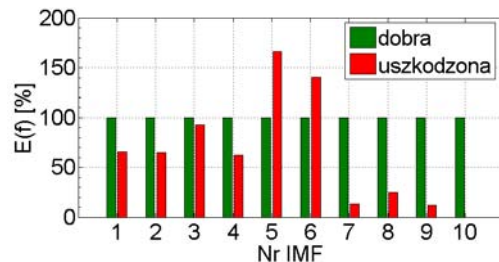


Fig. 13. Spectrum energy (n=900 [r.p.m.], Q=3.85 [MPa])

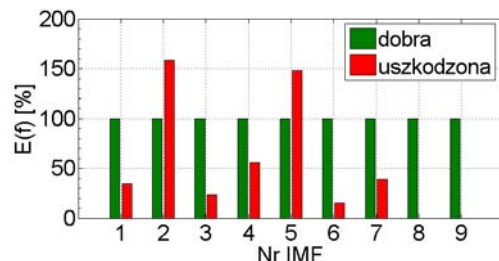


Fig. 14. Spectrum energy (n=1800 [r.p.m.], Q=3.85 [MPa])

By comparing the results obtained, it can be noted that the percentage differences in the spectrum energy levels of signals  $(x)t$  measured for the good and for the damaged gear are below 20%. When observing the results (Figs. 11÷14) obtained for the subsequent decomposition levels, some levels can be found, for which the percentage differences are several times larger than when comparing the energy of the registered signals. Regardless of the gearbox operation parameters, the highest percentage increase of spectrum energy is observed for the sixth intrinsic mode function. The differences obtained reach up to 100%.

Table 2. List of energy from spectra

Operation parameters	Signal	Spectrum energy for the gear:	
		undamaged [%]	damaged [%]
n=900 [r.p.m.], Q=2.58 [MPa]	X(f)	100	117,73
	IMF1(f)	100	75,835
	IMF2(f)	100	89,389
	IMF3(f)	100	103,15
	IMF4(f)	100	106,79
	IMF5(f)	100	91,682
	IMF6(f)	100	196,82
	IMF7(f)	100	116,63
	IMF8(f)	100	89,43
	IMF9(f)	100	53,367
n=1800 [r.p.m.], Q=2.58 [MPa]	X(f)	100	84,703
	IMF1(f)	100	88,884
	IMF2(f)	100	72,713
	IMF3(f)	100	48,352
	IMF4(f)	100	40,822
	IMF5(f)	100	155,79
	IMF6(f)	100	48,684
	IMF7(f)	100	118,21
n=900 [r.p.m.], Q=3.85 [MPa]	X(f)	100	109,46
	IMF1(f)	100	65,572
	IMF2(f)	100	64,588
	IMF3(f)	100	92,335
	IMF4(f)	100	62,319
	IMF5(f)	100	166,37
	IMF6(f)	100	140,03
	IMF7(f)	100	13,466
	IMF8(f)	100	25,079
IMF9(f)	100	11,736	
n=1800 [r.p.m.], Q=3.85 [MPa]	X(f)	100	81,395
	IMF1(f)	100	34,338
	IMF2(f)	100	158,61
	IMF3(f)	100	23,64
	IMF4(f)	100	56,05
	IMF5(f)	100	148,3
	IMF6(f)	100	15,184
	IMF7(f)	100	38,944

To sum up, a conclusion can be drawn that it is possible to effectively use the signal spectra energy for diagnosing gearboxes, after the application of empirical mode decomposition.

## REFERENCES

- [1] Cempel C.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1989.
- [2] Gao Q., et al.: *Rotating machine fault diagnosis using empirical mode decomposition*. MSSP 22 (2008), str. 1072÷1081.

- [3] Junsheng C., et al.: *Research on the intrinsic mode function (IMF) criterion in EMD method*. MSSP 20 (2006), str. 817÷824.
- [4] Loutridis S. J.: *Damage detection in gear systems using empirical mode decomposition*. Engineering Structures 26 (2004), str. 1833÷1841.
- [5] Radkowski S.: *Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych*. Biblioteka Problemów Eksploatacyjnych, Warszawa-Radom 2002.



Doctor Bogusław LAZARZ, is an associate professor of the Silesian University of Technology, Faculty of Transport, Department of Automotive Vehicles Construction at. He specialises in vibroacoustic diagnostics of gearboxes, modelling and computer-assisted design of power transmission systems with gears and in signal processing methods.



Doctor habilitated Henryk MADEJ, Eng, is employed as an associate professor of the Silesian University of Technology, Faculty of Transport, Department of Automotive Vehicles Construction. He deals with issues connected with vibroacoustics of machines, diagnosing combustion engines and gearboxes, automotive mechatronics, and metrology.



Dr Piotr CZECH, Eng., is an assistant professor at the Silesian University of Technology, Transport Faculty, Department of Automotive Vehicle Construction. He is the winner of the competition for the Prize of President of the Council of Ministers and for Fiat Prize. In his scientific work, he deals with using the artificial intelligence methods and signal processing methods in diagnosing components of power transmission systems.

*Scientific work financed from the funds of the Ministry of Science and Higher Education in the years 2006-2009 as a research project no. 4T07B00230.*



## DIAGNOSTICS OF CLEARANCE IN THE PISTON-CYLINDER ASSEMBLY USING HOELDER COEFFICIENTS

Henryk MADEJ, Piotr CZECH

Silesian University of Technology, Transport Faculty, Department of Automotive Vehicle Construction  
8 Krasieńskiego Street, 40-019 Katowice, e-mail: [henryk.madej@polsl.pl](mailto:henryk.madej@polsl.pl), [piotr.czech@polsl.pl](mailto:piotr.czech@polsl.pl);

### Summary

The paper gives an overview of the results of the attempt to utilise Hoelder coefficients for the detection of clearance in piston-cylinder assembly of a combustion engine with spark ignition. Condition of the engine tested was evaluated based on the accelerations of vibrations recorded on the engine body. The vibration acceleration signals were analysed with the aid of continuous wavelet transform (CWT). Properly processed results of the wavelet analysis allowed modified Hoelder coefficient values to be obtained. According to the study, the coefficients obtained can be useful in evaluating the condition of a combustion engine.

Keywords: diagnostics, IC engine, continuous wavelet transform.

### DIAGNOZOWANIE LUZU W UKŁADZIE TŁOK-CYLINDER Z WYKORZYSTANIEM WSPÓLCZYNNIKÓW HOELDERA

#### Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono wyniki próby zastosowania współczynników Hoeldera do wykrywania luzów w układzie tłok-cylinder silnika spalinowego z zapłonem iskrowym. Ocene stanu diagnozowanego silnika prowadzono na podstawie przyspieszeń drgań zarejestrowanych na korpusie silnika. Sygnały przyspieszeń drgań analizowano za pomocą ciągłej transformaty falkowej (CWT). Odpowiednio przetworzone wyniki analizy falkowej umożliwiły uzyskanie zmodyfikowanych współczynników Hoeldera. Z badań wynika, że uzyskane współczynniki mogą być przydatne w rozpoznawaniu stanów silnika spalinowego.

Słowa kluczowe: diagnostyka, silniki spalinowe, ciągła transformata falkowa.

## 1. INTRODUCTION

The vibro-acoustic signal as a source of information on engine condition is more and more often utilised for diagnosing mechanical damage of combustion engines. Diagnostic systems used in modern combustion engines are intended to localise the component or system which, due to natural wear or damage, can no longer perform as specified by the manufacturer. Growing demands as to the durability and reliability of engines, and minimising the cost and harmful effects on the environment result in the need to monitor their condition during life-cycle.

One of the methods for diagnostic data acquisition is to monitor the level of vibration generated by engine components. A combustion engine is an object exposed to internal and external forces. These are mostly: the combustion pressure, motion of the piston-crank assembly, timing system requirements, and those resulting from the engine accessories.

One of the main forces of the piston-crank assembly are the piston strokes while changing its motion direction. The force value depends crucially upon the clearance between the piston and cylinder wall [7, 8], resulting from engine wear. The value

of the force is the function of combustion pressure and engine rotary speed.

The present paper presents an attempt to utilise Hoelder coefficient for the evaluation of the piston-cylinder assembly.

## 2. USING THE CWT ANALYSIS FOR DIAGNOSTICS OF COMBUSTION ENGINES

Vibration signals recorded on a Fiat Panda ZI engine capacity 1.2 were used for the tests. The tests were carried out in FLA 203 test house made by Bosch, using vibration acceleration transducer type ICP and data acquisition card NI PCI-6143 controlled by a program developed in LabView environment. Acceleration of the engine body vibration was recorded perpendicularly and in parallel to the 4th cylinder, and in parallel to the 1st cylinder, and the sampling frequency used was 40 kHz. The measurements were taken at the rotary speed of 2500 rpm. 20 runs were recorded for each measurement within the shaft rotation angle 0-720° for the engine prior to and after the repair. The engine repair involved the replacement of worn pistons which reduced the clearance in the piston-cylinder assembly.

Refer to Figures 1 and 2 for examples of vibration signals recorded before and after the repair.

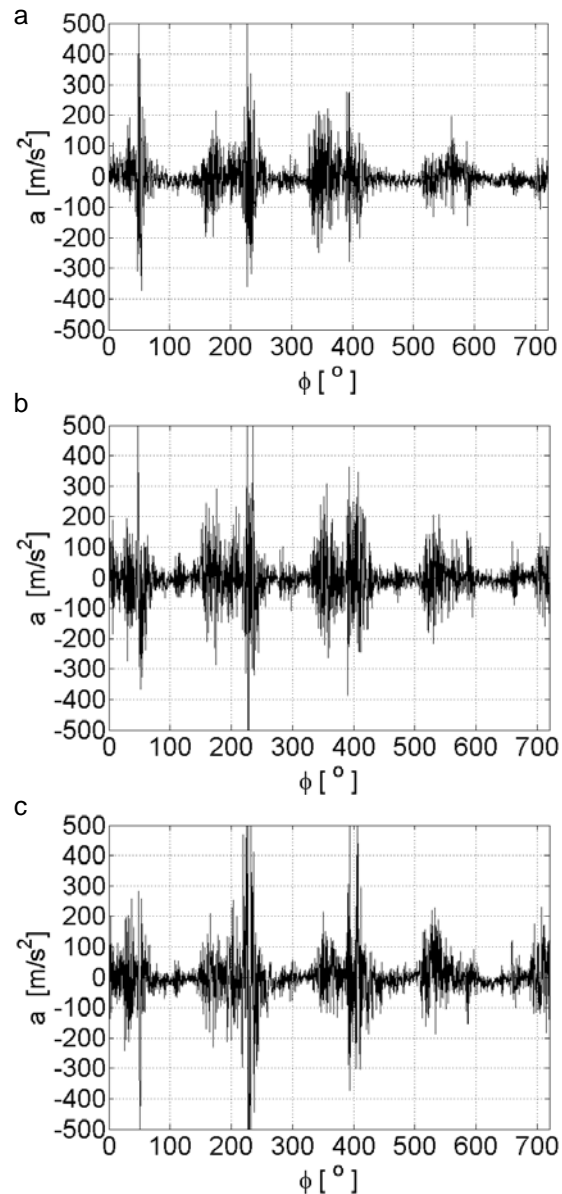


Fig. 1. Recorded engine body vibration prior to the repair, (a) perpendicularly to the 4th cylinder, (b) in parallel to the 4th cylinder, (c) in parallel to the 1st cylinder

The replacement of worn pistons did not explicitly affect the character of changes in local measurements derived from vibration acceleration signals in time domain. Using the descriptive statistics measures [2] broadly described in literature, in which a group of average position measures can be distinguished, namely the tendency of central measurable variable feature, a group of variation measures, i.e. the average variability of variants of measurable feature and the group of kurtosis and slope measures, i.e. the flattening or sharpness of the distribution of

measurable variants of variable feature, it was impossible to explicitly identify the clearance in piston-cylinder assembly.

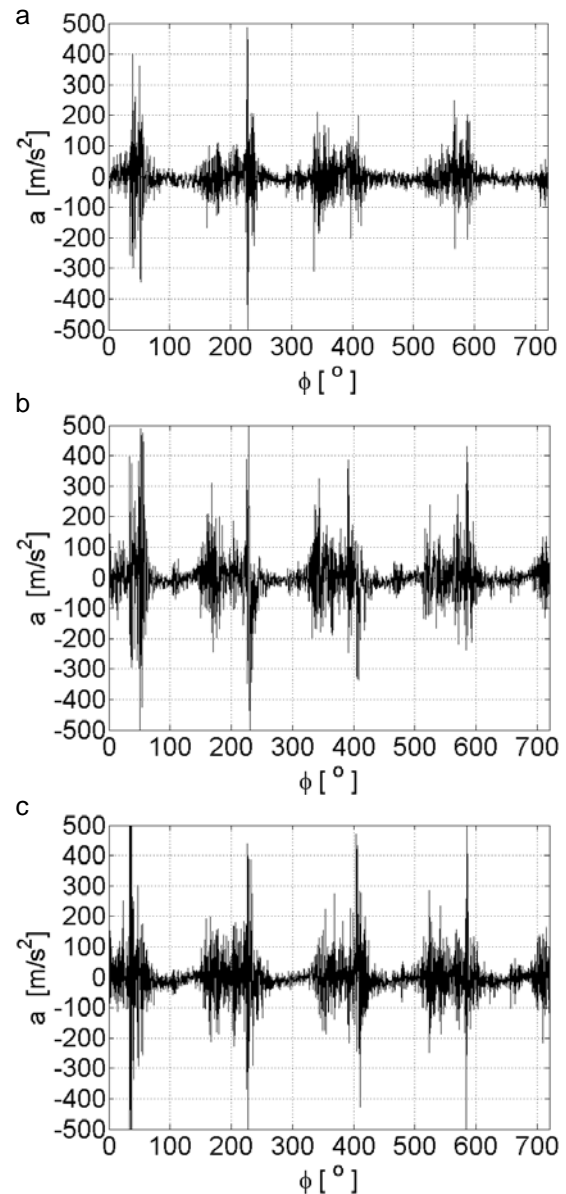


Fig. 2. Recorded engine body vibration after the repair, (a) perpendicularly to the 4th cylinder, (b) in parallel to the 4th cylinder, (c) in parallel to the 1st cylinder

Since the initial examination failed to produce positive results, in the following experiments, it was decided to verify the usefulness of one of the most popular and most dynamically developing tools for signal analysis, which is the continuous wavelet transform (CWT) [1, 8, 9]. It is utilised for analysing non-stationary signals which often results from changeability in time of parameters and non-linearity [1]. Analysis of such signals requires windows to be used which are narrowed for high frequencies and broadened for the low ones.

The basic advantage of the wavelet transform is the compromise between the selection of resolution in the time and frequency domain [1]. Continuous wavelet transform can be obtained from the dependency:

$$CWT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-a}{b} \right) dt \quad (1)$$

where:

a – scale coefficient,

b – shift parameter in time domain,

$\psi(t)$  – base wavelet,

f(t) – analysed signal.

See fig. 3 for sample distributions of recorded vibration signals resulting from the wavelet analysis.

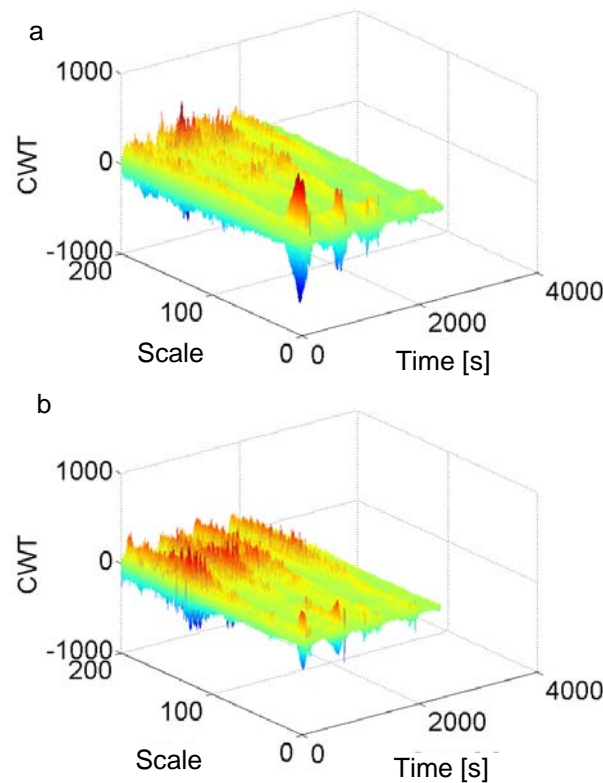


Fig. 3. Distributions of continuous wavelet transform for vibrations perpendicular to the 4th cylinder recorded prior to (a) and after (b) repair of the engine

One of the available methods for describing wavelet distributions are Hoelder coefficients. According to the literature, the dependency (1) can be transformed as follows [3-6]:

$$|CWT(a,b)| = Cb^{h+\frac{1}{2}} \quad (2)$$

where:

C – Hoelder constant,

h – Hoelder coefficient.

In order to determine the coefficients it is necessary to:

1. determine continuous wavelet transform in the time-scale domain,
2. transform the CWT distribution to the |CWT| form,
3. determine, in time domain, the moment in which significant increase of wavelet coefficient is noticed,
4. to logarithm the |CWT| distribution,
5. to draw |CWT| plot for pre-selected moment in time.

Another stage in the process of determining Hoelder coefficients was to adopt a range of scale in which it would be possible to separate different states of wear of the piston-cylinder assembly. The CWT distributions obtained did not allow proper scale range to be determined. Since the experiment had failed to bring the desired outcome, another attempt was made in which the scheme was modified to allow Hoelder coefficients to be obtained. Instead of determining the point in time domain, in which significant increase of wavelet coefficients is apparent, the sum of wavelet coefficients for the subsequent scale values were assumed. That resulted in distributions shown in figure 4.

The plots obtained reveal significantly well-ordered character of amplitude changes. More thorough analysis of the results allowed the range of scale for signals to be determined for vibrations perpendicular to the 4th cylinder and parallel to the 1st cylinder, in which two states of wear in the piston-cylinder assembly can be clearly separated. Only in the case of signals recorded perpendicularly to the 4th cylinder, it was impossible to determine such range. For further analysis, a scale for 4 – 24 was assumed (see fig. 5).

By transforming the dependency (2), Hoelder coefficients can be determined:

$$\log \left( \sum_a |CWT(a,b)| \right) = (h+0,5) \cdot \log(a) + \log(C) \quad (3)$$

At the same time, it is apparent that the dependency (3) can be expressed as follows:

$$y = A \cdot x + B \quad (4)$$

where:

$$y = \log \left( \sum_a |CWT(a,b)| \right) \quad (5)$$

$$A = h^* = (h + 0,5) \quad (6)$$

$$x = \log(a) \quad (7)$$

$$B = C^* = \log(C) \quad (8)$$

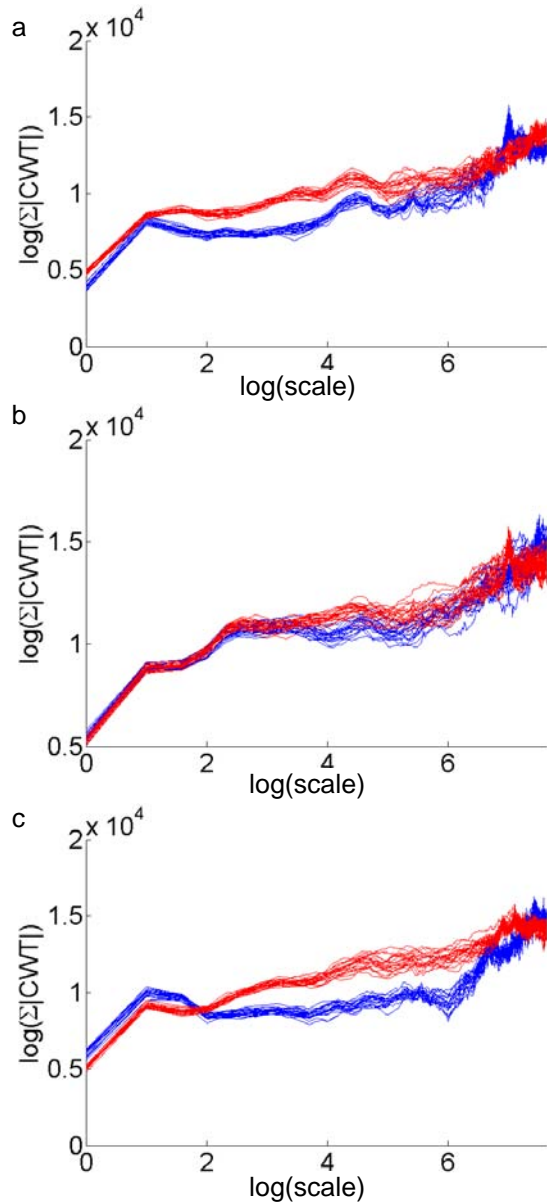


Fig. 4.  $\Sigma|CWT|$  distribution in the vibration acceleration domain (a) perpendicular to the 4th cylinder, (b) parallel to the 4th cylinder, (c) parallel to the 1st cylinder, recorded prior to and after the engine repair

Hoelder coefficients were determined for all recorded accelerations of vibration of the engine body prior to and after the repair perpendicular to the 4th cylinder, parallel to the 4th cylinder, parallel to the 1st cylinder. The results obtained are shown in figures 6, 7 and 8.

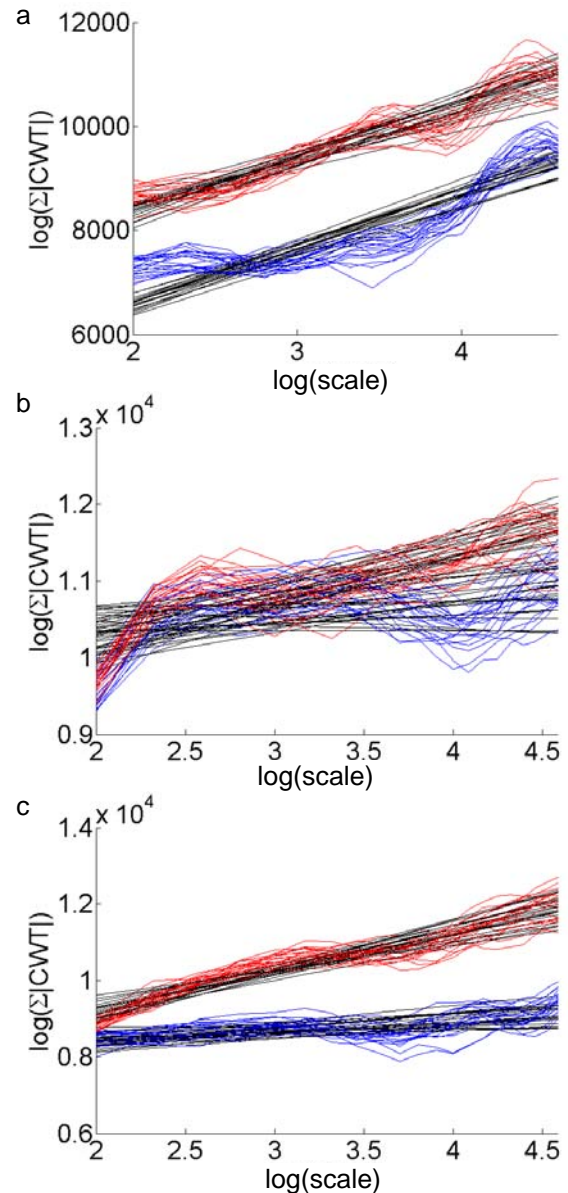


Fig. 5.  $\Sigma|CWT|$  within the scale assumed for the vibration acceleration domain (a) perpendicular to the 4th cylinder, (b) parallel to the 4th cylinder, (c) parallel to the 1st cylinder, recorded prior to and after the engine repair

The results obtained point to the possibility to identify the clearance of the piston-cylinder assembly, using Hoelder coefficient. While using, for diagnostic purposes, the signals of accelerations of vibration of the engine body measured perpendicularly to the 4th cylinder, the C coefficient should be used, and for signals measured in parallel to the 1st cylinder, correct results will be obtained using the h coefficient. Attempts to use Hoelder coefficients for accelerations of vibrations measure in parallel to the 4th cylinder gave unsatisfactory results.

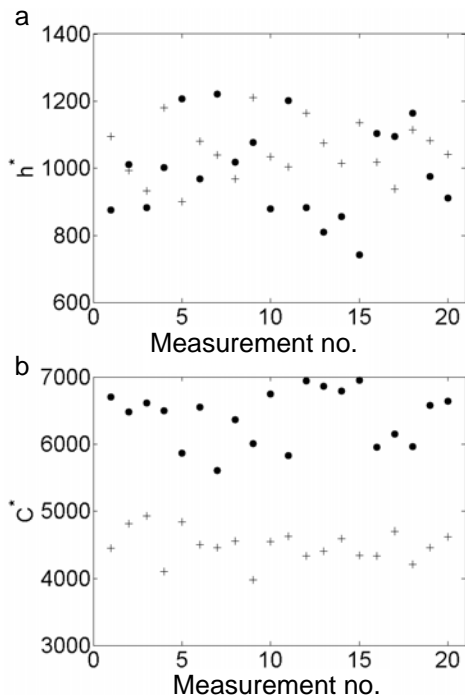


Fig. 6. Hoelder coefficients determined for recorded accelerations of vibration of the engine body measured perpendicularly to the 4th cylinder (“circle” – prior to, “cross” – after the engine repair)

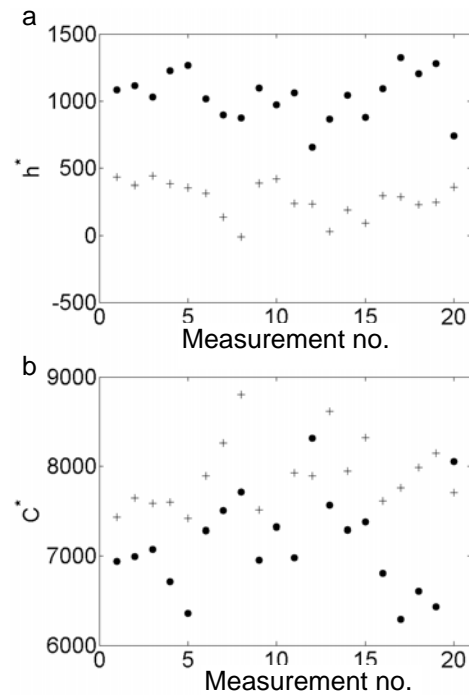


Fig. 8. Hoelder coefficients determined for accelerations of vibration of the engine body measured perpendicularly to the 1st cylinder (“circle” – prior to, “cross” – after the engine repair)

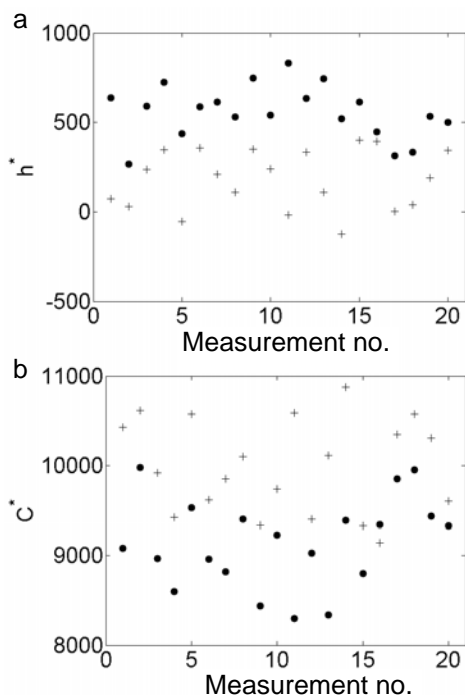


Fig. 7. Hoelder coefficients derived from accelerations of vibration of the engine body measured perpendicularly to the 4th cylinder (“circle” – prior to, “cross” – after the engine repair)

#### 4. Summary

Diagnosing engines with vibro-acoustic method is difficult also due to the necessity to analyse non-stationary signals. The engine performance can be fully depicted with combined time-frequency signal representations.

Continuous wavelet transform used in the studies allows a complex vibration signal to be decomposed, allowing the changeability of amplitudes to be described in a function of frequency (scale) and crankshaft rotation angle. Appropriate transformation of the results of wavelet analysis allowed modified Hoelder coefficients to be obtained.

The tests carried out point to the possibility to identify the clearance of the piston-cylinder assembly, using modified Hoelder coefficients. It has been noted, however, that the effectiveness of that method depends on the location and direction of the measurement of acceleration vibration.

## REFERENCES

- [1] Batko W., Ziółko M.: *Zastosowanie teorii falek w diagnostyce technicznej (Applications of wavelet theory in technical diagnostics)*. AGH, Kraków 2002.
- [2] Cempel C., *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn (Vibro-acoustic diagnostics of machines)*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warsaw 1989.
- [3] Douka E., Loutridis S., Trochidis A.: *Crack identification in beams using wavelet analysis*. International Journal of solid and structures, (40) 2003.
- [4] Douka E., Loutridis S., Trochidis A.: *Crack identification in plates using wavelet analysis*. Journal of sound and vibration, (270) 2004.
- [5] Loutridis S., Douka E., Trochidis A.: *Crack identification in double-cracked beams using wavelet analysis*. Journal of sound and vibration, (277) 2004.
- [6] Łazarz B., Madej H., Czech P.: *Wykorzystanie współczynników Hoeldera w diagnostyce przekładni zębatych. (Applications of Hoelder coefficients for diagnostics of toothed gears)*. Silesian University of Technology, Scientific Bulletins, "Transport" Series of 57 / 2005, page 211÷214.
- [7] Madej H., Flekiewicz M., Wojnar G.: *Różne aspekty diagnostyki WA silników spalinowych z wykorzystaniem analiz w dziedzinie czasu i skali. (Various aspects of WA diagnostics using analyses in time and scale domains)*. 13th Scientific Conference on Vibrotechnology and Vibro-acoustics, 8th Nationwide Seminary "Vibro-acoustics in Technical Systems "WIBROTECH 2007", Jachranka 29.11÷30.11.2007, pages 177÷186.
- [8] Madej H., Flekiewicz M., Wojnar G.: *Zastosowanie ciągłej transformaty falkowej (cwt) do analizy drgań silników spalinowych. (Application of continuous wavelet transform for vibration analysis in combustion engines)*. PAN Automotive Committee Publications, booklet no. 33-34, Krakow, pages. 259÷267.
- [9] Wu J. D., Chen J. C.: *Continous wavelet transform for fault signal diagnosis of internal combustion engines*. NDT&E International, vol. 39, 2006, page 304÷311.



**Henryk MADEJ**, Ph. D., D. Sc. Eng. work as a professor in the Department of Automotive Vehicle Construction Silesian University of Technology in Katowice. His area of interests involves vibro-acoustics of machinery, diagnostics of combustion engines and toothed gears, automotive mechatronics and metrology. Member of the Board of the Polish Association of Technical Diagnostics.



**Piotr CZECH** Ph.D. Eng. is an assistant professor at the Silesian University of Technology, Transport Faculty, Department of Automotive Vehicle Construction. He defended his dissertation "Detection of defects of toothed gears with artificial intelligence methods" with a distinction. In his scientific work, he deals with the use of artificial intelligence (neural networks, fuzzy logic, genetic algorithms) and methods for processing signals in diagnostics of driving systems.

*Scientific work funded by MNiSzW between 2005-2008 as a research project.*



## VIBRATION BASED DAMAGE DETECTION USING LAPLACE WAVELET

Leszek MAJKUT

Akademia Górniczo – Hutnicza, Katedra Mechaniki i Wibroakustyki  
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, [majkut@agh.edu.pl](mailto:majkut@agh.edu.pl)

### Summary

In work the Laplace wavelet definition is given and its utilization to the damage diagnostics. The Laplace wavelet is a complex, analytic damped exponential wavelet and it is desirable wavelet basis to analyze signals of impulse response. A correlation filtering approach is introduced using the Laplace wavelet to identify the modal parameters from vibration signals.

Considered in work damage were: small crack in steel beam and change (the decrease) the tension force in the prestressed element. Based on simulated (cracked beam) and measured (prestressed beam) signals the natural frequencies and modal damping ratios have been determined.

Keywords: damage detection, Laplace wavelet, natural frequency, modal damping.

### WYKORZYSTANIE FALKI LAPLACE'A W DIAGNOSTYCE USZKODZEŃ

#### Streszczenie

W pracy podano definicję falki Laplace'a i sposób jej wykorzystania do celów diagnostyki uszkodzeń. Falka Laplace'a jest to pewna analityczna, zespolona i tłumiona funkcja wykładnicza co ułatwia analizę sygnałów odpowiedzi impulsowych. Dla tak zdefiniowanej falki zastosowano filtrowanie korelacyjne co pozwala na wyznaczenie parametrów modalnych analizowanego układu, na podstawie analizy jego odpowiedzi impulsowej.

Analizowanymi uszkodzeniami były: „małe” pęknięcie w belce prostoliniowej i zmiana siły sprężającej w elemencie wstępnie sprężonym.

Słowa kluczowe: diagnostyka, falka Laplace'a, częstości własne, tłumienie modalne.

## 1. INTRODUCTION

Damage in structural element caused changing in its natural frequencies [3, 6, 7]. The simplest way to detect natural frequency is using the Fourier transform of impulse response of damaged element. The Fourier transform uses the basis of infinitely long sinusoids, and it is thus not ideal for non-stationary signals. In work the Laplace wavelet definition is given and its utilization to the damage diagnostics. The Laplace wavelet is a complex, analytic damped exponential wavelet and it is desirable wavelet basis to analyze signals of impulse response. A correlation filtering approach is introduced using the Laplace wavelet to identify the modal parameters from vibration signals.

Considered in work damage were: small crack in steel beam and change (the decrease) the tension force in the prestressed element.

In case of crack, these changes in natural frequencies can be used for detection [2, 6, 8] and in some cases identification of crack [4, 5].

## 2. ANALYSED SYSTEMS

Based on natural frequency and Fourier transform it is difficult to find a little damage in systems. The changes in physical properties due to a little damage and associated with it changes in natural frequencies can be smaller than error in signal processing (i.e. FFT).

To overcome this problem the utilization the Laplace wavelet in two different systems is showed.

Cracked beam model. In work the simply supported with crack showed in fig.1 was analysed.

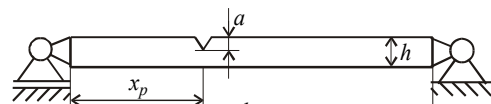


Fig. 1. Analysed beam with crack

Proposed method signal processing allow to detect a crack in an early stage. At work the crack of 5 % beam height is analysed. In simulation the crack is substituted by rotational spring, which flexibility is calculated by using Castigliano theorem and laws of the fracture mechanics.

Prestress losses. In work the decrease in tension force  $N$  in the prestressed element was analysed.

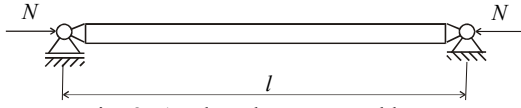


Fig. 2. Analysed prestressed beam

Detection of prestress losses is very important especially in vibration based diagnosis or monitoring.

Prestress is applied mostly to concrete beam because it has very little tension strength and due to prestress concrete beams can be bend [1]. Loss in prestress causes to occur tensile stress in concrete what can lead to crack formation in element. Unfortunately both failure occur in different directions in changes of natural frequency.

In fig. 3 the curve for beam with both damages but having constant value of natural frequency is showed. It means for each point of this curve beam have two different damage but have natural frequency equal to natural frequency of undamaged beam.

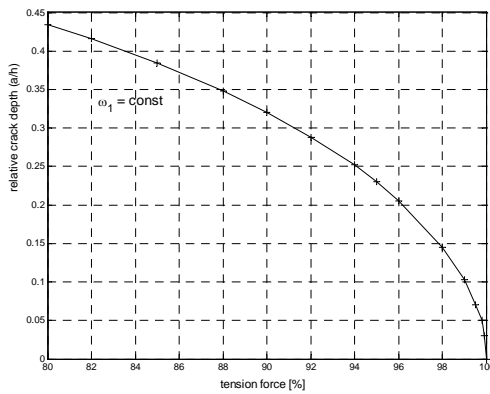


Fig. 3. Damaged beam with no change in natural frequency

In fig. 4 the impulse response function is showed for undamaged and damaged (cracked) beam.

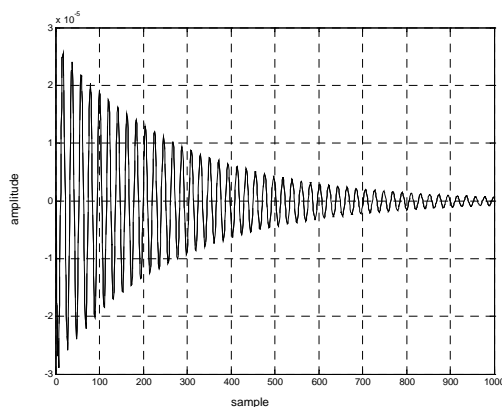


Fig. 4. Impulse response function

For FFT in both cases one can obtain the same natural frequency. Because of this the Laplace wavelet is introduced in next point of this work.

### 3. LAPLACE WAVELET

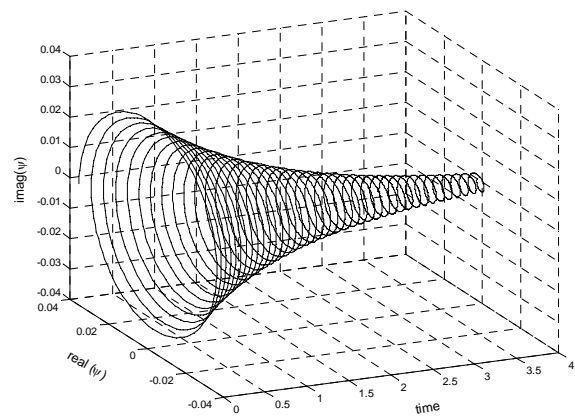
The Laplace wavelet is a complex, analytic damped exponential wavelet and it is desirable wavelet basis to analyse signals of impulse response. Using the Laplace wavelet one can identify not only natural frequency but also modal viscous damping ratio.

The Laplace wavelet is defined as:

$$\psi(f, \zeta, \tau, t) = A e^{\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cdot 2\pi \cdot f \cdot (t-\tau)} \cdot e^{-j2\pi \cdot f \cdot (t-\tau)} \quad (1)$$

for  $t \in \langle \tau, \tau + D \rangle$  and  $\psi(f, \zeta, \tau, t) = 0$  for the others  $t$ , where  $j = \sqrt{-1}$ ,  $f$  - frequency  $f \in \mathbb{R}^+$ ,  $\zeta$  - viscous damping ratio  $\zeta \in (0, 1)$ , and time index  $\tau$ . The range  $D$  ensures the wavelet is completely supported and has nonzero finite length equal  $D$ .

Example of Laplace wavelet in fig. 5 is shown.

Fig. 5. Laplace wavelet for  $f = 10\text{Hz}$ ,  $\zeta = 0.01$ ,  $D = 4\text{s}$ 

### 4. CORRELATION FILTERING

Correlation can be measured by using an inner (dot) product operation written as:

$$\begin{aligned} \langle \psi_\gamma(t), x(t) \rangle &= \|\psi_\gamma(t)\|_2 \cdot \|x(t)\|_2 \cdot \cos(\theta) = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_\gamma(t) \cdot x(t) dt \end{aligned} \quad (2)$$

where:  $\gamma = \{f, \zeta, \tau\}$ .

A correlation function  $c_\gamma \in \mathbb{R}$  is defined by:

$$c_\gamma = \frac{|\langle \psi_\gamma(t), x(t) \rangle|}{\|\psi_\gamma(t)\|_2 \cdot \|x(t)\|_2} \quad (3)$$

Peaks of  $c_\gamma$  relate the wavelets with the strongest correlation to the signal:

$$\chi = \max(c_\gamma) \quad (4)$$

The frequency  $f$  and damping  $\zeta$  associated with the  $\chi$  indicate the modal parameters of the system.

In fig. 6 an example signal correlation is showed.

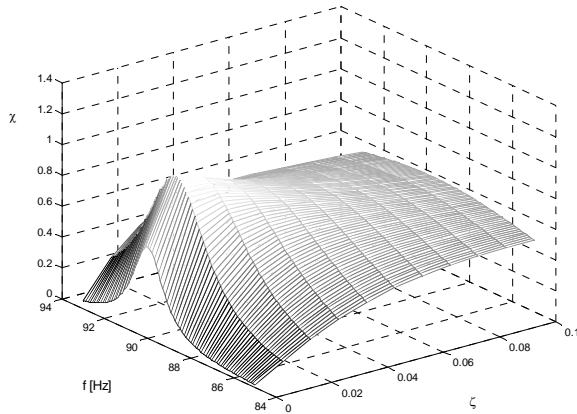


Fig. 6. Example  $\chi$  function

**5. DAMAGE IDENTIFICATION**

Laplace wavelet can be used for identification not only first but also others natural frequencies. In this case the first, second and third natural frequencies and modal viscous damping ratio are identified.

Crack in beam. In tab. 1 and 2 the changes in first and second natural frequency and modal damping ratio are given.

Tab. 1

relative crack depth $a/h$	first natural frequency	damping ratio
0	48.94	0.011
3	48.93	0.011
5	48.91	0.011
10	48.83	0.011
15	48.71	0.011

Tab. 2

relative crack depth $a/h$	second natural frequency	damping ratio
0	195.79	0.011
3	195.78	0.011
5	195.76	0.011
10	195.68	0.011
15	195.34	0.011

There is no change in damping ratio because all date comes from computer simulation.

The changes in natural frequency in fig. 7 are showed.

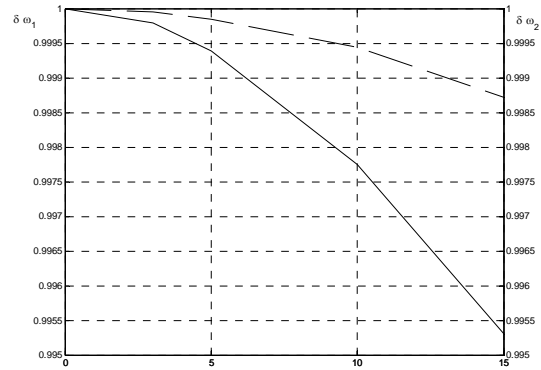


Fig. 7. Changes in fist (—) and second (- -) natural frequency of a cracked beam

Prestress losses. Author would like to thank dr inż. Ronan Barczewski for vibration data measured on laboratory specimens. In tab. 3 the changes third natural frequency and modal damping ratio are given.

Tab. 3

tension force [N]	third natural frequency	damping ratio
0	350.60	0,0051
20	350.88	0,0053
40	351.27	0,0055
60	354.77	0,0058
80	356.91	0,0074
100	357.93	0,0087

The changes in natural frequency and damping ratio in fig. 8 are showed.

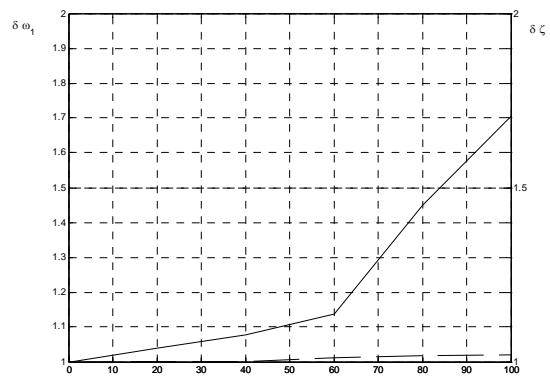


Fig. 8. Changes in fist natural frequency (- -) and damping ratio (—)

In fig. 8 changes of the both analysed value are given with the same scale. As one can see the damping ratio are more sensitive to prestress changing.

## 6. SUMMARY

In work the Laplace wavelet was introduced and utilized to find a little changes in natural frequencies of damaged element. Of course in real object so little changes in frequencies can occur not only due fault but due change temperature, humidity and so on.

Using the Laplace wavelet one can also find the modal viscous damping ratio. Analysed problems shows that changes in damping ratio are more sensitive to prestress changing.

This work was done as a part of research project  
N 504 042 32/3443

## BIBLIOGRAPHY

- [1] Batko W., Majkut L.: *Damage identification in prestressed structures using phase trajectories*. Diagnostyka nr 4 (44)/2007, pp. 63-68
- [2] Lee Y-S., Chung M-J.: *A study on crack detection using eigenfrequency test data*. Computers and Structures 77 (2000) pp. 327-342.
- [3] Majkut L.: *Wibroakustyczne symptomy pęknięcia belki*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn 144(4) str. 165-181.
- [4] Majkut L.: *Identyfikacja pęknięcia w belkach o znanych warunkach brzegowych*. Diagnostyka, 2004, 32 str. 107-116.
- [5] Majkut L.: *Identyfikacja pęknięcia w belkach na podstawie pomiaru częstości własnych*. Kwartalnik AGH Mechanika 24 (2005) pp. 21-28.
- [6] Majkut L.: *Wpływ pęknięcia na drgania skrajne pręta*. Diagnostyka nr 36/2005, str. 99-102
- [7] Ostachowicz W., Krawczuk M.: *Analysis of the effect of cracks on the natural frequencies of a cantilever beam*. Journal of Sound and Vibration 150 (1991) pp. 191-201.
- [8] Owolabi G. M., Swamidas A. S. J., Seshadri R.: *Crack detection in beams using changes in frequencies and amplitudes of frequency response functions*. Journal of Sound and Vibration 265 (2003), pp 1-22.



Dr inż. **Leszek MAJKUT**  
(ur. 1970), absolwent  
Wydziału Elektroniki,  
Automatyki, Informatyki  
i Elektrotechniki AGH  
(1995). Pracę doktorską  
dotyczącą wpływu lokalnej  
zmiany sztywności na  
amplitudę drgań i widmo  
częstości obronił w 1999 na

Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. Obecnie prace badawcze dotyczące ogólnie pojętej wibromechaniki (drgania, wibroizolacja, hałas, diagnostyka) i teorii drgań ze szczególnym uwzględnieniem układów ciągłych prowadzi w zespole Wibromechaniki Katedry Mechaniki i Wibroakustyki AGH.

## THE INFLUENCE OF OIL LEAK IN VEHICLE SHOCK ABSORBER ON ITS DUMPING CHARACTERISTICS

Lukasz KONIECZNY, Rafał BURDZIK

Silesian University of Technology, Faculty of Transport  
Krańskiego 8, 40-019 Katowice, Poland fax./tel. 6034166 [lukasz.konieczny@polsl.pl](mailto:lukasz.konieczny@polsl.pl)

### Summary

This paper presents results of the vehicle shock absorber's researches on indicator test stand. On this stand can be determined the diagrams of force versus displacement and force versus velocity for selecting strokes and velocities. In researches the new hydraulic twin-tube vehicle shock absorber was modified and the changes of oil volume were possible. There was determined the influence of oil volume changes on force versus displacement and force versus velocity diagrams. On the basis of force versus velocity diagrams, the dumping characteristics were determined (value of force for maximum velocity on this diagram). The influence of oil volume changes on dumping characteristics was determined too. The results of this investigation can be used in simulation researches of vehicle suspension dynamic.

Keywords: shock-absorbers, vehicle suspension.

### WPLYW UBYTKU OLEJU W AMORTYZATORZE SAMOCHODOWYM NA JEGO CHARAKTERYSTYKI TLUMIENIA

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań amortyzatora samochodowego na stanowisku indykatorowym. Stanowisko to umożliwia wyznaczenie wykresów zmian sił tłumienia w funkcji przemieszczenia oraz prędkości dla zadanych parametrów skoków i prędkości wymuszenia. Przebadano nowy dwururowy amortyzator olejowy który został zmodyfikowany umożliwiając zmianę objętości oleju. Wyznaczono wykresy zmian sił tłumienia w funkcji przemieszczenia oraz prędkości dla obniżonej wartości objętości oleju. Na podstawie wykresów zmian sił tłumienia w funkcji prędkości wyznaczono charakterystyki tłumienia (wartości sił dla maksymalnych prędkości i określono wpływ ubytku oleju na te charakterystyki. Wyniki badań zostaną wykorzystane w badaniach symulacyjnych dynamiki zawiesznień samochodowych.

Słowa kluczowe: amortyzatory samochodowe, zawieszenia pojazdów samochodowych.

## 1. INTRODUCTION

The technical condition of shock absorber in vehicle suspension is very important, because it determines comfort and safety of driving. The result of used shock absorbers in bad condition is inter alia longer braking distance. For that reason the diagnostic of technical condition of vehicle shock absorber is important.

## 2. HYDRAULIC SHOCK ABSORBER

Nowadays, the telescopic, hydraulic shock absorbers are mostly in used vehicle suspension [1, 6]. In researches there was used the front, twin tube, hydraulic shock absorber for McPherson strut. This shock absorber was modified, so as the changes of oil volume were possible. The view of shock absorber before and after modification presents the fig. 1.



Fig.1. The shock absorber before and after modification

The shock absorber after modification is dismantlable, so as the changes of oil volume were possible. The modification of shock absorber doesn't change its dumping characteristics.

## 3. RESEARCH METHOD

The researches were made on indicator test stand. On this stand can be determined force versus displacement and force versus velocity diagrams for

selecting strokes and velocities. The Faculty of Transport at the Silesian University of Technology is in the possession of mechanical indicator test stand [2, 3, 4, 5]. The view of indicator test stand presents the fig. 2.



Fig. 2. The indicator test stand view

This test stand is electric engine driven. The rotary velocity of engine is controlled by frequency converter. The belt transmission with cog belt connect the engine and the eccentric system with changeable arm. The rotary move of eccentric system is changed on linear move of slider. The kinematics scheme of test stand shows fig. 3.

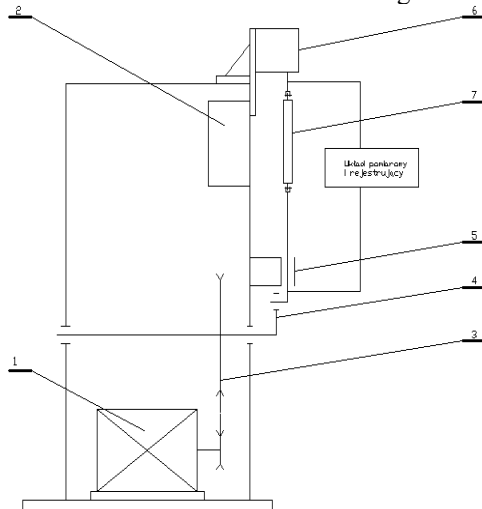


Fig. 3. The kinematics scheme of test stand  
1- electric motor, 2- frequency converter, 3- belt transmission, 4- eccentric system, 5- slider ways, 6- force sensor, 7- shock absorber

The lower end of shock absorber is mounted in slider. The piston rod is mounted in force sensor where the dumping force is measured. For sensing of forces the bi-directional extensometer sensor was used (range of sensor was 5 kN). The linear displacement of lower end shock absorber is

measured too. To measure linear displacement inductive displacement sensor was used.

The force versus displacement and force versus velocity diagrams are determined. On the basis of force versus velocity diagrams, the dumping characteristics were determined (value of force for maximum velocity on this diagram).

The force versus displacement diagram for shock absorber with oil leak shows fig. 4 [7].

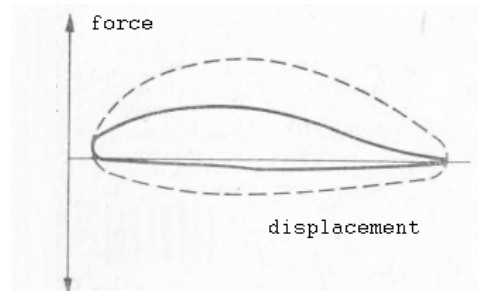


Fig. 4. Force versus displacement diagram for shock absorber with oil leak (continuous line – shock absorber with oil leak, dashed line - new shock absorber)

For shock absorber with oil leak the volume of oil is less than nominal, so the shock absorber suck air and emulsion is formed too. The shock absorber with considerable oil leak doesn't develop adequate dumping forces.

#### 4. RESEARCH RESULTS

The result of investigation shows fig. 5-9. On legend under diagrams there are described the increasing frequency fixed on frequency converter (increasing velocities). Every loop for selected velocity has different color.

Fig. 5 presents force versus displacement diagram for new shock absorber (10 different velocities for 50 mm stroke range). The forces for bound and rebound are different (nonsymmetrical forces). In this shock absorber the dumping forces are nonsymmetrical and nonlinear (the most of modern shock absorbers used in vehicle shock absorber have such properties).

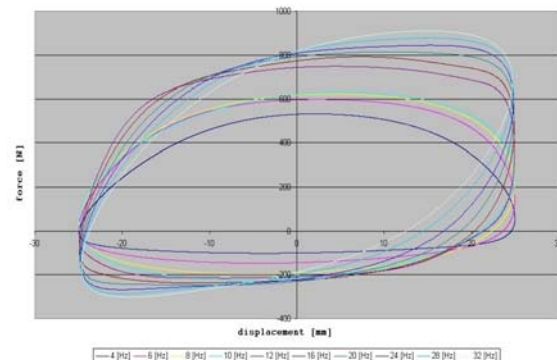


Fig. 5. Force versus displacement diagram for new shock absorber



Fig. 6 presents force versus displacement diagram for shock absorber with 50% volume of oil (10 different velocities for 50 mm stroke range). The results of oil leak are changes in form of closed loop presented on diagram. The forces are smaller than for new shock absorber because inside shock absorber emulsion is formed (combination of very small bubbles of gas in liquid). Because the volume of oil is smaller than nominal the shock absorber doesn't develop adequate dumping forces.

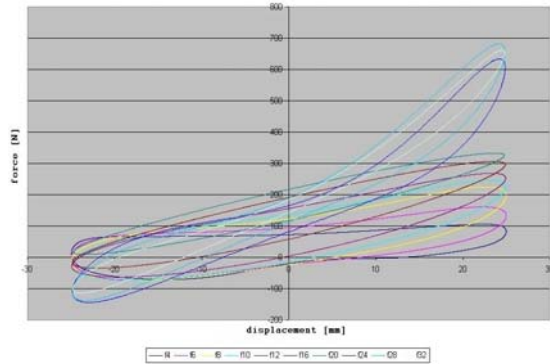


Fig. 6. Force versus displacement diagram for shock absorber with 50% volume of oil

Fig. 7 presents force versus velocity diagram for new shock absorber (10 different velocities for 50 mm stroke range). The forces for bound and rebound are nonsymmetrical and moments of opening the valve over defined velocity are visible (about 0,2 [m/s]).

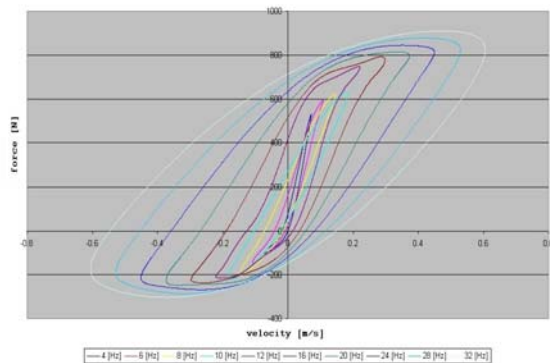


Fig. 7. Force versus velocity diagram for new shock absorber

Fig. 8 presents force versus velocity diagram for shock absorber with 50% volume of oil (10 different velocities for 50 mm stroke range). The results of oil leak are changes in form of closed loop presented on diagram. The moments of opening the valve over defined velocity are not visible.

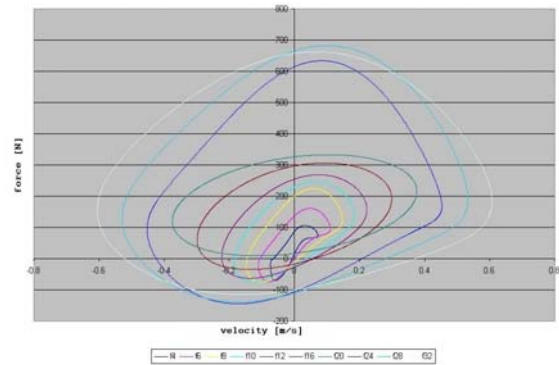


Fig. 8. Force versus velocity diagram for shock absorber with 50% volume of oil

Fig. 9 shows the dumping characteristics for shock absorber with oil leak and for the new ones.

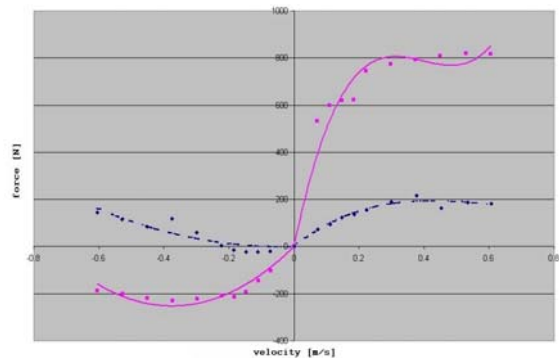


Fig. 9. Dumping characteristics for shock absorber with oil leak (dashed line) and for the new ones (continuous line)

The dumping forces for new shock absorber (continuous line) are nonsymmetrical (4 times greater for rebound) and nonlinear (over velocity 0,2 [m/s] the dumping forces are almost constant). The dumping forces for shock absorber with 50% volume of oil (dashed line) are small (about 4 times smaller for rebound and very small for bound). The shock absorber doesn't develop adequate dumping forces and actually doesn't dump.

## 5. SUMMARY

The dumping characteristic for new shock absorber is nonsymmetrical and nonlinear. For shock absorber with 50% volume of oil the dumping forces are very small so that shock absorber doesn't dump. The diagram determined of force versus displacement (fig. 6) for shock absorber with oil leak corresponds to diagrams showed in literature (fig. 4).

In this paper only results of basic researches are presented. The follow up of these researches sets up the determined diagrams of force versus displacement and force versus velocity for increases oil leak with small step. The result of this investigation can be used in simulation researches of vehicle suspension dynamic.

---

## 6. LITERATURE

- [1] Dixon J. C.: *The shock absorber handbook*. Society of Automotive Engineers, USA, 1999.
- [2] Gardulski J.: *Bezstanowiskowa metoda oceny stanu technicznego zawieszonych samochodów osobowych*. Radom, 2003.
- [3] Gardulski J.: *Simulation studies of mechanical system with non-linear parameters of the structure for operating construction needs*. Machine Dynamics Problems. Vol. 23, No 3, 1999.
- [4] Gardulski J., Warczek J.: *Moc tłumienia jako parametr diagnostyczny amortyzatorów samochodowych*. Diagnostyka 2003 nr 29, s. 69-72.
- [5] Konieczny Ł.: *Badania amortyzatorów hydraulicznych na zmodyfikowanym stanowisku indykatorowym*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z. 61 Wydawnictwo Politechnik Śląskiej, Gliwice 2007, s. 151-156.
- [6] Reipell J., Betzler J.: *Podwozia samochodów – podstawy konstrukcji*. WKiŁ Warszawa, 2001.
- [7] Sikorski J.: *Amortyzatory – budowa – badania – naprawa*. WKiŁ, Warszawa 1984.



**Lukasz KONIECZNY** is Ph.D. in Department of Automotive Vehicle Construction, Faculty of Transport, Silesian University of Technology. His research interests are: machinery diagnostic, digital analyse of signals, simulation researches of vehicle dynamic, hydropneumatic suspensions.



**Rafał BURDZIK** is Ph.D. in Department of Automotive Vehicle Construction, Faculty of Transport, Silesian University of Technology. His research interests are: machinery diagnostic, digital analyse of signals, logistics and forwarding.

## THE IMPLEMENTATION OF THE METHODOLOGY OF THE MACHINE'S STATE GENESIS

Joanna WILCZARSKA

Katedra Inżynierii Pojazdów i Transportu

Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, tel. 0523408267, [asiulazol@utp.edu.pl](mailto:asiulazol@utp.edu.pl)

### Summary

Presented in his work is the author's conception of implementing the methodology of machine state genesis in the form of a computer program 'State Genesis'. Separate modules of the program are described along with the results of their work.

Keywords: machine's state genesis, diagnostic parameters, technical state.

### IMPLEMENTACJA METODYKI GENEZOWANIA STANU MASZYN

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono koncepcję implementacji opracowanej przez autorkę metodyki genezowania stanu maszyn w postaci programu komputerowego „Genezowanie stanu”. Opisano poszczególne moduły programu komputerowego oraz wyniki ich działania.

Słowa kluczowe: genezowanie stanu maszyn, parametry diagnostyczne, stan techniczny.

## 1. INTRODUCTION

Implementation is part of a decision-making process, consisting in realizing a made decision by of properly chosen means [5], in this case it is creating a computer program based on genesis methodology [5]. The range of the implementation of machine state genesis methodology procedures was created on the basis of the machine state Genesis methodology algorithm, that is:

- a) examining the diagnostic parameters set in the aspect of determining the optimal set of diagnostic parameters for the genesis of diagnostic parameters values;
- b) examining the quality of genesis in the aspect of:
  - determining the genesis method according to the genesis mistake function,
  - examining the influence of the number of diagnostic parameters set on the genesis mistake.

The algorithm of machine state genesis process has four stages [5]:

### 1.1. Data acquisition

During data acquisition the following are obtained:

- a) set of diagnostic parameters values in the function of machine exploitation time  $\{y_j(\Theta_k)\}$ , obtained in the time of realization of the passive-active experiment where  $\Theta_k \in (\Theta_1, \Theta_b)$ ;
- b) set of diagnostic parameters values:  $\{y_j(\Theta_1)\}$  – nominal values,  $\{y_{jg}\}$  – boundary values,  $j=1, \dots, m$ ;
- c) set of machine states  $\{\Theta_k: \{s_i\}, k=1, \dots, K; i=1, \dots, I\}$  obtained in the time of realization of

the passive-active experiment where  $\Theta_k \in (\Theta_1, \Theta_b)$ ;

- d) diagnostic parameters cost  $c(y_j) = \text{const}$ .

### 1.2. Diagnostic parameters values set optimization

Diagnostic parameters set is derived with:

- a) correlation method of diagnostic parameters values with the machine state (with exploitation time,  $r_j = r(W, y_j)$ , ( $r_j = r((\Theta, y_j))$ );
- b) method of information quantity of diagnostic parameters on the machine state  $h_j$ ;
- c) diagnostic parameters set reduction.

### 1.3. State genesis – determining the cause of state $s_i(T_{LU})$ occurrence located during the realization of the test $T_{LU}$ :

1. Genesis of the diagnostic parameters set value  $\{y_j^*\}$ :

- a) with approximation method of diagnostic parameter  $y_j^*$  in the time range  $(\Theta_1, \Theta_b)$  along with the approximation mistake radius of the 'mistake channel'  $r_{j,a}$  with methods (mean-square method, trigonometric method);
- b) with interpolation of diagnostic parameter value  $y_j^*$  in the time range  $(\Theta_1, \Theta_b)$  along with the interpolation mistake radius of the 'mistake channel'  $r_{j,int}$  with methods (combined functions method);
- c) the choice of method according to the minimum value of interpolation or approximation mistake radius (adjustment mistake);

2. Analysis of the cause of the state  $s_i(T_{LU})$  occurrence:

- a) presentation of the set  $\{s_i(\Theta_k), i=1, \dots, 1; k=1, \dots, K\}$ ;
- b) estimation of the common point of 'mistake channel' determined by the mistake radius  $r^* = \max(r_{j,a}, r_{j,int})$  and the boundary value of the diagnostic parameter  $y_j^*$  at the moment  $\Theta_s \in (\Theta_1, \Theta_b)$ , which means that the cause of the occurred located state  $s_i$  was a 'momentary occurrence' of this state at the time  $(\Theta_1, \Theta_b)$ ;
- c) estimation of more common points of the 'mistake channel' determined by the mistake radius  $r^* = \max(r_{j,a}, r_{j,int})$  and the boundary value of the diagnostic parameter  $y_j^*$  at the moments  $\Theta_s \in (\Theta_1, \Theta_b)$ , which means that the cause of the located occurred state  $s_i$  was 'growing development' of the state  $s_i$  at the time  $(\Theta_1, \Theta_b)$ ;
- d) in case of absence of common points, estimation of the minimum distance between the 'mistake channel' and the boundary value at the moment  $\Theta_s \in (\Theta_1, \Theta_b)$ , which means that a probable cause of the located occurred state  $s_i$  was a 'momentary occurrence' of this state at the time  $(\Theta_1, \Theta_b)$ ;
- e) analysis of the elements of the states set  $\{s_i(\Theta_k), k=1, \dots, K\}$  and located by  $T_{LU}$  state  $s_i(\Theta_b)$  in order to determine the cause of its occurrence in the context of obtained 'common points' or the minimum distance of 'approximations';
- f) estimation of the disability state  $s_i(\Theta_b)$  through examining the dependence of circumstances of minimum distance occurrence  $d_{min}$  for the analyzed states  $s_i = \{s_i(\Theta_k)\}$  in the context of a momentary occurrence of the state  $s_i$  in the past, and the conditions of the state  $s_i$  occurrence (load, terrain conditions, climate conditions).

Based on the above ascertations and using the computer analysis results in machine diagnostics [1, 2, 3], tasks for implementation were formulated, that is:

1. Measurement data acquisition:
  - a) data input;
  - b) data import from other database systems or text files;
  - c) data edition;
  - d) saving the introduced data in the database;
2. Diagnostic parameters set optimization;
3. Machine state genesis:
  - a) determining the set of genesis methods;
  - b) calculating the genesis value of diagnostic parameters,
  - c) determining the genesis mistake,
  - d) determining the minimum values of the distance between the mistake range and the boundary value of the diagnostic parameter;
  - e) saving the genesis results in the database in order to perform comparative analyses;
4. Reporting and data visualization:
  - a) visualization of chosen rows In the form of linear and dot diagrams;
  - b) possibility to enlarge a chosen piece of the diagram;
  - c) possibility to move the contents of the diagram;
  - d) displaying the results of performed simulations in tabular form.

## 2. MODULES OF THE "STATE GENESIS" COMPUTER PROGRAM

As the result of the analysis of the above assignments, the following modules of the 'State Genesis' software were determined [5]:

- a) **Data Acquisition** (insertion, edition, saving, interpolation and approximation of initial data),
- b) **Diagnostic Parameters Optimization** (observation matrix, parameter-state relations, diagnostic parameters set reduction according to the 'ideal point' method);
- c) **State Genesis** (genesis value, genesis mistake, determining and examining the minimal values of the distance between the mistake range and parameter boundary value, examining the cause of located machine states);
- d) **Reporting** (grouping separate simulations in order to compare the results).

The created program works with Windows [4]. It was written by the author of this article in Java language with the use of Firebird 1.5 as database engine. Moreover, advanced components of the Swing packet for Java™ SE Runtime Environment 6 packet were used.

### *Data Acquisition*

The acquisition module consists of five folds:

- a) Machine Group,
- b) State List,
- c) Parameter List,
- d) Object List,
- e) Measurement List.

In the fold **Machine Group** we insert the name of a machine group and the unit operating for his group, NR\_GRUPY (Group No) is assigned automatically after approving changes with the button Zapisz Zmiany (Save Changes).

In the fold **State List** we can insert possible states for the chosen group of machines, NR\_LISTY\_STANÓW (State List No) is assigned automatically and is unrepeatable in the fold Lista Stanów (State List).

In the fold **Object List** and the fold **Parameter List**, we can insert possible object and parameter names for the chosen machine group (Fig. 3) with simultaneous possibility of their removal.

In the fold **Measurement List**, there is a possibility to insert diagnostic parameters for chosen objects, diagnostic parameters values can be keyed in (Nowy Wiersz (New Line) button) or inserted with the use of CSV file – after choosing, from the menu for Measurement List, the option 'load diagnostic parameters for one object'.

Summing up, the acquisition module allows to assign machines, systems or arrangements to machine groups, and to acquire diagnostic

parameters values and machine states for appropriate times (mileages). The possibility to redefine the number of diagnostic parameters of machine groups has been anticipated (boundary values changes, cost changes, name changes, etc., and deleting or adding another diagnostic parameter).

**Diagnostic Parameters Optimization**

In the module **Diagnostic Parameters Optimization** the calculation of criteria functions values and diagnostic parameters weights takes place on the basis of initial data for the chosen object, with the possibility to save it in a text file.

The set of diagnostic parameters is estimated with the use of:

- a) correlation method of diagnostic parameters values with the machine state;
- b) quantity method of diagnostic parameters information on the machine state  $h_j$ ;
- c) in order to choose the diagnostic parameters set, the weight values  $w_1$  are used.

As the criterion to choose the diagnostic parameter(s), the maximization of  $w_1$  weight values and chosen diagnostic parameters according to this criterion have been accepted. For each diagnostic parameter, the values of linear correlation coefficient and the indicator of information quantity are calculated.

**State Genesis**

In this module the following take place:

- estimation of diagnostic parameter genesis value and genesis mistake;
- estimation of the minimum distance between diagnostic parameter genesis value and its boundary value;
- examination of the influence of exploitation factors (parameter number, time row size) on state genesis;
- visualization and saving of approximation or interpolation functions for chosen parameters of the chosen object in the form of a drawing;
- calculation of ranges between diagnostic parameter genesis value and diagnostic parameter boundary value.

The estimation of diagnostic parameter genesis value and the determination of the cause of the incapacity state  $s_i$  at the moment of machine examination are estimated with the use of the algorithm presented above, i.e.:

1. Value genesis of the diagnostic parameters set  $\{y_j^*\}$ :

- with the use of approximation methods of diagnostic parameter values  $y_j^*$ ;
- with the use of interpolation methods of diagnostic parameter values  $y_j^*$ ;
- the choice of a method according to the minimum value of the radius of approximation or interpolation mistake  $e_G$ ;

2. The analysis of the cause of the state  $s_i(T_{LU})$  located during the realization of the diagnostic test  $T_{LU}$ , through the presentation of the set  $\{s_i(\Theta_k), i=1, \dots, 1; k=1, \dots, K\}$  in the range  $\Theta_K \in (\Theta_1, \Theta_b)$  and its analysis in order to:

- determine the common point of 'mistake channel' estimated by the mistake radius  $r_j^*$  and the boundary value of the diagnostic parameter  $y_j^*$  at the moment  $\Theta_S \in (\Theta_1, \Theta_b)$ ,  $d_{min}=0$  (Fig. 1, 2);
- determine a larger number of common points of 'mistake channel' (e.g. n – points) estimated by the mistake radius  $r_j^*$  and the boundary value of the diagnostic parameter  $y_j^*$  at moments  $\Theta_S \in (\Theta_1, \Theta_b)$ ,  $nd_{min}=0$  (Fig.2);
- determine the minimum distance of 'mistake channel' from the boundary value at the moment  $\Theta_S \in (\Theta_1, \Theta_b)$ ,  $d_{min}<0$  (Fig. 3);

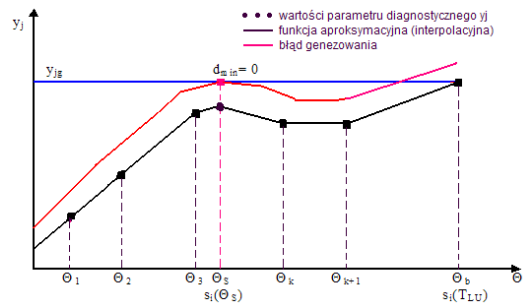


Fig. 1. Interpretation of machine state genesis for one common point ( $d_{min}=0$ )

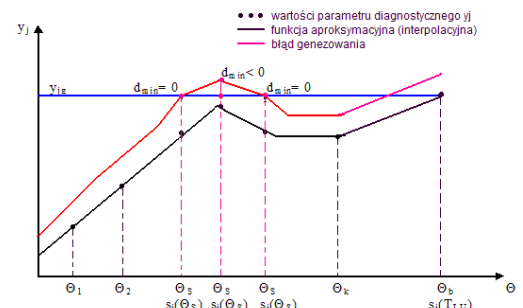


Fig. 2. Interpretation of machine state genesis for n common points ( $n(d_{min}=0)$ ) and for  $d_{min}<0$

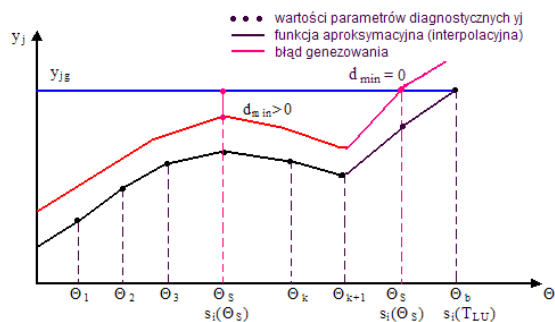


Fig. 3. Interpretation of machine state genesis for  $d_{min}>0$  and one common point ( $d_{min}=0$ )

- analyze the elements of state set  $\{s_i(\Theta_k), k=1, \dots, K\}$  and state set  $\{s_i(\Theta_S)\}$ , and the located state

$s_i(T_{LU})$  in order to determine the cause of its occurrence.

For each diagnostic parameter chosen in the module 'Diagnostic Parameters', estimated is the number of "approximations" of the approximated (interpolated) value of the diagnostic parameter with the calculated genesis mistake  $e_{Gj} = \max(r_{j,a}, r_{j,int})$  to the diagnostic parameter boundary value  $y_{jg}$  ( $d_{min}=0$ ,  $nd_{min}=0$ ,  $d_{min}>0$ ,  $d_{min}<0$ ). At the same time, the list of states  $\{s_i(\Theta_k)\}$  appears, which were determined in the module 'Data Acquisition'.

The analysis of the number of "approximations" (minimum values  $d_{min}$ ) and respective to them states  $s_i \in \{s_i(\Theta_k)\}$  and the conditions of their occurrence (load, terrain conditions, climate conditions, others) allows to determine the cause of the state  $s_i(T_{LU})$ , noticed at the moment of machine examination  $\Theta_b$ . It stems from the following assumptions:

- a) if we know the states  $s_i \in \{s_i(\Theta_k), \Theta_k \in (\Theta_1, \Theta_b)\}$  and the conditions of their occurrence, and a single common point of the 'mistake channel' ( $d_{min}=0$ ) at the moment  $\Theta_s$  are distinguished by the state  $s_i(\Theta_s)=s_i(T_{LU})$ , then the cause of the occurrence of the state  $s_i(T_{LU})$  were the circumstances and conditions estimated for the state  $s_i(\Theta_s)$  and "momentary occurrence" of the state at the time  $(\Theta_1, \Theta_b)$ ;
- b) if we know the states  $s_i \in \{s_i(\Theta_k), \Theta_k \in (\Theta_1, \Theta_b)\}$  and the conditions of their occurrence, and many common points of the 'mistake channel' ( $nd_{min}=0$ ,  $d_{min}<0$ ) at the moment  $\Theta_s$  are distinguished by the state  $s_i(\Theta_s)=s_i(T_{LU})$ , then the cause of the occurrence of  $s_i(T_{LU})$  were the circumstances and conditions estimated for the state  $s_i(\Theta_s)$  and "growing development" of this state at the time  $(\Theta_1, \Theta_b)$ ;
- c) if we know the states  $s_i \in \{s_i(\Theta_k), \Theta_k \in (\Theta_1, \Theta_b)\}$  and the conditions of their occurrence, and the minimum distance  $d_{min}>0$  (Fig. 4.10) At the moment  $\Theta_s$  is distinguished by the state  $s_i(\Theta_s)=s_i(T_{LU})$ , then the cause of the occurrence of  $s_i(T_{LU})$  were the circumstances and conditions estimated for the state  $s_i(\Theta_s)$  and "momentary incomplete occurrence" of this state at the time  $(\Theta_1, \Theta_b)$ ;
- d) if we do not know the states  $s_i \in \{s_i(\Theta_k), \Theta_k \in (\Theta_1, \Theta_b)\}$  and we know the conditions of the machine exploitation in the time range  $(\Theta_1, \Theta_b)$  and the value of the minimum distance  $d_{min} = (d_{min}=0 \vee d_{min}>0 \vee d_{min}<0)$  at the moment  $\Theta_s$  is approximate (with a mistake about 10%) to the value  $d_{min}(s_i(T_{LU}))$ , then it is possible to determine the cause of the occurrence of the state  $s_i(T_{LU})$ , as these will probably be the circumstances and conditions estimated for the moment  $\Theta_s$ ;
- e) if we do not know the states  $s_i \in \{s_i(\Theta_k), \Theta_k \in (\Theta_1, \Theta_b)\}$  and we do not know the conditions of the machine exploitation in the time range  $(\Theta_1, \Theta_b)$  and the value of the

minimum distance  $d_{min} = (d_{min}=0 \vee d_{min}>0 \vee d_{min}<0)$  at the moment  $\Theta_s$  is not approximate (with a mistake about 10%) to the value  $d_{min}(s_i(T_{LU}))$ , then it is not possible to determine the cause of the state occurrence  $s_i(T_{LU})$ .

The presented options of the state  $s_i(T_{LU})$  occurrence estimation are limited with accepting many conditions connected with the process of machine exploitation. The result is that it is necessary to verify them on the basis of examinations of chosen machine systems.

### Reporting

The following results of simulation researches of the genesis procedures of machine groups or machine object states are presented:

1. Optimal set of diagnostic parameters with the values of linear correlation coefficient  $r_j = r(\Theta_i, y_j)$ , the coefficient of the information capacity of the diagnostic parameter  $h_j$  and the weight  $w_{1j}$ ;
2. State Genesis. Data allowing to interpret and account for the cause of the located during the examination state  $s_i(T_{LU})$ : "Working time (mileage)", "Machine state", "Weight  $w_{1j}$ ", "Genesis mistake for the genesis method of diagnostic parameters values", "Description of approximations to (distances from) the diagnostic parameter boundary value" and "Minimum distance  $d_{min}$  with the graph of state genesis interpretation".

Reporting is done by grouping separate simulations in order to compare results, and by visualizing data through drawing chosen rows in the form of linear graphs. There is also the possibility to enlarge a chosen area of the graph and to present the performed simulations in tabular form.

### 3. CONCLUSIONS

The crucial original achievements of the 'State Genesis' computer program are the options:

- a) diagnostic parameters set examinations in the aspect of estimating the optimal set of diagnostic parameters for their value genesis;
- b) state genesis methodology researches:
  - estimating the genesis method according to the function of genesis mistake,
  - estimating the cause of the machine independence state  $s_i(T_{LU})$  on the basis of examining the distance between the diagnostic parameter genesis value with the genesis mistake and the diagnostic parameter boundary value, and estimating the minimum value  $d_{min}$  at the moment  $\Theta_s$ ,
  - analyzing the set elements of the state  $\{s_i(\Theta_s)\}$  and the state  $s_i(T_{LU})$  In order to determine the cause of its occurrence.

The created program was used to verify machine state genesis methodology, which is aimed



at confirming the soundness of their utilization for the estimation of the machine's disability cause located during the machine's examination.

#### LITERATURE

- [1] Calado J. M. F., Korbicz J., Patan K., Patton R. J., Sà da Costa J. M. G.: *Soft computing approaches to fault diagnosis for dynamic systems*. European Journal of Control, vol. 7, No.2–3, 2001, pp. 248–286.
- [2] Kiciński J.: *Analiza komputerowa w diagnostyce technicznej maszyn*, Kongres Diagnostyki Technicznej, tom I ZD SPE KBM PAN, Gdańsk 1996.
- [3] Korbicz J.: *Metody sztucznej inteligencji w diagnostyce maszyn*, Kongres Diagnostyki Technicznej, tom I ZD SPE KBM PAN, Gdańsk 1996.
- [4] Tylicki H., Wilczarska J. i inni: *Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego 4T07B03326 „Opracowanie metodyki optymalizacji procesu rozpoznawania stanu maszyn”*. UTP, Bydgoszcz 2007.
- [5] Wilczarska J.: *Genezowanie stanu technicznego w procesie eksploatacji maszyn*. Rozprawa doktorska. Bydgoszcz 2008.



Dr. Sc. **Joanna**

**WILCZARSKA** is a worker of the Chair of Vehicle and Transportation Engineering of the Mechanical Department of the University of Technology and Life Sciences in Bydgoszcz. Scientific interests: machine exploitation, technical diagnostics, machine state genesis, transportation.



## MODEL OF MACHINE STATE GENESIS

Joanna WILCZARSKA  
Katedra Inżynierii Pojazdów i Transportu  
Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, tel. 0523408267, [asiulazol@utp.edu.pl](mailto:asiulazol@utp.edu.pl)

### Summary

In this work presented is the machine technical state genesis model whose elements are diagnostic parameters values genesis in the past and the estimation of the cause of the machine's disability state determined during state evaluation.

Keywords: machine state genesis, diagnostic parameters, technical state, approximation, interpolation.

### MODEL GENEZOWANIA STANU MASZYN

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono model genezy stanu technicznego maszyny, którego elementami jest genezowanie wartości parametrów diagnostycznych w przeszłości oraz szacowanie przyczyny stanu niezdatności maszyny określonego podczas oceny stanu.

Słowa kluczowe: genezowanie stanu maszyn, parametry diagnostyczne, stan techniczny, aproksymacja, interpolacja.

## 1. INTRODUCTION

Machine technical state genesis consists in [5]:

- the determination (with incomplete or uncertain data of diagnostic parameters values) of the trend of diagnostic parameters values changes which characterizes the process of machine state aggravation in the past;
- the comparison of diagnostic parameters momentary values with boundary values;
- the estimation of the machine's technical state at a past time of machine's exploitation interesting for the user, e.g. in order to determine the cause of the machine's failure located at the moment of examination.

Global state of the machine, considering its change in time, is described by the dependence [6]:

$$G(X(\Theta), U(\Theta), Z(\Theta)) = Y(\Theta) \quad (1)$$

where:

$X(\Theta)$  – machine state features vector,

$U(\Theta)$  – forcing vector,

$Z(\Theta)$  – interference vector,

$Y(\Theta)$  – output vector containing signals used in diagnostics (damage-oriented diagnostic symptoms-signals), diagnostic parameters,

$G$  – global response function,

$\Theta$  - machine exploitation time.

The main way for the machine's utilitarian abilities loss recognition is a model which describes in a formalized way the time connections between the results of machine's diagnostic observations, and their relevance to criterial values describing the machine's genesis states. In the process of machine diagnosis, the base are usually sets of information

generated by the system monitoring the machine's state, i.e. spotted histories of value changes of the supervised diagnostic parameters (vector  $Y(\Theta)$ ). These sets, given in the form of the time row  $y_{\Theta}$ , are the realization of a certain aleatory process  $\zeta(\Theta)$  whose parameters depend on the aleatory forcing vector  $X(\Theta)$  forming the level of the researched process of machine wear (vector  $U(\Theta)$ ) and the aleatory interference noise (vector  $Z(\Theta)$ ) [6].

The effectiveness of the diagnostic parameters values determination both in the future (prognosis) and in the past (genesis), with the assumption of incomplete and unreliable (inaccurately or estimated with a certain mistake) their values at the time  $(\Theta_1, \Theta_b)$ , is the higher the longer the possessed time row  $y_{\Theta}$  is, and the simpler the mechanisms of its creation are. In diagnostic researches there is unfortunately a situation when time rows of the diagnostic observation are relatively short in relation to the needs connected with a correct identification of the systematic (determined) component creating the trend of the recognized phenomenon  $\mu(\Theta)$ , and contain a measurement mistake. Therefore, the basic problem in the analysis of time rows  $\{y_{\Theta}\}$  is examining the row of collected measurement results. This problem is most often aimed at distinguishing in the time row deterministic (regular) components described with the trend  $\mu(\Theta)$  and aleatory effects  $\eta(\Theta)$ , (e.g. loads, terrain conditions, climate conditions, operation quality, etc.). The trend in this matter is represented by a certain non-aleatory trend function  $\mu_p(\Theta)$  setting the general direction of the development and describing the general regularity of changes of the controlled phenomenon of machine wear process, and the aleatory component

$\eta(\Theta)$  determines the oscillations around the systematic component caused by different aleatorily repeated forcings affecting the machine [6].

The solution of the presented postulate can be presented as the following algorithm [4]:

1. Let the phenomenon of the machine's state aggravation be represented by the time row  $y_\Theta = \langle y_1, y_2, \dots, y_b \rangle$ , i.e. the set of discrete observations  $\{y_\Theta = \zeta(\Theta); \Theta = \Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_b\}$  of a certain aleatory process  $\zeta(\Theta)$ .

2. With the assumption that the mechanism of value changes of an aleatory process at the time  $\Theta \in (\Theta_1, \Theta_b)$  forms a trend  $\mu(\Theta)$  interfered by different aleatory effects  $\eta(\Theta)$ :

$$y_\Theta = \mu(\Theta) + \eta(\Theta) \quad (2)$$

where:

$\mu(\Theta)$  – characterizes a determined component of the time row  $y_\Theta$  describes the development tendency of the observed diagnostic parameter  $y(\Theta)$ ,

$\eta(\Theta)$  – characterizes declinations from the trend and expresses the effect of accidental factors (load, terrain conditions, climate conditions, service quality, others),

such estimation  $\{\mu_G(\Theta)\}$  is created for an unknown form of the trend  $\mu(\Theta)$  which would provide a proper accuracy of the genesis  $y_G(\Theta)$  for the machine's working time  $\Theta_G$ , where  $\Theta_G = \Theta_b - \tau_2$ .

3. The estimation of  $\mu_G(\Theta)$  determines the values of observed diagnostic parameters at the moment  $\Theta_G$ , and at the same time the possibility of machine's technical state genesis  $S(\Theta_G)$  on the basis of examining the admissible state of machine's exploitation  $S_{dop}$  at the moment  $\Theta_G$ .

4. The admissible technical state of the machine  $S_{dop}$  in the time range  $(\Theta_1, \Theta_b)$  is assigned by the value of time for which separate geneses  $\{y_{j,G}\}$  assigned in the subset  $\Omega^y \in \Omega$  of available realizations of observed parameters  $\{y_j(\Theta)\}$  and respective to them radiuses of the genesis mistake range  $\{r_{j,G}\}$  according to the accepted genesis method do not exceed the boundary values  $\{y_{j,g}\}$ .

$$r_G = q_{\gamma,K} \cdot \sigma_G \quad (3)$$

where:

$q_{\gamma,K}$  – constant parameter assigned from the Student's disintegration table for the required trust level  $\gamma$  and  $K-2$  of the freedom level number,

$\sigma_G$  – standard declination of the aleatory component of genesis mistake  $e_G$ ;

5. In case of the machine operation system, the required form of machine state genesis is the information whether at the time  $(\Theta_1, \Theta_b)$  the technical state was an admissible state  $S_{dop}$ , which allows to estimate the machine's state in the past and plausible determination of the cause of the disability state recognized at the moment of machine examination  $\Theta_b$ .

At present there are no utilitarian genesis methods of machine states which could be used in practice [1], hence considered was the possibility to use approximation methods (mean-square dot polynomial, trigonometric) and interpolation methods (polynomial, level-1 and level-3 combined functions) in the area of diagnostic parameters values genesis;

## 2. GENESIS OF DIAGNOSTIC PARAMETERS VALUES

The realization of the above presented algorithm is possible with the use of appropriate methods of assigning diagnostic parameters value for genesis (with the assumption of incomplete and uncertain history of their values at the time  $(\Theta_1, \Theta_b)$ ). This problem can be solved with the respective use, as stated on the basis of performed literature and introductory researches [2], of approximation method (mean-square dot polynomial) or interpolation (combined function method) [5].

### Approximation of diagnostic parameter values

Approximation is the approximation of the function  $Y(\Theta)$  called the approximated function with another function  $Y_a(\Theta)$  called the approximating function. Out of many approximation methods, on the basis of introductory researches [3], the following were chosen: mean-square dot polynomial approximation and trigonometric approximation.

#### Mean-square dot polynomial approximation

Given are time points  $\Theta_1, \dots, \Theta_i, \dots, \Theta_j, \dots, \Theta_b$  different in pairs, thus for  $i \neq j \Leftrightarrow \Theta_i \neq \Theta_j$  and given are the values of diagnostic parameters in these points  $y_1, \dots, y_i, \dots, y_b$ , where  $y = f(\Theta_i)$ ,  $i = 1, \dots, b$ . The aim of approximation is, therefore, to find the values of coefficients  $a_0, a_1, \dots, a_m$  of the polynomial  $Y_m(\Theta)$  of  $m$ -level so that the mean-square mistake is the smallest.

The aim of the mean-square dot approximation goes down to solving  $m+1$  equations of  $m+1$  unknowns.

#### Trigonometric approximation

Trigonometric approximation is utilized when the approximated function is a periodic function and the points of the time row  $Y = \{y_i(\Theta)\}$  coming from the observation of diagnostic parameter value changes are equally distant.

The idea of approximation, therefore, comes down to calculating the values of the polynomial coefficients.

#### Interpolation of diagnostic parameter value

Let us assume that given are the values of the function  $Y(\Theta)$  (diagnostic parameters values) in the set of time points  $\Theta_1, \dots, \Theta_k, \dots, \Theta_b$  called interpolation nodes. The task of the interpolation is to determine approximate values of the function

$Y(\Theta)$  called the interpolated function in points not being interpolation nodes. The interpolating function is a function of a certain class. Most often it will be an algebraic polynomial, trigonometric polynomial, rational function or combined function. Interpolation is most often used when we do not know the analytical form of the function  $Y(\Theta)$  (it is only tabled) or when its analytical form is too complicated. In the work, on the basis of initial researches, Lagrange's interpolation and interpolation with combined functions were used.

### Lagrange's Interpolation

Lagrange's interpolation idea is characterized by the requirement that the values of the interpolating function equal the values of the interpolated function in  $n+1$  points. Let us assume that we know several values of the function  $Y(\Theta)$  for several arguments  $\Theta_1, \dots, \Theta_k, \dots, \Theta_b$ , and we want to learn what the values for other arguments are. It is possible to perform thanks to interpolation functions. It is required that their graph runs through the interpolation nodes (discrete points whose coordinates we know)  $y(\Theta_1), \dots, y(\Theta_k), \dots, y(\Theta_b)$  and beyond them, that it as best as possible approximates the archetype.

In order to find the value of the function in every point of the domain, it is necessary, on the basis of the knowledge of several discrete values, to assign interpolation polynomial.

The estimation is to a great extent dependent on the displacement of arguments of discrete points  $\Theta_k$ .

### Interpolation with combined functions

In so-far dissertations the function was interpolated with one polynomial. Of course, if the number of nodes increases, the level of the interpolation polynomial rises as well, and it can occur that it will not be convergent with the interpolated function.

The problem of interpolation with combined functions requires that their graph goes through interpolation nodes (discrete points whose coordinates we know)  $y_1, \dots, y_i, \dots, y_b$ , and beyond them, that it as best as possible approximates the archetype with the help of appropriate functions in separate ranges.

Having calculated the coefficients of the polynomial, we can calculate the needed polynomial value, whilst interpolation mistake with combined functions is assigned according to the dependence:

The analysis of the above presented methods of estimating the genesis value of diagnostic parameters, and respective to them genesis mistakes, allows to state that in order to estimate the genesis value of diagnostic parameters on the basis of their uncertain and incomplete values from the time range  $(\Theta_1, \Theta_b)$ , it is necessary to use:

1. In the area of approximation methods:
  - a) mean-square dot polynomial approximation;
  - b) trigonometric approximation,
2. In the area of interpolation methods:
  - a) interpolation with combined functions of 1 and 3 level for the time range  $(\Theta_1, \Theta_b)$ .

The estimation of the diagnostic parameters values with the use of the above presented genesis methods allows to determine their genesis values  $\{y_{j,ini}(\Theta)\}$ , which allows to estimate the state of machines in the past.

### CONCLUSIONS

All the presented algorithms allow to assign optimal, as far as the accepted criterion is concerned, genesis values of diagnostic parameters in the time range  $(\Theta_1, \Theta_b)$ , whilst for the research the following were used:

- a) approximation method of diagnostic parameter value  $y_j^*$  (mean-square method, trigonometric method);
- b) interpolation method of diagnostic parameter value  $y_j^*$  (level-1 and -3 combined functions method);
- c) the choice of the method according to the maximum value of the radius of approximation or interpolation mistake (adjustment mistake).

In the following work, the author suggests the verification of the performed procedures of the state genesis methodology for machine systems of diversified wear process (e.g. aircrafts, mechanical vehicles and working machines).

### LITERATURE

- [1] Isermann R.: *Supervision, Fault-Detection and Fault-Diagnosis Methods - An Introduction*, Control Engineering Practice, vol. 5, No. 5, 1997, pp. 639-652.
- [2] Tylicki H., Żółtowska J.: *Badanie jakości diagnozy maszyn*. Diagnostyka, vol. 32. Olsztyn 2004, str. 63-70.
- [3] Tylicki H., Różycki J., Żółtowska J.: *Badanie jakości zbioru sygnałów diagnostycznych*. Diagnostyka, vol.32, Olsztyn 2004, str.57-62.
- [4] Tylicki H., Wilczarska J., Bartol-Smardzewska M.: *Metodyka diagnozowania stanu maszyn*. Wydawnictwo Oddziału PAN w Lublinie, 2005.
- [5] Wilczarska J.: *Genezowanie stanu technicznego w procesie eksploatacji maszyn*. Rozprawa doktorska. Bydgoszcz 2008.
- [6] Żółtowski B., Cempel C.: *Inżynieria diagnostyki maszyn*. Warszawa: Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Instytut Technologii Eksploatacji, 2004.





## DECISIONAL MODEL FOR AIRCRAFT SAFE SYSTEM

Sławomir AUGUSTYN

National Defence University, The Aviation and Air Defence Faculty  
ul. gen. A. Chruściela 103, 00-910 Warszawa

### Summary

This publication show issue of decision process for safety air activity connected with correct service and using of aircraft. Model-decisional loop is very good indication, which should be used by technical staff and pilots during aircraft maintenance and operation.

System constructed according to model of decision loop helps to select essential information and analyze current situation on aviation market, what allow on quick and efficient planning next technical activities.

Keywords: maintenance, operation, diagnostic, management project, aircraft safe system.

### MODEL DECYZYJNY DLA BEZPIECZEŃSTWA EKSPLOATACJI LOTNICZEJ

#### Streszczenie

W publikacji przedstawiono istotę procesu decyzyjnego dla bezpieczeństwa lotniczego oraz działalność związana z prawidłowym obsługiwaniem i użytkowaniem statków powietrznych.

Model-pętla decyzyjna stanowi bardzo dobry wskaźnik, jakim powinien się kierować personel lotniczy podczas eksploatacji statków powietrznych. Systemy konstruowane wg pętli decyzyjnej pomagają selekcjonować istotne informacje, analizować aktualną sytuację na rynku lotniczym, co pozwala na szybkie i skuteczne zaplanowanie racjonalnych, technicznych działań.

Słowa kluczowe: eksploatacja, diagnostyka, zarządzanie projektami, system bezpieczeństwa lotniczego.

## 1. INTRODUCTION

Decision process influences on aviation safety by activities connected to correct service and using of aircraft.

One of the manners of upgraded effect aircraft exploitation is make decision model by integration using spheres of modern science (technique, economy, psychology, medicine etc.). Model of decision loop give arise common correlation between humanistic science and technical.

This model influences on:

- flights safety,
- reliability,
- economics uses of aircraft.

Moreover air-companies are looking for possibility of introducing new approach decision system, which influences on development and enriching of knowledge technical staff and pilots by essential elements of different scientific disciplines.

## 2. ORGANIZATION USING KNOWLEDGE FOR NEEDS OF AIRCRAFT FLEET USER

Integrated user support is introducing new system which approaches to relating air-companies based on the integral support of user in regard of

successes all scope of modern science: technique, economy, psychology, medicine, philosophy etc. (fig. 1).

The idea concerning spheres of modern science for using in decision loop system of air-company is not well understood by technical staff.

That is why this problem must be explained by showing progress of not only technical but also humanistic sciences and their common correlation.

Currently present air-market is seeking of new methods and manners of solutions constantly pervading problems related to: material storages and products reception, transportation service testifying of people and commodities, repairs and services of air-equipment, utilization of devices and materials, instructions professional users, human supplies management, materials and technical devices etc.

Moreover, it also exists possibility of introducing to air-companies new logistic approach system and model of decision loop. They influence the quality of executed services during technology development and enriching of knowledge staff company. It is possible thinking to new integrated elements of different scientific disciplines.

Above all, the decision process influences correlation between low cost and flight safety.

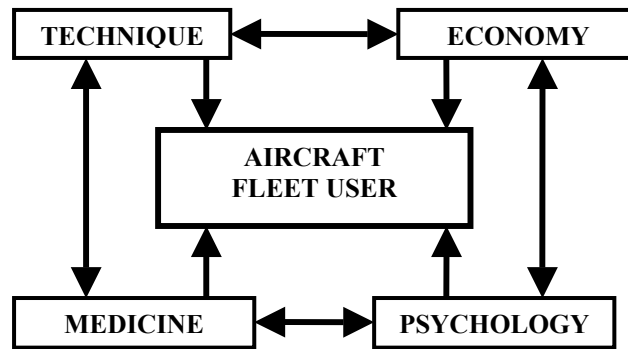


Fig. 1. Aircraft fleet user's development

### 3. DECISION PROCESS SUPPORT FOR NEEDS OF AIRCRAFT FLEET USER

Ability of air company to satisfy needs of air equipment users will demand simultaneous selection of suitable factors. The suitable factors make possible for integrated logistic support with regard to successes of present sciences.

Existing logistic system is an object of analysis and test in improvement area. Unfortunately, sometimes user experiences makes difficult in decision process. Presumably, it is the reason of lock receive satisfying successes.

The problem can be solved by logistic system analysis, it means by logical approach and basing on morphological method. Such approach did not be able fully dissolve of air companies problems.

Very often, it is difficult to achieve useful system during analysis of mental decision process.

That is why, the above problem refers to every system will be supporting by parallel service of users experiences..

Integrated logistic support should create transformation of knowledge for aviation companies (fig. 2). In this context, the knowledge with essential technical tools, should improve activity of air companies.

Furthermore economic analysis of air market by actual economy research, allows its penetrating qualification of situation in sphere of finance.

The fact above regards to skills, feasibilities, capacities and capabilities of rational acting for proper schedule of financial centre in order to improve working air companies.

Important element of this system is also prophylaxis of professional diseases of technical staff and pilots. It is important for different kind of measures to prevent bad workers accidents.

It has influence on efficiency and quality of air services.

Decision system with using measures of informative support (e.g.: computer simulations) permits to solve a lot of decision problems with consider action of high coefficient of risk related to aircraft safety.

Additionally, the examining interpersonal relation concerning mutual human dependence and personality relationships, allows to obtain important

innovative relating to needs of working air companies.

Taking into innovation for creating methods, there will be able to find system which influences on development of aviation companies.

The idea of logistic system for decision process gives development of air companies. It is held by organizational transformation of knowledge refers to efficient activities. It creates success of high production qualities and air equipment repairs with regard to optimization of costs and rules for safety of aircraft.

### 4. MODEL OF DECISION LOOP

Philosophy of decisional model offers the best technology relating to air equipment which already exists in production and operational on recent knowledge aviation program.

Constantly, knowledge and experience use in system design provide interpretation of technical staff and pilots behaviors.

Over all, model of decision loop allows:

- progressive involvement air-companies;
- contains of budgetary constraint and strategy choices;
- integration of equipment selected by technical staff and pilots;
- large growth potential;
- provide industrial expertise for real and no risk aviation program;
- federate training, maintenance and workmanship within air-companies in the future.

Above all this model will be able to make facility integration air business in common logistic process.

Keeping in mind safety of flights the model of decision loop is supporting activities of technical staff and pilots in exploitation process (fig. 3).

Moreover model of decision loop describes physical condition factors of technical staff and pilots in the aim to take the rapid decision for fulfill tasks.

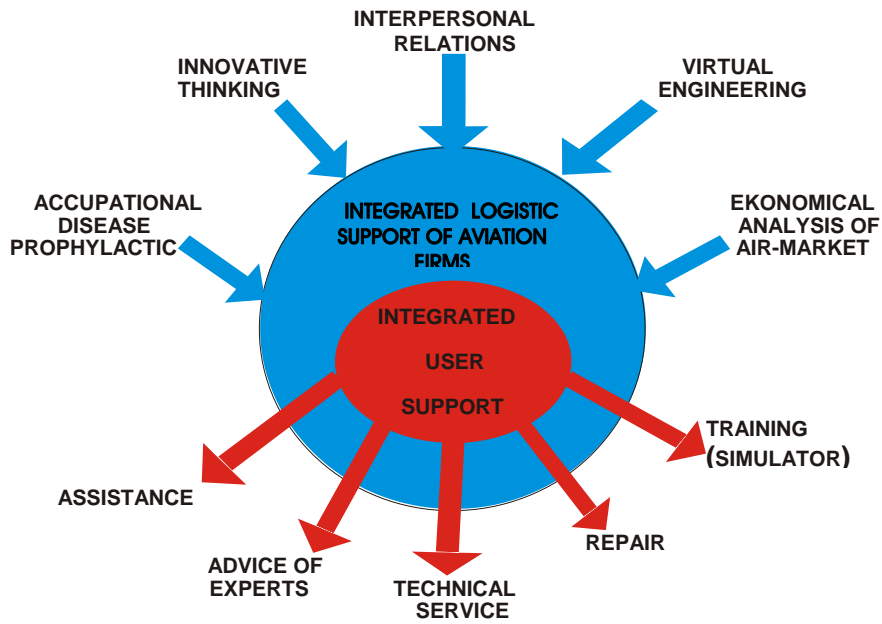


Fig. 2. Integrated logistic support

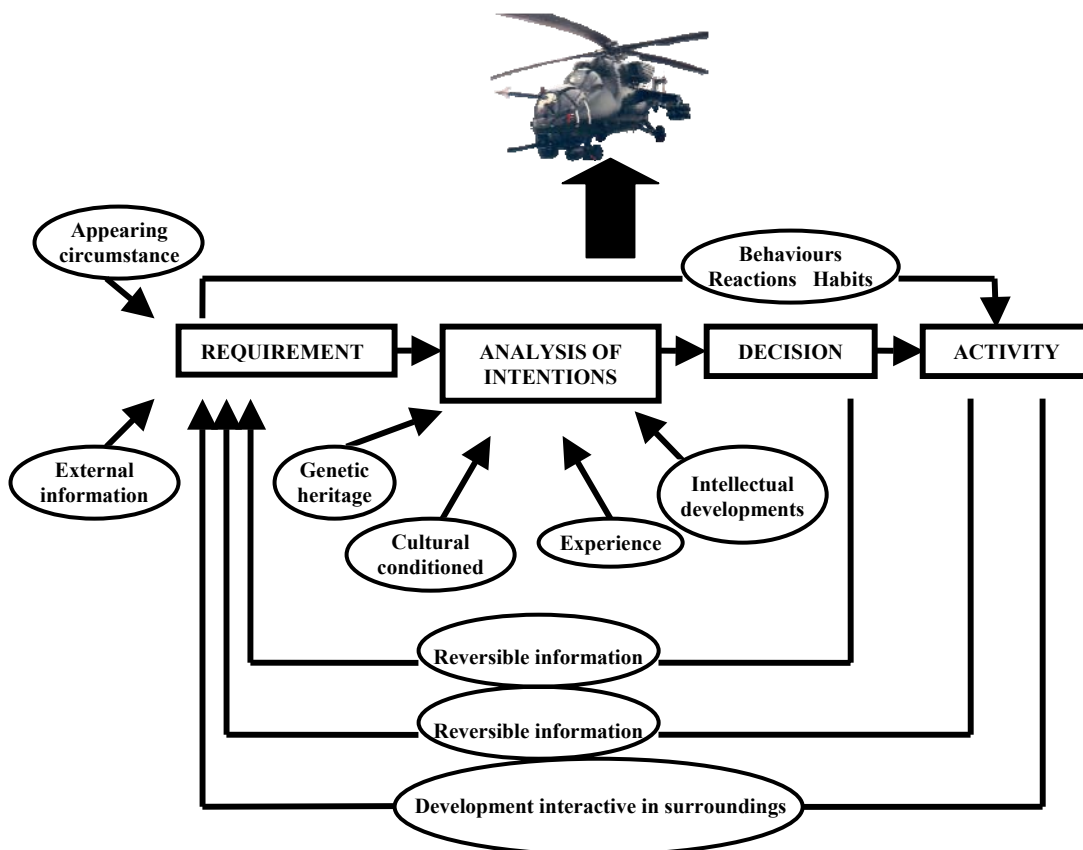


Fig. 3. Model of decision loop

All elements in this model relating to: requirements, analysis of intentions, decisions and activities operate simultaneously creating loops.

Requirements – collection of norms „condition”, which technical staff and pilots have to adapt oneself having on attention behaviours, reaction and habits on activity.

Analysis of intentions - inspection of correctness reasoning e.g. genetic heritage, cultural conditioned, experience and intellectual developments influence the plan of activity.

Decision - final decision of realization definite activities.

Group of activity - team of act undertaken by technical staff and pilots for successes of definite target.

Reversible information - return message about pronouncement of event, that is to say of decision and activities.

The requirements and analysis influence on decisions and activity. They should be formed by reversible information and other occurrences appearing in requirements area.

Moreover, decisional loop is mutually related process of forecasting ways of behavior in definite situation.

#### 4. CONCLUSION

Examination of obtained results from the model of decision loop should be notice that:

1. Achievements different scopes of modern science (technique, economy, psychology, medicine etc.) support requirements of user aircraft fleet.
2. New approach systematic related to model of decision loop influences on quality of executed service through development of technology and enriching of knowledge by staff of aviation firm.
3. Model of decision loop influences on low cost and relate to flight safety.

#### LITERATURE

- [1] Augustyn S.: *Diagnostic of waste surface of main helicopter X Conference – Diagnostics of machines working and of vehicles*, Bydgoszcz – Borówno 1999.
- [2] Augustyn S., Żółtowski B.: *Reliability exploitation of turbine air engines*. VIII International symposium. Engineering college Warsaw, Płock 2000.
- [3] Cempel C.: *Basics of vibroacoustics of diagnostics of machines*. WNT, Warsaw 1982.
- [4] Cempel C.: *Vibroacoustic of practical*. PWN, Warsaw 1989.
- [5] Cempel C.: *Models of diagnostic of vibroacoustic*. Konferencja, Bydgoszcz – Borówno, ATR, 1994.
- [6] Woropay M., Żurek J., Migdał K.: *Assessment and shape model of system maintenance movement operation readiness in transportation system*. Bydgoszcz- Radom 2003.
- [7] Lewitowicz J.: *Exploitation basic of Aircraft*. Warsaw ITWL 2006.
- [8] Żółtowski B., Szafranski J.: *Scientific problems young in area of build and of exploitation of machines*. Technical Academy of Technology and Agriculture, Bydgoszcz 1998.
- [9] Żółtowski B.: *Of conditioning of classification of states in diagnostics of machines*. Problems of exploitation, Radom - Krynica 1997.



**Slawomir AUGUSTYN** PhD, Eng. Specialisation: technical advise, engineering, management project and operation research. Several publication in field.

## **DIAGNOZOWANIE WYKRUSZENIA ZĘBA PRZEKŁADNI PRZY UŻYCIU DYSKRETNEGO ROZKŁADU FALKOWEGO**

Tomasz FIGLUS, Andrzej WILK

Katedra Budowy Pojazdów Samochodowych  
40-019 Katowice, ul. Krasińskiego 8, (32) 603 41 46,  
[tomasz.figlus@polsl.pl](mailto:tomasz.figlus@polsl.pl)

### Streszczenie

W pracy przedstawiono metodę diagnozowania wykruszenia koła zębatego przekładni opracowaną z pomocą dyskretnego analizy falkowej. Analiza ta umożliwia filtrację sygnału drganiowego i identyfikację lokalnych zmian energetycznych, które w niektórych przypadkach są symptomami wczesnych faz uszkodzeń kół. W badaniach analizowano sygnały drganiowe zarejestrowane podczas eksperymentów stanowiskowych. Na podstawie przeprowadzonych badań otrzymano wnioski o użyteczności prezentowanej metody w wykrywaniu lokalnego uszkodzenia koła zębatego.

Słowa kluczowe: dyskretna analiza falkowa, diagnostyka uszkodzeń przekładni zębatych.

### DIAGNOSIS OF TRANSMISSION TOOTH CHIPPING USING DISCRETE WAVELET TRANSFORMATION

#### Summary

This paper presents a method of tooth chipping transmission diagnosis worked out using a discrete wavelet transformation. The analysis makes it possible to filtrate vibration signal and identify local change of energy that is, in some cases, the symptom of early tooth damage. In the investigation there were analysed vibration signals, that were recorded during a standing experiment. The worked out experiment led to the conclusion about utility of the presented method in diagnosis of local tooth chipping.

Keywords: discrete wavelet transformation, diagnostics transmission damage.

## 1. WPROWADZENIE

Procesy zużyciowe oraz lokalne przeciążenia przekładni zębatych powodują powstawanie uszkodzeń zazębienia i łożyskowania. W diagnozowaniu przekładni zębatych zachodzi potrzeba wykrywania występujących uszkodzeń, już we wczesnych fazach ich powstawania. Wykrycie pierwszych symptomów rozwijającego się uszkodzenia umożliwia uniknięcie niespodziewanej awarii i ewentualnego postoju. W tym celu rozwijane są różne metody diagnostyczne, których podstawę stanowi pomiar i analiza drgań. Badaniami takimi zajmują się również autorzy publikacji.

Dzięki znacznemu rozwojowi aparatury do rejestracji i analizy drgań, można obecnie prowadzić pomiary zarówno metodami bezkontaktowymi, jak i stosowanymi od lat metodami tradycyjnymi z wykorzystaniem różnych typów przetworników [1, 2]. Poszerzenie zakresu pomiarów umożliwia analizowanie sygnału w pobliżu jego źródła [2], a zatem znaczącą eliminację czynników powodujących jego zakłócanie. Z drugiej strony znaczący rozwój komputerów osobistych umożliwia prowadzenie zaawansowanych analiz numerycznych. Wpłynęło to na znaczący rozwój metod analizy drgań, gdzie m.in. wykorzystuje się

zaawansowane filtracje sygnałów oraz ich rozkłady w dziedzinie czasu i częstotliwości [2, 3]. Stosując prezentowane techniki autorzy prac [2-7] przedstawili kilka metod wykrywania wczesnych symptomów uszkodzeń przekładni, również w złożonych ich przypadkach.

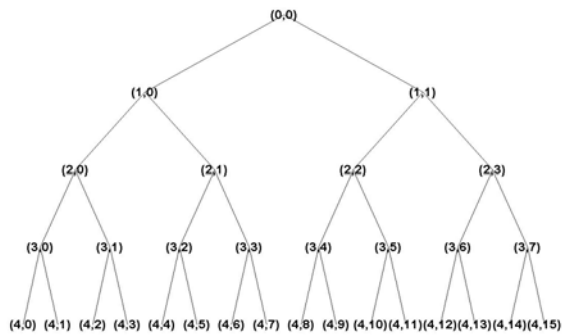
Zapewnienie wysokiej niezawodności pracy maszyn transportowych wymusza prowadzenie dalszych badań. Celem jest opracowanie jeszcze bardziej dokładnych i wrażliwych metod diagnozowania uszkodzeń przekładni. W pracy autorzy proponują zastosowanie filtracji sygnału opracowanej na podstawie dyskretnego przekształcenia falkowego oraz miar drganiowych.

## 2. DYSKRETNA TRANSFORMATA FALKOWA

Analiza falkowa jest narzędziem umożliwiającym identyfikację niestacjonarnych składowych sygnału wibroakustycznego w dziedzinie czasu i częstotliwości. Dyskretna transformata falkowa sygnału jednowymiarowego obliczana jest przy użyciu algorytmu Mallata [8, 9]. W procedurze tej rozwinięcie falkowe ma bezpośredni związek ze strukturą wielorozdzielczą sygnału i prowadzi do wyznaczenia algorytmu

dyskretnego, realizowanego przy użyciu wielostopniowego zespołu filtrów. W wyniku obliczeń otrzymuje się aproksymację sygnału  $f_n^{(i)}$ , będącą składową niskoczęstotliwościową oraz detal  $d_n^{(i)}$ , będący składową wysokoczęstotliwościową o dwukrotnie zredukowanych częstotliwościach próbkowania.

W procedurze dekompozycji rozkładowi poddawać można zarówno składowe niskoczęstotliwościowe, jak i składowe wysokoczęstotliwościowe, na różnych poziomach. Dzięki tym działaniom otrzymuje się drzewo dekompozycji zamieszczone na rysunku 1, które zawiera rozkład sygnału na wielu poziomach, zarówno na kolejne aproksymacje, jak i detale. Tak realizowany proces przetwarzania umożliwia wybór do dalszych analiz tylko wybranych jego składowych częstotliwościowych zawierających informacje o występującym uszkodzeniu.



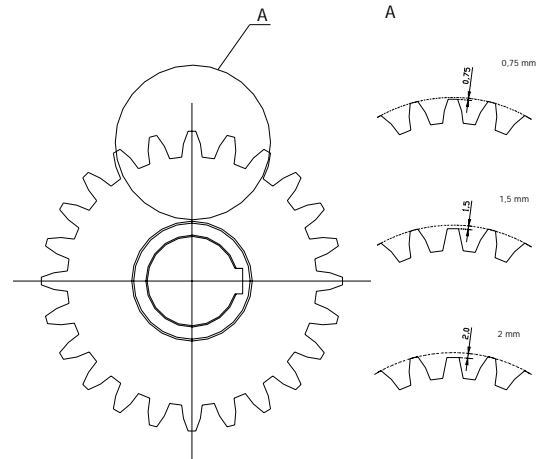
Rys. 1. Przykładowe drzewo dekompozycji falkowej sygnału wykonane na 4 poziomach rozkładu

Jak wynika z prowadzonych dotychczas badań (m.in. [4-7]) prawidłowa analiza sygnałów drganiowych jest znacznie utrudniona, gdy pomiary wykonuje się w różnych punktach przekładni. Wyselekcjonowane symptomy uszkodzeń kół zębatych występować mogą w różnych zakresach częstotliwości sygnału drganiowego.

W dalszej części pracy analizowano możliwość wykrywania wykruszenia zęba koła z zastosowaniem dyskretnego rozkładu falkowego oraz metody wyboru detali zawierających informacje o uszkodzeniu z stosowaniem dodatkowej miary drganiowej.

### 3. BADANIA STANOWISKOWE

Badania wykonano na stanowisku mocy krążącej FZG [2-4]. Podczas pomiarów rejestrowano prędkość drgań poprzecznych wału przekładni oraz przyspieszenie drgań korpusu. W przekładni badanej montowano koło z wykruszeniem wierzchołka jednego zęba, które zadawane było w sposób sztuczny zgodnie z zasadami eksperymentu czynnego. W kolejnych fazach eksperymentu zmniejszano wysokość głowy zęba poprzez zeszlifowanie odpowiedniej ilości materiału (Rys. 2).

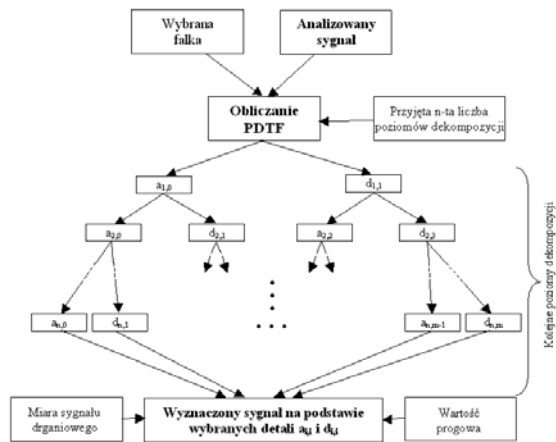


Rys. 2. Sposób wykruszenia zęba koła

Wpłynęło to na skrócenie odcinka przyporu współpracy uszkodzonej pary zębów oraz lokalne zmniejszenie współczynnika przyporu czołowego  $\epsilon_a$  od wartości 1,32 do wartości 0,93, w ostatniej fazie eksperymentu.

### 4. WYNIKI ANALIZY SYGNAŁÓW DRGANIOWYCH

Do analiz zaproponowano zastosowanie metody opracowanej z wykorzystaniem dyskretnego transformaty falkowej według algorytmu zamieszczonego na rys. 3.



Rys. 3. Metoda dekompozycji sygnału drganiowego

Analizę prowadzono dla rzeczywistego sygnału drganiowego przekładni, nie poddanego wcześniej filtracji i uśrednianiu synchronicznemu.

W metodzie tej wymagane jest podanie takich informacji, jak: rodzaj falki, liczbę poziomów dekompozycji, wartość progową, która warunkuje wybór detali do dalszych analiz oraz miarę sygnału drganiowego.

Sygnały drganiowe zrekonstruowane na ostatnim poziomie dekompozycji poddaje się analizie, stosując odpowiednią miarę sygnału drganiowego i wartość progową. Na ich podstawie do dalszych analiz wybiera się tylko te detale, które zawierają informację o występującym uszkodzeniu.

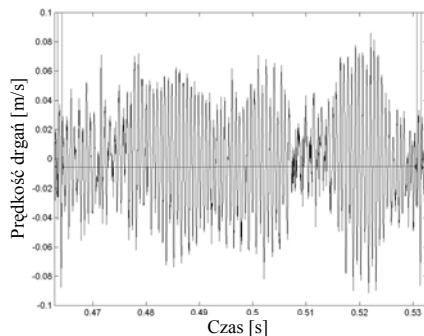


W przypadku analizy sygnału prędkości drgań poprzecznych wału przyjęto następujące założenia metody: falka - Daubechies 2, liczba poziomów dekompozycji - 7, wartość progowa  $pr.=6; 7; 8$ , miara sygnału drganiowego - współczynnik impulsowości  $I$  [10] wyznaczony na podstawie energii sygnału po dekompozycji.

Przyjęte w obliczeniach wartości progowe 6, 7 i 8 odpowiadały odpowiednio 48, 25 i 9 pasmom częstotliwości, na podstawie których zrekonstruowano sygnał zawierający informację o wykruszeniu zęba koła.

Na rysunku 4 zamieszczono przykładowy sygnał prędkości drgań poprzecznych wału przekładni zarejestrowany na stanowisku w przypadku, gdy w przekładni zamontowano koło z wykruszonym zębem o wartości 2 mm. Rysunek 4a prezentuje sygnał niepoddany dekompozycji, natomiast na rysunek 4b sygnał drganiowy po procesie rekonstrukcji (wartość progowa  $pr.=8$ ).

a)



b)

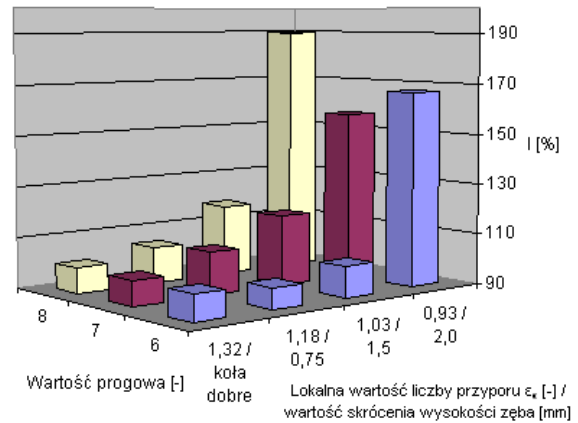


Rys. 4. Sygnał prędkości drgań poprzecznych wału przekładni:

a) rzeczywisty sygnał, b) sygnał po dekompozycji i rekonstrukcji (wartość progowa  $pr.=8$ )

Analiza otrzymanych przebiegów czasowych sygnału drganiowego wykazała, że w rozpatrywanym przypadku tylko przy wartości progowej 8 można w sygnale zrekonstruowanym jednoznacznie określić wzrost amplitudy, który towarzyszy zakresowi przyporu uszkodzonego zęba. Jako miarę zmian ilościowych sygnału drganiowego, spowodowanych uszkodzeniem, zastosowano współczynnik impulsowości  $I$ . Procentową zmianę miary wykruszenia zamieszczono na rys. 5. Otrzymane wyniki wykazały, że przyjęcie wartości progowej 8 cechuje się największą wrażliwością

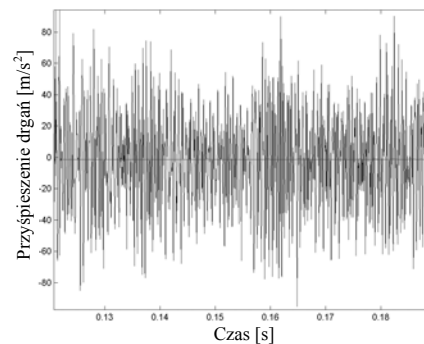
miary drganiowej na lokalną zmianę wartości przyporu.



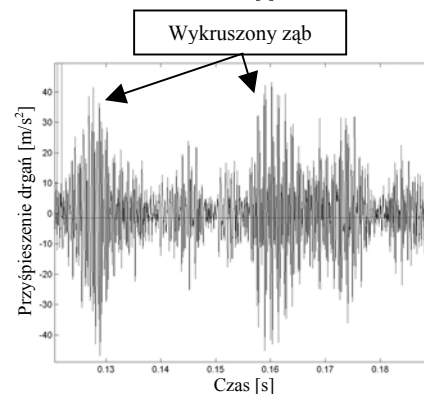
Rys. 5. Procentowa zmiana wartości miary

Analizowano także sygnał przyspieszenia drgań obudowy przekładni. Na podstawie badań wstępnych do analizy tego sygnału przyjęto falkę Daubechies 3, jako najbardziej wrażliwą na występujące uszkodzenie. Na rys. 6 zamieszczono sygnał przed filtracją i po filtracji, gdy w analizach założono wartość progową miary wynoszącą 5,5.

a)



b)



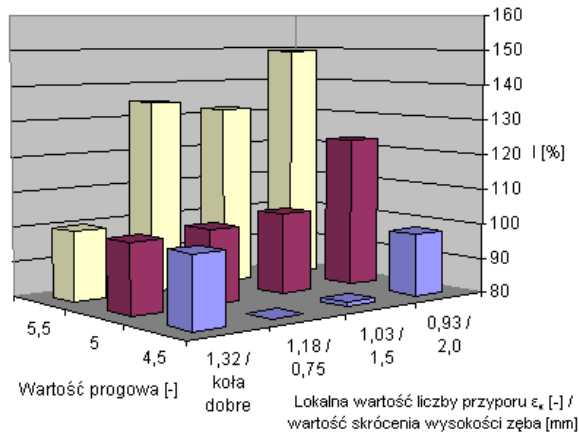
Rys. 6. Sygnał przyspieszenia drgań korpusu przekładni:

a) rzeczywisty sygnał, b) sygnał po dekompozycji i rekonstrukcji (wartość progowa  $pr.=5,5$ )

Wyznaczoną zmianę procentową miary drganiowej  $I$  zamieszczono na rys. 7.

Wyniki analizy wykazały, że w tym przypadku utrudnione jest diagnozowanie wykruszenia zęba. Przyjęcie niższej wartości progowej umożliwiło wyselekcjonowanie symptomów uszkodzenia zęba,

jednak otrzymany sygnał nie jest tak selektywny, jak w przypadku analizy prędkości drgań poprzecznych wału przekładni.



Rys. 7. Procentowa zmiana wartości miary

## 5. PODSUMOWANIE

Diagnostowanie napędów zębatych z zastosowaniem przekształcenia falkowego jest ciągle rozwijającą się dziedziną badań. Dzięki rozwojowi techniki komputerowej można obecnie poddawać analizom sygnały drganiowe zarówno wałów, jak i korpusu przekładni.

Przedstawione eksperymenty, w których analizie poddawano różne sygnały drganiowe wskazują, iż zmiany amplitudowe spowodowane uszkodzeniem zazębienia występują tylko w wybranych zakresach częstotliwości. Wyniki wykazały, że po odpowiednim doborze wrażliwych pasm częstotliwości, można wnioskować o wartości uszkodzenia przekładni. Ważnym argumentem przemawiającym za prezentowaną metodą jest możliwość ograniczenia dodatkowych pomiarów i obliczeń np. związanych z uśrednianiem synchronicznym.

Proponowana metoda wymaga dalszych prac, których celem jest zastosowanie jej do innych uszkodzeń przekładni zębatych.

## LITERATURA

1. Wilk A., Łazarz B., Madej H.: *Wibroakustyczne symptomy uszkodzeń kół i łożysk tocznych przekładni*. Biuletyn N-T OBRUM Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe, nr 1 (19), 2004, str. 63-75
2. Wilk A., Łazarz B., Madej H.: *Metody przetwarzania sygnałów drganiowych w diagnostowaniu przekładni zębatych*, Proc. 3<sup>rd</sup> International Congress of Technical Diagnostics, Diagnostics'2004, September 6-9, 2004, Poznań, Poland. Diagnostics vol. 30, t. 2, 2004, 183-186.
3. Łazarz B., Madej H., Wilk A., Figlus T., Wojnar G.: *Diagnostowanie złożonych przypadków uszkodzeń przekładni zębatych*. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu

Technologii Eksploatacji w Radomiu, Katowice-Radom 2006, stron 126

4. Figlus T., Wilk A.: *Diagnostowanie złożonych przypadków uszkodzeń przekładni zębatych w eksperymencie czynnym*. Mat. III Seminarium Degradacji Systemów, Warszawa 2003, Diagnostics vol. 31, 2004r. 67-72.
5. Figlus T., Wilk A.: *Application of discrete wavelet transformation of vibration signal in gearbox faults detection*, VI International Technical Systems Degradation Seminar, Liptowski Mikulasz 11÷14 April 2007.
6. Wilk A., Figlus T., Dąbrowski Z.: *Methods of detection of large tooth and rolling bearing defects in gears by the vibration processing*, First World Congress on Engineering Asset Management, Australia 2006,
7. Figlus T., Wilk A.: *Wykorzystanie ciągłej transformaty falkowej do diagnostowania stanu kół w obecności uszkodzeń łożysk tocznych przekładni*, Mat. XVIII Konferencja Naukowo-Techniczna Przekładnie Zębate, Węgierska Górka 18-20.10.2005r.
8. Mallat S.: *A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation*. IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence 1989; vol.11 s. 674-693.
9. Białasiewicz J. T.: *Falki i aproksymacje*. WNT Warszawa 2000.
10. Cempel Cz.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. PWN, Warszawa 1989.



Dr inż. **Tomasz FIGLUS** jest adiunktem w Katedrze Budowy Pojazdów Samochodowych Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej. Zajmuje się diagnostyką wibroakustyczną oraz badaniami wibroaktywności środków transportu



Prof. dr hab. inż. **Andrzej Wilk** jest Kierownikiem Katedry Budowy Pojazdów Samochodowych Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej oraz Członkiem Zarządu Towarzystwa Diagnostyki Technicznej. Zajmuje się diagnostowaniem napędów zębatych metodami wibroakustycznymi oraz badaniami dynamicznymi układów napędowych z przekładniami zębatymi.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2009 jako projekt badawczy

## DIAGNOZOWANIE METODĄ FAM-C PODPÓR ŁOŻYSKOWYCH LOTNICZEGO SILNIKA TURBINOWEGO

Andrzej GĘBURA, Tomasz TOKARSKI

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych,  
ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa 46, skr. Pocz. 96  
tel. 0-22-685 22 42 e-mail [andrzej.gebura@itwl.pl](mailto:andrzej.gebura@itwl.pl)

### Streszczenie

Metoda diagnostyczna FAM-C częstotliwości prądu przemiennego oraz metoda FDM-A [1, 2] bazująca na pomiarze modulacji częstotliwości składowej pulsacji, zostały opracowane w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych. Istotą ich dokładności jest „naturalne” zsynchronizowanie sygnału próbkującego z prędkością kątową obserwowanych ogniw kinematycznych – im szybsze procesy dynamiczne powstają w obserwowanym obiekcie, tym szybsze jest również próbkowanie. Jednocześnie wokół „punktu synchronizacji” powstają, na skutek istnienia luzów w układzie napędowych, naturalne względne wahania pomiędzy obserwowanym ogniwem kinematycznym a wirnikiem prądnicy – powstaje swoiste „zmodulowanie próbkowania” umożliwiające dodatkowe zwiększenie rozdzielczości i dokładności metody. Metody te umożliwiają określenie poziomu zużycia ściernego podzespołu oraz jego identyfikację podczas normalnej pracy zespołu napędowego. Diagnostyka przeprowadzona ww metodami umożliwia określenie licznych parametrów łożysk łożyskowych i węzłów łożyskowych oraz zespołu wirnikowego takich jak: poziom tarcia tocznego każdego z łożysk, płynność ruchu koszyka, wielkość luzów promieniowych. Metoda umożliwia wykrywanie rezonansów poszczególnych elementów poprzez obserwację kształtu i wysokości względnej zbiorów charakterystycznych, z których można wyznaczyć m.in. wielkość dobroci mechanicznej danego węzła. Ponadto określane są liczne parametry i zjawiska związane z zespołem wirnikowym jak określenie wielkości przekoszeń i niewspółosiowości wałów, poziom zużycia ciernego na styku koszyk – element toczny i inne.

Podstawową zaletą metody jest to, że układ diagnostyczny jest przyłączany do dowolnego miejsca (np. złącza elektrycznego) zasilanego napięciem stałym<sup>1</sup> lub przemiennym<sup>2</sup> z etatowego źródła energii elektrycznej diagnozowanego obiektu.

Przedstawiono materiał badawczy otrzymany z badań eksploatacyjnych zespołu lotniczego silnika turbinowego, w którym rolę „prądnicy – obserwatora” pełniła lotnicza prądnica prądu stałego oraz trójfazowa prądnica tachometryczna.

Słowa kluczowe: diagnostyka techniczna, diagnostowanie traktów przenoszenia napędu, skoszenie<sup>3</sup>, modulacja częstotliwości, zbiór charakterystyczny, silnik turbinowy, łożysko toczne.

### DIAGNOSIS BY FAM-C METHOD OF A SUPPORT'S BEARINGS TURBINE ENGINE

#### Summary

Diagnostic FDM-A method [2] based on a measurement of frequency modulation of a pulsation component as well as FAM-C method based on a measurement of a alternating current's frequency have been developed in Air Force Institute of Technology. As a diagnostic sensor an onboard generator (alternator) is used. The sensor is coupled with an investigated power unit. The generator or alternator is a converter of diagnostic signals into electric signal – accomplishes digital (discrete) conversion of signals contained in components of an angular velocity of a generator's or alternator's shaft. An original diagnostic signal is the angular velocity carrying diagnostic information about faults and failures of power unit's parts. Each part of the power unit is a specific vibration generator or modulator. An essence of their accuracy is “natural” synchronization of a sample signal with an angular velocity of an observed kinematics link – as quicker dynamic processes arise in an observed object, a sampling is also quicker. Simultaneously round about “synchronization point” arise, as a result of clearances in a drive, natural relative oscillation between the observed kinematics link and an alternator's rotor – arise characteristic “sample modulation” which provides an additional extension of a method's resolution and accuracy. These methods provide to define a level of a sub-assembly's abrasive wear and its localization during normal work of a power unit. It is possible to

<sup>1</sup> Metodę tę nazwano FDM-A (FM- modulacja częstotliwości, D - prąd stały, A - poziom zaawansowania metody)

<sup>2</sup> Metodę tę nazwano FAM-C (FM- modulacja częstotliwości, D - prąd przemienny C - poziom zaawansowania metody- oznacza, są stosowane aplikacje w postaci automatycznego testera)

<sup>3</sup> Zwane także przekoszeniem.

define numerous parameters of bearings and their kinematics pairs as well as a rotor assembly. They are: a level of a bearing rolling friction, smoothness of a bearing cage's motion, a quantity of a radial clearance. It also provides to detect resonances in elements as well as observe a shape and a relative height of characteristic patterns, from which it is possible to calculate, among others, a quantity of a mechanical quality factor of a kinematics pair – it is possible to define an operating time reserve of the kinematics pair to resonance. Numerous parameters and effects related to a rotor assembly are also defined. They are: a quantity of a skew of shafts, a level of a frictional wear on a bearing cage – rolling element contact, an ovalization of a bearing mounting and a quantity of a bearing journal's skew.

Keywords: technical diagnostic, diagnostic of power transmission, bevel, frequency modulation, characteristic pattern, turbine engine, rolling bearing.

## 1. WSTĘP

Silniki turbinowe, których prototypy pojawiły się już przed wojną, m. in. w Polsce, gdzie projektowano ich zastosowanie w okrętownictwie, zostały zastosowane przez Niemców pod koniec drugiej wojny światowej m. in. w samolocie myśliwskim Messersmith Me-262, czy też rozpoznawczo-bombowym Arado. Samoloty te wraz ze swymi nowatorskimi silnikami na stałe wpisały się do historii lotnictwa. Odznaczały się niezwykłą prostotą konstrukcji i olbrzymią siłą ciągu na jednostkę masy silnika. Jednakże pierwsze konstrukcje wniosły kolejne wyzwania m. in. co do łożyskowania tych szybkoobrotowych silników. Najważniejsze problemy z ich smarowaniem, chłodzeniem, wibracjami i ogólnym zużyciem. Szybko obracający się wirnik wytwarza tak dużą siłę odśrodkową w łożysku, że jeżeli osiągnęło ono, na skutek zużycia ściernego, znaczne luzy, to jego elementy toczne przestają być obciążane przy zwiększaniu prędkości obrotowej – nie obtaczają się po bieżni wewnętrznej łożyska. Jest to problem zupełnie odwrotny do tego, z jakim borykał się świat okresu „pary i elektryczności” XIX wieku – kiedy to konstruktorzy mieli kłopoty z przeciążaniem łożysk maszyn wirnikowych w obiektach naziemnych lub nawodnych i pojawianiem się w związku z tym różnego rodzaju pęknięć, zatarć i innych śladów zużycia na bieżniach łożyskowych. W silnikach turboodrzutowych występuje często niedociążenie<sup>4</sup> elementów tocznych łożysk, co powoduje zmniejszenie prędkości kątowej elementów tocznych. Teraz wystarczy nawet stosunkowo niewielki manewr statku powietrznego, żeby siły bezwładności oraz moment żyroskopowy spowodował krótkotrwałe dociążenie łożyska. Ponieważ elementy toczne (na skutek niedociążenia łożyska) wytraciły swoją prędkość obrotową

zostają w takiej sytuacji zmuszone do szybkiego przyspieszenia często ze znacznym poślizgiem. Często powtarzające się takie sytuacje mogą powodować szybkie zużycie ściernie poszczególnych elementów tocznych. Szczególnie narażony na siły dynamiczne jest koszyk łożyska - rys. 1.

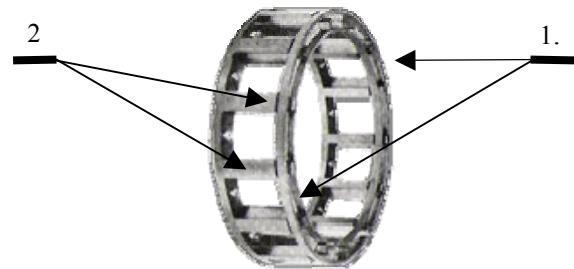


Fig. 1. View of investigated bearing cage of the turbine engine: 1 – rings of cage, 2 – separation elements

Zgodnie z tradycją konstrukcyjną ma on za zadanie rozdzielać elementy toczne, a więc nie jest przewidziany na przenoszenie znacznych sił. W przypadku ogólnego niedociążenia łożysk oraz ostrych zmian poziomu jego dociążania pojawia się „nietypowa” dla tradycji konstrukcyjnych sytuacja, gdy koszyk łożyska jest poddany siłom uderowym. Wynikające z niejednakowych warunków tarcia różnicowanie kinematyczne elementów tocznych powoduje powstawanie sił uderowych w zespole tocznym.

Tego typu zjawiska nietypowe dla wcześniejszych zastosowań łożysk tocznych, spowodowały, że wytwórnie i instytucje lotnicze prowadzą często szeroko zakrojone badania związane z poznaniem i monitorowaniem skomplikowanych procesów niszczenia łożysk tocznych w silnikach lotniczych. Problem ten istnieje do dziś i stanowi jedną z głównych trosk konstruktorów, operatorów i badaczy wypadków lotniczych. Badania takie prowadzone są także w Instytucie Technicznym

<sup>4</sup> niedociążenie łożysk wysokoobrotowych jest często definiowane jako utrata obtaczania się obwodu elementu tocznego po bieżni wewnętrznej łożyska.

Wojsk Lotniczych. Od pewnego czasu do diagnozowania podpór łożyskowych niektórych silników turbinowych wojskowych statków powietrznych stosowane są także metody FAM-C i FDM-A. Na dzień dzisiejszy możliwe jest śledzenie kolejnych etapów życia łożyska tocznego.

Śledzenie tych zjawisk było realizowane dotychczas głównie za pomocą metod wibroakustycznych, analiz składu opłowania w olejach smarnych i innych. Autorzy proponują metodę alternatywną, gdzie sygnał diagnostyczny z podpór łożyskowych jest przekazywany poprzez połączenia mechaniczne do prądnicy lotniczej, w której jest zamieniany na synchroniczny, cyfrowy sygnał łatwo obrabialny przez współczesne nam narzędzia techniki komputerowej. Metody te autorzy nazwali FAM-C oraz FDM-A. Sygnał diagnostyczny zakodowany w modulacji częstotliwości i fazy prędkości kątowej, która jest (jak od dawna wiadomo z teorii przesyłu fal radiowych) bardziej odporna na zakłócenia niż modulacja amplitudowa [1, 8]. Sygnał diagnostyczny podlega dwuetapowemu próbkowaniu:

- „próbkowaniu synchronicznemu” – przetworzeniu w cyfrowy sygnał (przebieg częstotliwości chwilowej) przez „etatową” prądnicę pokładową,
- „klasycznemu” próbkowaniu w dziedzinie czasu przez zegar karty licznikowej o odpowiednio dobranej częstotliwości.

Pełny opis metody diagnostycznej zawarto w [2-4, 6-7]. Warto jednak wymienić najważniejsze jej elementy niezbędne do zrozumienia kontekstu zagadnień poruszanych w niniejszym opracowaniu. Każdej wadzie montażowej lub zużyciowej, np. skoszeniu połączeń wielowypustowych skrzyń napędów towarzyszy zmodulowanie wyjściowej prędkości kątowej. Okres zmodulowań jest, parametrem charakterystycznym dla typu wady i kątowej prędkości znamionowej danej pary kinematycznej. Wartość dewiacji częstotliwości (amplituda zmodulowań) jest natomiast proporcjonalna do wielkości danej wady. Zmodulowania te przenoszone są, poprzez układ transmisji, do wirnika prądnicy. Prądnica lotnicza, będąca maszyną synchroniczną, odzwierciedla zmiany chwilowej prędkości kątowej w postaci modulacji częstotliwości napięcia wyjściowego. Mierząc przyrosty czasu pomiędzy kolejnymi przejściami przez poziom zerowy i odkładając podwojoną ich odwrotność na płaszczyźnie współrzędnych prostokątnych ( $t, f_i$ ), otrzymuje się zbiór odzwierciedlający, w sposób dyskretny,

przebieg zmian prędkości wirnika prądnicy. Dla każdego odchylenia można przyporządkować dwa parametry:

- czas odchylenia  $t_{odi}$ ,
- amplitudę odchylenia  $\Delta F$ .

Czas odchylenia można zastąpić częstotliwością procesu  $f_p$  zgodnie ze wzorem:

$$f_{pi}=1/(2t_{odi}) \quad (1)$$

Każde odchylenie może być przedstawione na płaszczyźnie współrzędnych prostokątnych w postaci punktów ( $f_p, \Delta F$ ). W czasie licznych prac badawczych stwierdzono, że punkty te mają tendencję do skupiania się w zbiory. Nazwano je zbiorami charakterystycznymi, gdyż charakteryzowały zużycie poszczególnych podzespołów. Stwierdzono, że mają różne kształty, wysokości i położenia względem osi odciętych. Stwierdzono również, że ze zmianą wielkości wady zmienia się wysokość danego zbioru  $\{\Delta F_{max}/+ \Delta F_{min}/\}$ , zaś pasmo zajmowane przez zbiór względem osi odciętych  $0-f_p$  było charakterystyczne dla danego typu podzespołu.

## 2. ZUŻYCIE ŁOŻYSKA - FAZA SZUMOWA

Zgodnie z literaturą z dziedziny diagnostyki łożysk tocznych istnieją trzy kolejne etapy (fazy) zużycia łożysk [5]: szumowy, wibracyjny, termiczny. Pierwsza z nich została nazwana w tradycji diagnostyki łożysk, gdyż w pierwszych eksperymentach diagnostycznych z użyciem stetoskopu słyszano dźwięk przypominający do złudzenia szum morza.

Już na początku, po remoncie lub wyprodukowaniu danego silnika metody: FAM-C i FDM-A umożliwiają wykrycie wad montażu łożysk.

Już na początku, **po remoncie** lub wyprodukowaniu danego silnika, metody FAM-C i FDM-A umożliwiają wykrycie wad montażu łożysk. Ogólnie biorąc, po remoncie **opory tarcia tocznego** podpór łożyskowych są bardzo niskie, stąd też wysokość zbiorów charakterystycznych kanału prądu stałego poszczególnych łożysk osiągają niewielkie wartości (wartość średnia od 5% do 30%, wartości maksimum dla poszczególnych prędkości obrotowych od 20% do 40%<sup>5</sup>) – podczas gdy po długotrwałej eksploatacji silniki ze skorodowanymi lub pełnymi opiłków łożyskami osiągają o całe rzędy większe wartości (silniki bliskie zatarcia osiągały poziom około  $A=1800\%$ ). Istotne jest obserwowanie relacji

<sup>5</sup> Jest to odniesienie do poziomów „wzorcowego” zużycia (dla każdego łożyska indywidualnie) określonego doświadczalnie podczas prób na hamowni, przy którym silnik pracował poprawnie.



wysokości zbiorów dla kolejnych prędkości znamionowych.

Poprawnie zmontowany silnik powinien mieć opory tarcia zmniejszające się ze wzrostem prędkości obrotowej – tj. zmniejszające się wysokości zbiorów charakterystycznych - rys. 2.

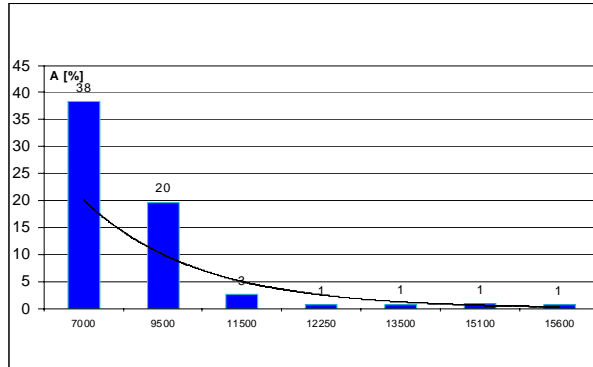


Fig. 2 High of characteristic patterns of direct current channel for correctly mounted bearing different rotational speed of the main shaft

Jest to uzasadnione zwiększaniem się wraz ze wzrostem prędkości obrotowej sił hydrodynamicznych (oddziaływanie filmu olejowego) zmniejszających opory łożyska. Jednakże na skutek wielu złożonych błędów montażu silnika lotniczego (niewspółosiowość podpór łożyskowych, przekoszenie łożyska względem osi wału, zbyt małych luzów promieniowych np. na skutek zbyt silnego wcisku łożyska na czop) charakterystyka ta często odbiega od opisanej powyżej. Niekiedy przybiera ona zależności wręcz odwrotne – opory tarcia rosną ze wzrostem prędkości obrotowej wału głównego - rys. 3.

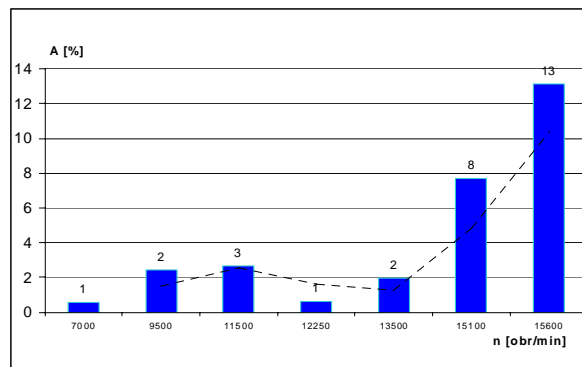


Fig. 3. High of characteristic patterns of direct current channel for incorrectly mounted bearing and different rotational speed of the main shaft

Jak pokazała praktyka eksploatacyjna takie zobrazowanie wiązało się ze znacznym skróceniem eksploatacji łożyska do około 15 godzin pracy – następowało nadmierne zużycie bieżni wewnętrznej i elementów tocznych oraz intensywne zwiększanie luzów obwodowych pomiędzy elementami

tocznymi a koszykiem, zakończone pęknięciem koszyka.

**Wielkość luzów obwodowych pomiędzy elementami tocznymi a elementami separującymi koszyka** jest łatwo określana za pomocą pomiaru pulsacji całkowitej trójfazowej prądnicy tachometrycznej (tor AC) – wielkość luzu jest wprost proporcjonalna do wielkości pulsacji. W całej populacji badanych silników poprawnie zmontowane i eksploatowane łożyska nie miały pulsacji większej niż 10%, zaś nowe łożyska zaledwie kilka procent. Na rys 4 i 5 można zauważyć rozwój luzów dla niepoprawnie zamontowanego łożyska już po 5 godzinach eksploatacji – wartość pulsacji zmieniła się wyraźnie z poziomu 7,5% do poziomu 11,5%. Spotykane łożyska o ekstremalnie zwiększonych luzach obwodowych (pomiędzy oknami separatora a elementami tocznymi) osiągały poziom do 160% - towarzyszyła temu destrukcja koszyka, tj. przerwanie elementów separujących i pęknięcie jego obwodu.

Od pierwszych godzin eksploatacji można zaobserwować **zwiększanie oporów toczenia** na skutek procesów ścierania m. in. złuszczenia warstwy galwanicznej z koszyka – w metodzie FDM-A objawia się to w postaci zwiększenia wysokości zbiorów charakterystycznych.

Zużycie ściernie, zgodnie z [5] powstaje, jeżeli materiał bardziej miękki jest poddany bruzdowaniu przez chropowate powierzchnie materiału twardego lub przez luźne, swobodne twarde cząstki. Wówczas w pewnych miejscach ustaje toczenie się elementu tocznego po bieżni łożyska i dominuje tarcie ślizgowe. Droga poślizgu może być precyzyjnie obserwowana za pomocą metody FDM-A poprzez obserwację zmian tzw. współczynnika toczenia  $p_s$ . Jest on obliczany z ilorazu wartości górnej częstotliwości pasma zbioru charakterystycznego dla danego łożyska do częstotliwości  $N$  - jej harmonicznej prędkości znamionowej wału głównego:

$$p_s = f_{gi} / N_i \cdot n_N \quad (2)$$

gdzie:  $n_N$  – znamionowa (zadana) prędkość obrotowa wału głównego,  $N_i$  – liczba elementów tocznych łożyska nr „i”;  $f_{gi}$  – górna częstotliwość pasma zbioru charakterystycznego łożyska nr „i”.



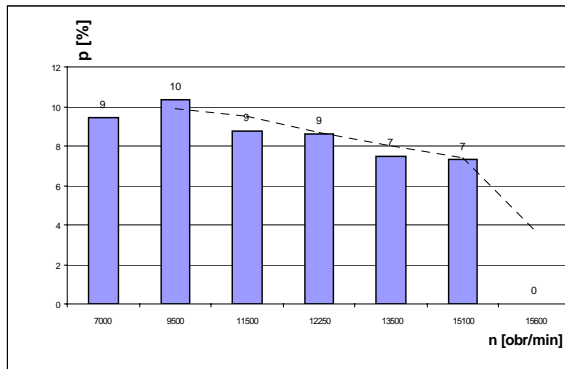


Fig. 4. Relative value of pulsation of alternating current channel for incorretly mounted during maintenance bearing and different rotational speed of the main shaft ( $\Theta = 0$ )

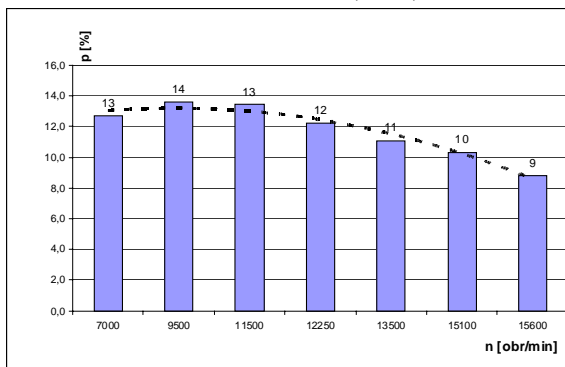


Fig. 5. Relative value of pulsation of alternating current channel for incorretly mounted bearing and different rotational speed of the main shaft for  $\Theta = 5$  hours

Jak wiadomo, w zależności od relacji geometrycznych pomiędzy średnicami bieżni i elementów tocznych, gdy brak jest poślizgów, to relacje pomiędzy prędkością ruchu osi obrotu elementów tocznych a bieżnią ruchomą, są w ścisłych relacjach geometrycznych, które można ująć wzorem na wartość znamionowa współczynnika toczenia ( $p_{sN}$ ) [7]:

$$p_{sN} = D_w / (2(D_w + 2d_k)) \quad (3)$$

gdzie:  $D_w$  – średnica bieżni wewnętrznej,  $d_k$  – średnica elementu tocznego łożyska.

Wówczas to koszyk łożyska będzie obracał się z prędkością obrotową  $n_k$ :

$$n_k = n_N \cdot p_{sN} \quad (4)$$

Wszelkie odchylenia od tej wartości świadczą o istotnych zjawiskach zachodzących w procesie toczenia się elementów tocznych po bieżni wewnętrznej jak również o płynności przemieszczania się koszyka łożyska. W zależności od wartości współczynnika toczenia można wnioskować, że:

- $p_s = p_{sN}$  - toczenie jest idealne tzn. bez poślizgów. Elementy toczne mają cały czas

kontakt cierny z bieżnią wewnętrzną a koszyk łożyska obraca się płynnie;

- $p_s > p_{sN}$  - toczenie elementów tocznych po bieżni jest utrudnione z poślizgami. Elementy toczne mają cały czas kontakt cierny z bieżnią wewnętrzną, lecz koszyk łożyska nie obraca się płynnie;
- $p_s = 1$  - toczenie nie istnieje – elementy toczne są zablokowane, a łożysko toczne zamienia się w łożysko ślizgowe. Elementy toczne mają cały czas kontakt cierny z bieżnią wewnętrzną, a koszyk łożyska obraca się z prędkością kątową czopa;
- $p_s < p_{sN}$  - elementy toczne nie mają cały czas kontaktu ciernego z bieżnią wewnętrzną (np. z powodu zmniejszenia średnicy elementów), a koszyk łożyska nie obraca się płynnie.

Obserwacja zmian charakterystyki współczynnika toczenia w funkcji prędkości obrotowej wału głównego może dostarczyć wielu cennych informacji diagnostycznych o stanie poszczególnych łożysk, jak również o ich wzajemnej współosiowości. Przy niewspółosiowości łożysk pojawia się ujemne ekstremum (rys. 6).

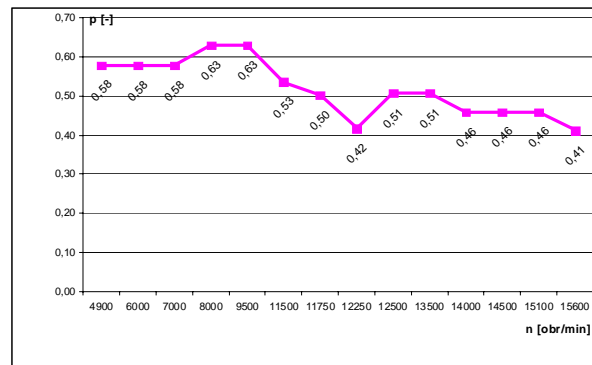


Fig. 6. Diagram of changes of rolling coefficient versus rotational speed of the main shaft

Zazwyczaj nowe łożyska mają charakterystykę  $p_s = f(n)$  liniowo opadającą – tj. odwrotnie proporcjonalną do prędkości obrotowej. W miarę wzrostu luzów łożyskowych wartość średnia  $p_s$  (średnia ze wszystkich prędkości obrotowych) maleje.

### 3. ZUŻYCIE ŁOŻYSKA - FAZA WIBRACYJNA

Wraz z intensyfikacją zużycia ściernego pojawiają się coraz większe luzy promieniowe łożyska – można je obserwować, analizując zmiany wysokości pierwszej harmonicznej kanału prądniczy prądu przemiennego (metoda FAM-C). W ten sposób obserwowane są zjawiska łączne –

maksymalny luz dynamiczny z uwzględnieniem mimośrodowego przesunięcia łożyska i oddziaływania siły odśrodkowej i innych sił dynamicznych (np. zjawisk żyroskopowych).

Bardzo ważne w czasie eksploatacji zespołu wirnikowego silnika lotniczego jest śledzenie rozwoju wady przekoszenia. Można łatwo obserwować wielkość tej wady za pomocą metody FAM-C – wartość kąta przekoszenia jest wprost proporcjonalna do pierwszej podharmonicznej prędkości wału głównego. Jeżeli w czasie eksploatacji obserwuje się wzrost przekoszenia a jednocześnie nie następuje proporcjonalne zwiększenie luzu promieniowego, to należy się liczyć ze wzrostem momentu gnącego działającego na czop.

W fazie wibracyjnej stwierdzono kilkakrotnie podczas demontażu opadnięcie koszyka na bieżnię wewnętrzną. Jest to możliwe przy nadmiernym zwiększeniu luzów na styku element separujący koszyka – element toczny. W czasie eksploatacji takiego silnika (przed demontażem) obserwowano na charakterystyce toczenia  $p_s = f(n)$  dodatnie ekstremum, tj. swoisty „garb” charakterystyki (rys. 6). Na bieżni wewnętrznej takiego łożyska można zauważyć ślady współpracy ciernej z pierścieniem spinającym koszyka.

W fazie wibracyjnej następuje systematyczne zmniejszenie oporów tarcia, co powoduje systematyczne zmniejszanie wysokości zbiorów charakterystycznych poszczególnych łożysk – odwrotnie niż dla fazy szumowej, gdzie następował wzrost oporów ze zwiększaniem czasu pracy łożyska. Niezależnie od tego obserwuje się zwiększenie luzów promieniowych i obwodowych – zwiększa się wyraźnie wartość pulsacji całkowitej na przebiegach częstotliwości chwilowej  $f_i = f(t)$  w kanale prądu przemiennego.

#### 4. ZUŻYCIE ŁOŻYSKA - FAZA TERMICZNA

W fazie termicznej opory tarcia tocznego obserwowane metodą FDM-A zaczynają się powoli zwiększać. Objawia się to w postaci zwiększania wysokości zbiorów charakterystycznych poszczególnych łożysk  $\Delta F = f(f_p)$  - rys. 7, rys. 8.

Na charakterystykach toczenia  $p_s = f(n)$  można zauważyć oprócz omówionego wcześniej charakterystycznego ekstremum ujemnego (kształt „siodła”), także ekstremum dodatnie, które to świadczy o bezpośrednim kontakcie koszyka z bieżnią wewnętrzną łożyska (rys. 6 –  $n=8000$ obr/min). Obserwacje łożysk w fazie termicznej wykazały, że z taką charakterystyką wiąże się **zjawiska rezonansu**. Objawiają się one

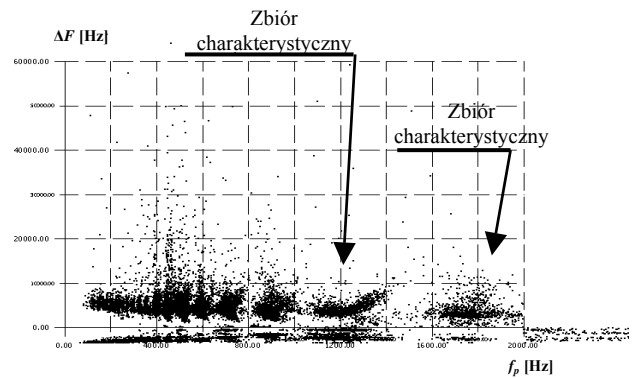


Fig. 7. Characteristic patterns  $\Delta F_i = f(f_p)$  for the generator on bearing supports without resonance

w formie zwiększonej względnej wysokości zbioru charakterystycznego (iloraz wysokości bezwzględnej zbioru charakterystycznego do szerokości pasma tego zbioru) dla danego łożyska. Łatwo można też wyznaczyć dobroć mechaniczną  $Q$  danego łożyska. Zgodnie z literaturą i doświadczeniami autora, przy  $Q > 10$  [1, 5] łożysko jest zagrożone i należy je wymienić. Początkowo w rezonans wpadają pojedyncze elementy podpór łożyskowych, następnie, w miarę rozwoju zużycia, może dojść do rezonansu ogólnego całego zespołu wirnikowego. Znamienne jest, że rezonansom takim towarzyszy rozpad zbiorów charakterystycznych – następuje ich podział i odseparowanie w pionie i w poziomie (rys. 8).

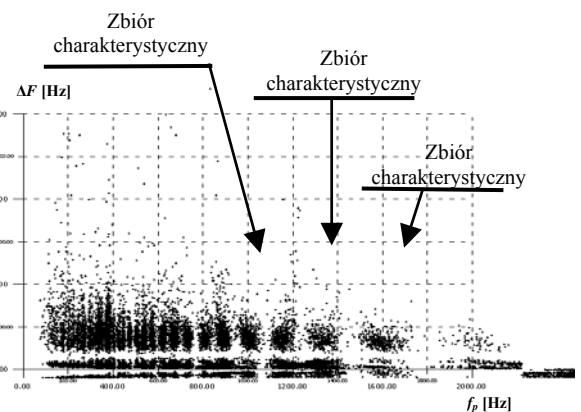


Fig. 8. Resonance impression on outside race of the rolling bearing

W warunkach rezonansu występują znaczne promieniowe siły uderowe pomiędzy elementami tocznymi a bieżniami – powstają charakterystyczne wgłębienia na bieżniach (rys. 9), które w trakcie dalszej eksploatacji, stają się swoistymi „basenami przyciągania” [9] energii uderowej. Ponadto

występują siły uderowe elementów tocznych o okna koszyka.



Fig. 9. Resonance impression on outside race of the rolling bearing

Wynikające z niejednakowych warunków tarcia zróżnicowanie kinematyczne elementów tocznych powoduje powstawanie sił uderowych w zespole tocznym. Energia wprowadzona do koszyka w czasie zderzenia z elementem tocznym powoduje zmianę jego pędu w kierunku obwodowym i promieniowym, a częściowo jest tracona na dodatkowy poślizg elementów tocznych po bieżniach. W wyniku sił uderowych koszyk zaczyna oscylovac w sposób nietlumiony pomiędzy elementami tocznymi. Wiruje on też na ogół wokół innej osi niż oś łożyska [5]. Wykonane demontaże silników turbinowych w kolejnych stadiach eksploatacyjnych udowodniły, że rezonanse węzłów łożyskowych powodują szybką destrukcję łożysk, a w szczególności koszyka łożyska tocznego. Już w pierwszych godzinach pracy w warunkach rezonansu mogą się pojawić na elementach separujących nawisy materiałowe. Czasami pojawiają się też pęknięcia na pierścieniach koszyk łożyska. Podczas dalszej eksploatacji może dojść do przerwania niektórych elementów separujących – wówczas elementy toczne oddziałują na siebie w sposób bezpośredni. Można wówczas zaobserwować metodą FAM-C na zobrażeniach  $f_i = f(t)$  paczki  $k$  – impulsów (rys. 10), gdzie  $k$  oznacza liczbę przerwanych elementów separujących koszyka łożyska tocznego. Amplituda impulsów osiąga poziom około 200–350% poziomu częstotliwości znamionowej. Najczęściej w takim przypadku siły dynamiczne oddziałujące na koszyk są tak duże, że dochodzi do rozerwania pierścieni koszyk łożyska tocznego.

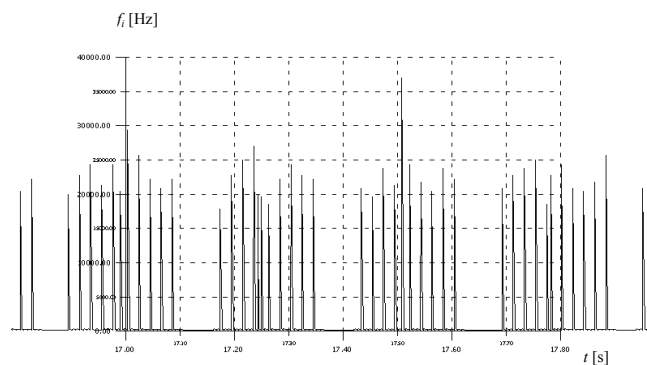


Fig. 10. Diagram of frequency of alternating current channel for bearing with broken separation elements of the bearing's cage

## 5. PODSUMOWANIE

W pracy opisano teorię i zastosowanie metod diagnostycznych FAM-C i FDM-A opartych o analizę parametrów modulacji częstotliwości napięcia wyjściowego do diagnozowania stanu technicznego podpór łożyskowych silników turbinowych. Dzięki zastosowaniu tych metod możliwe jest wcześniejsze wykrywanie defektu podzespołu, zanim stanie się on groźny np. dla bezpieczeństwa lotu statku powietrznego. Możliwe jest określanie wielu błędów montażowych oraz monitorowania efektów zużyciowych zachodzących w węzłach łożyskowych. Precyzyjnie można śledzić liczne parametry łożysk: zmiany oporów tarcia, zmiany luzów promieniowych łożyska, zmiany wielkości luzów obwodowych pomiędzy koszykiem a elementem tocznym, zmiany współczynnika toczenia. Jednocześnie możliwe jest obserwowanie zjawisk występujących w zespole wirnikowym, w tym wielkości przekoszeń pomiędzy wałem turbiny a wałem sprzężarki. Na wiele godzin wcześniej, niż sygnalizują to dotychczas „tradycyjnie” stosowane metody, można obserwować, bez ingerencji w układ, szereg zjawisk zużyciowych prowadzących do groźnych uszkodzeń węzłów łożysk tocznych silników turbinowych poprzez: wykrywanie i lokalizację rezonansów lokalnych i ogólnych, obserwację rozerwania elementów separujących koszyka lub całego pierścienia koszyk łożyska tocznego. Dla wielu tych zjawisk opracowano precyzyjne parametry metryczne, które w przyszłości mogą posłużyć jako istotne elementy algorytmów w automatycznych układach diagnozowania łożysk tocznych. Systematyczne stosowanie metod FAM-C i FDM-A w sposób precyzyjny umożliwia określenie bezpiecznego momentu przerwania eksploatacji diagnozowanego obiektu.

**LITERATURA**

- [1] Cempel Cz.: *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*. WNT, Warszawa 1982.
- [2] Biarda D., Falkowski P., Gębura A., Kowalczyk A.: *Opis patentowy PL 175664B1: Sposób diagnostowania technicznego elementów sprzęgających silnik, a zwłaszcza lotniczy silnik spalinowy, z prądnicą prądu przemiennego*, Zgłoszenie 08.07.1996, udzielenie patentu 29.01.1999.
- [3] Biarda D., Falkowski P., Gębura A., Kowalczyk A.: *Opis patentowy PL 175674B1 Sposób diagnostowania technicznego elementów sprzęgających silnik, a zwłaszcza lotniczy silnik spalinowy, z prądnicą prądu stałego*.
- [4] Biarda D., Falkowski P., Gębura A., Kowalczyk A.: *Opis patentowy PL 182554 B1, Sposób diagnostowania technicznego elementów sprzęgających silnik, a zwłaszcza lotniczy silnik spalinowy, z prądnicą prądu przemiennego*, zgłoszenie 19.05.1997, udzielenie patentu 02.04.2002r.
- [5] Furmanek S.: Kraszewski Z.: *Niezawodność łożysk tocznych*. Wydawnictwa Przemysłowe WEMA, Warszawa 1989.
- [6] Gębura A.: *Diagnostic of aircraft power transmission track based on the analysis of generator's frequency*. Journal of Technical Physics, Vol. XLIII No. 1 Warszawa 2002.
- [7] Gębura A., Tokarski T.: *The FDM-A method as applied to evaluate the rolling-element spin and misalignment of bearing support elements* Prace Naukowe ITWL, Zeszyt 22, s. 135-146, Warszawa 2007.
- [8] Wojnar A.: *Teoria sygnałów*. WNT, Warszawa 1980.
- [9] Andrejewicz J.: *Chaos i synchronizacja w układach fizycznych*, Monografie, Łódź 1995.

## ZASTOSOWANIE ANALIZY FALKOWEJ W DIAGNOSTYCE USZKODZEŃ LOKALNYCH UKŁADÓW NAPĘDOWYCH MASZYN GÓRNICZYCH

Radosław ZIMROZ

Badawcze Laboratorium Diagnostyki i Wibroakustyki  
Pl. Teatralny 2 50-051 Wrocław, [radoslaw.zimroz@pwr.wroc.pl](mailto:radoslaw.zimroz@pwr.wroc.pl)

### Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki prac dotyczących zastosowania analizy falkowej w diagnostyce uszkodzeń lokalnych układów napędowych maszyn górniczych. Wykazano możliwości i celowość stosowania tego typu analizy w diagnostyce maszyn górniczych, na podstawie studiów literaturowych określono główne kierunki zastosowań, sformułowano problemy związane z analizą falkową i wreszcie zaproponowano wstępny szkielet procedury diagnostycznej z wykorzystaniem metod falkowych na etapie wstępnego przetwarzania sygnałów (filtracji-dekompozycji, odszumiania), wstępnej analizy na podstawie obserwacji skalogramu, ekstrakcji cech diagnostycznych oraz poprawy ich jakości. Jako przykłady zastosowań pokazano wyniki analiz dla sygnałów z łożysk, przekładni stożkowo-walcowych i planetarnych.

Słowa kluczowe: analiza falkowa, procedura diagnozowania, maszyny górnicze, łożyska przekładni.

### APPLICATION OF WAVELET ANALYSIS DIAGNOSTICS OF LOCAL FAULTS IN DRIVING UNITS OF MINING MACHINES

#### Summary

Results of application of wavelet analysis for local damage detection in driving units used in mining machines have been presented in this paper. Based on literature survey and own study a directions of application oriented research have been defined, crucial problems and limitation were recalled and preliminary diagnostic procedure has been proposed. Wavelet analysis was used for signal preprocessing (filtering, decomposition) preliminary time-frequency structure analysis via scalogram, feature extraction and feature enhancement. The Procedure has been applied to pulley's bearing, 2-stage gearbox and planetary gearbox used in mining machines.

Keywords: wavelet analysis, diagnostic procedure mining machines, bearings, gears.

#### 1. WPROWADZENIE – USZKODZENIA LOKALNE I ZMIENNE OBCIĄŻENIA W MASZYNACH JAKO ŹRÓDŁA NIESTACJONARNOŚCI SYGNAŁÓW DRGANIOWYCH

Diagnozowanie uszkodzeń na podstawie sygnałów drganiowych (przyspieszeń drgań) jest obecnie najpopularniejszym podejściem w diagnostyce łożysk i przekładni. Sygnały drganiowe rejestrowane na obudowie łożyska czy przekładni stanowiących elementy układu napędowego maszyny górniczej charakteryzują się skomplikowaną strukturą częstotliwościową, zmienną w czasie na skutek zmian obciążenia, zakłóceń zewnętrznych czy wreszcie różnych form niesprawności występujących w zazębieniu przekładni czy łożysku.

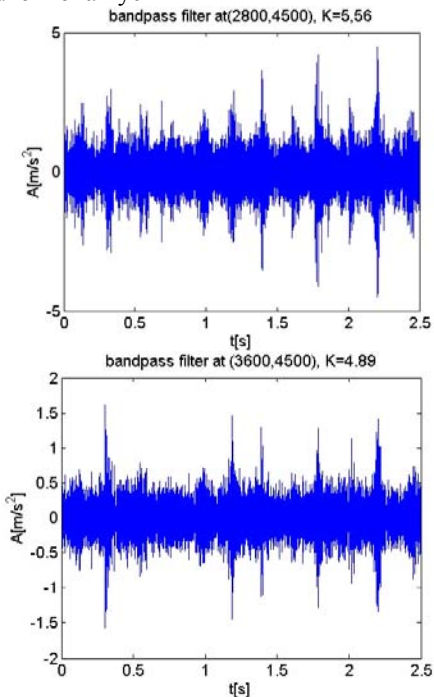
Uszkodzenie lokalne w łożysku czy zazębieniu związane z lokalną zmianą sztywności czy ubytkiem masy powoduje w sygnale drganiowym krótkotrwałe zaburzenie struktury amplitudowo-częstotliwościowej sygnału (rys. 1, rys. 2). Ze względu na specyfikę maszyn górniczych, konieczność wykrywania tego typu uszkodzeń we wczesnych stadiach rozwoju i niekorzystną relację sygnał -

informacyjny/zakłócenia konieczne jest stosowanie zaawansowanych narzędzi do przetwarzania sygnałów. Ze względu na ogromne możliwości analizy falkowej i silną niestacjonarność sygnałów diagnostycznych stosowanie tej metody dla problemu detekcji sygnału informacyjnego i ekstrakcji cech diagnostycznych wydaje się jak najbardziej uzasadnione. Wielu krajowych i zagranicznych autorów z powodzeniem zastosowało analizę falkową do detekcji uszkodzeń lokalnych zarówno w przekładniach jak i w łożyskach [1-5]. W pracy pokazane zostaną wyniki uzyskane dla sygnałów z łożysk bębnowych napędowych i dwustopniowych przekładni zębatych do napędu przenośnika taśmowego oraz wielostopniowej przekładni ze stopniem planetarnym na wejściu stosowanej do napędu koła czerpakowego. Obiekty wymienione powyżej są od lat w centrum zainteresowania autora – czytelnik z łatwością może znaleźć inne prace dotyczące analizowanych danych w celu porównania efektów nowego podejścia.

Rys. 1 przedstawia przykładowe sygnały (przetworzone) z przekładni z uszkodzeniem lokalnym z charakterystycznymi impulsami i zależnością amplitudy impulsów od obciążenia.



Rys. 2. prezentuje przykładowe fotografie uszkodzeń lokalnych



Rys. 1. Przykładowe niestacjonarne sygnały z przekładni z uszkodzeniem lokalnym z charakterystycznymi impulsami i zależnością amplitudy impulsów od obciążenia



Rys. 2. Przykłady uszkodzeń lokalnych: uszkodzone koło zębate, uszkodzona bieżnia łożyska

## 2. ANALIZA FALKOWA - PODSTAWY

### Definicja [7]

Analiza falkowa jest jedną z najczęściej stosowanych metod czasowo-częstotliwościowej analizy sygnałów niestacjonarnych. Ciągła transformata falkowa zdefiniowana jest następująco

$$CWT(\alpha, b) = \alpha^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{\alpha} \right) dt$$

gdzie:

$\psi(t)$  - falka bazowa,  $\alpha$  - współczynnik skali,  $b$  - przesunięcie,  $s(t)$  analizowany sygnał, oznacza zespolone sprzężenie (ang. complex conjugation)

### Interpretacja współczynników falkowych

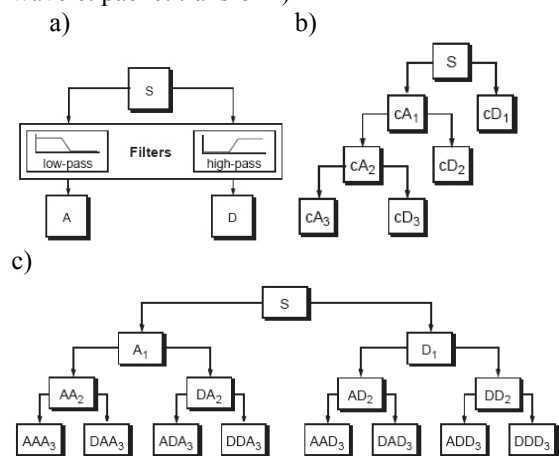
Wartości współczynników  $CWT(\alpha, b)$  mogą być interpretowane jako miara podobieństwa segmentu sygnału i funkcji bazowej dla różnych wartości skali i przesunięcia

### CWT a DWT

Wyznaczenie macierzy współczynników CWT jest złożone – w celu zmniejszenia ilości obliczeń możliwe jest wyznaczanie współczynników falkowych dla wybranych wartości skali będących potęgą 2:  $\alpha=2^m$ ,  $b=n2^m$ , ( $m, n \in \mathbb{N}$ )

Dyskretna transformata falkowa **DWT** sygnału  $s(t)$  może być rozpatrywana jako prosta operacja filtracji – dekompozycja sygnału na aproksymacje i detale. Najprostszy przykład DWT dla dekompozycji jednopoziomowej pokazano na rys. 3.

W diagnostyce maszyn oczywiście jednopoziomowa dekompozycja okazuje się często niewystarczająca, zatem wykonuje się dekompozycję dla kolejnych poziomów dla aproksymacji lub też dla aproksymacji i detali (ang. wavelet packet transform)



Rys. 3. Koncepcja dekompozycji (filtracji) sygnału z wykorzystaniem analizy falkowej

a) dekompozycja jednopoziomowa jako prosta filtracja

b) dekompozycja wielopoziomowa,

c) dekompozycja aproksymacji i detali (WPT)

### Analiza falkowa jako czasowo-częstotliwościowa reprezentacja sygnału

#### Skalogram [6]

Skalogram jest graficzną reprezentacją macierzy współczynników falkowych i po unormowaniu może być interpretowany jako dystrybucja energii przypadająca na poszczególne współczynniki falkowe (w funkcji skali i częstotliwości):



$$SC(t, f) = \frac{100 \cdot |coeff(t, f)^2|}{\sum |coeff^2|}$$

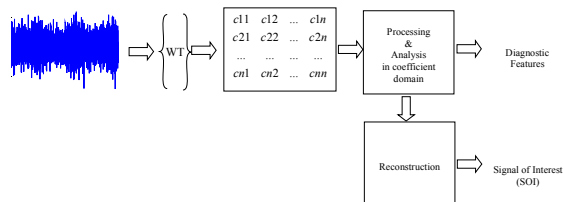
gdzie: coeff – wsp. falkowe

**„Reassigned” skalogram [8, 9].**

Mimo że czasowo-częstotliwościowa reprezentacja sygnału za pomocą falek jest uznawana za jedną z najlepszych ze względu na bardzo dobrą (w porównaniu np. do STFT) rozdzielczość, podlega ona także regule nieoznaczoności Heisenberga-Gabóra. Wartość energii dla punktu na płaszczyźnie czas-częstotliwość jest umowna – w rzeczywistości reprezentuje uśredniona wartość energii dla atomu dekompozycji. Dla sygnałów niestacjonarnych (np. zmodulowanych częstotliwościowo) uśrednianie takie jest źródłem zakłóceń i powoduje zniekształcenie rzeczywistej struktury częstotliwościowej. Zmiana punktu ciężkości skupienia energii na płaszczyźnie {t,f} z geometrycznego środka atomu do faktycznej lokalizacji energii z pominięciem uśredniania pozwala wyeksponować składowe niskoenergetyczne, co ma w diagnostyce wczesnych faz uszkodzeń ogromne znaczenie [9].

**Ogólny schemat analiz z wykorzystaniem falek**

Możliwości wykorzystania analizy falkowej w diagnostyce technicznej jest wiele [13]. Ogólny schemat przetwarzania pokazano na rys. 4 .



Rys. 4. Ogólny schemat przetwarzania sygnału z wykorzystaniem analizy falkowej

Sygnał drganiowy (nieprzetworzony) poddaje się przekształceniu falkowemu i w wyniku uzyskuje się macierz współczynników falkowych. Współczynniki te mogą zostać poddane dalszemu przetwarzaniu, analizie w celu: odszumienia sygnału, filtracji, pozyskania cech diagnostycznych, graficznej prezentacji struktury czasowo-częstotliwościowej sygnału poprzez wyświetlenie mapy czasowo-częstotliwościowej (skalogramu) itd. Następnym krokiem może być rekonstrukcja sygnału na podstawie zmodyfikowanych współczynników falkowych.

**Kluczowe zagadnienia:**

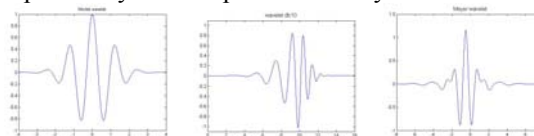
Stosowanie analizy falkowej wymaga zaawansowanej wiedzy i często intuicji, zarówno w zakresie samej procedury przetwarzania jak i interpretacji wyników. Mimo opublikowania wielu prac przez naukowców z wielu ośrodków wciąż

nierozwiązane pozostają następujące zagadnienia [5].

**Dobór falki bazowej**

Jeśli współczynniki falkowe są miarą podobieństwa falki do fragmentu sygnału [6] znaczenie doboru falki jest oczywiste. Najczęściej dokonywane jest to na podstawie eksperckiego określania zgodności kształtu falki z impulsem generowanym przez parę kinematyczną z uszkodzeniem lokalnym.

W literaturze poświęconej diagnostyce najczęściej spotykane falki to falka Moleta, Daubechies (dB-N dla N>4), czy Meyera. Kształt wspomnianych falek pokazano na rys. 5.



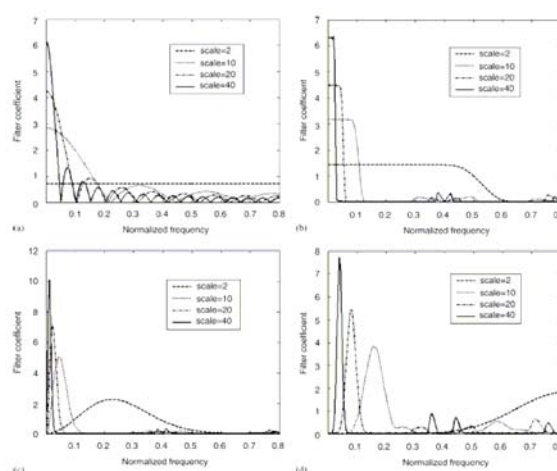
Rys. 5. Kształt najczęściej stosowanych falek w diagnostyce

Warto zauważyć, że różnice pomiędzy kształtem falek istnieją niezwykle trudno jest ocenić przydatność w dekompozycji – zwłaszcza, że zwykle kształt poszukiwanego impulsu (wygenerowanego przez uszkodzenie) nie jest do końca znany.

**Charakterystyki częstotliwościowe filtrów falkowych**

Kształt falki bazowej jest ściśle powiązany z właściwościami (charakterystyką częstotliwościową filtru) filtru używanego w procedurze dekompozycji.

Na rys. 6 pokazano przykładowe charakterystyki częstotliwościowe filtrów falkowych [wg pracy 10]. Dobór falki w dziedzinie częstotliwości wydaje się bardziej dokładnym podejściem.



Rys. 6. Przykładowe charakterystyki częstotliwościowe filtrów falkowych [wg pracy 10]

**Określenie poziomu dekompozycji**

Filtracja w analizie falkowej polega na dekompozycji sygnału (a następnie tylko

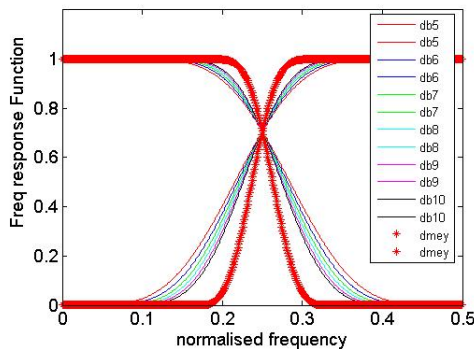
aproxymacji bądź aproxymacji i detali) na aproxymacje i detale. Zwiększanie poziomów dekompozycji jest jednoznaczne z podziałem pasma na coraz mniejsze podzakresy. W zależności od parametrów akwizycji może się okazać, że detal na poziomie N nie ma fizycznego sensu ze względu na uzyskaną szerokość filtra [21].

### Wybór bazy

Określenie poziomu dekompozycji pozwala uzyskać drzewo dekompozycji o zadanym rozmiarze. Każda z gałęzi drzewa określa jednoznacznie pasmo częstotliwości dekomponowanego sygnału. Zakładając dla uproszczenia, że informacja o uszkodzeniu lokalnym znajduje się tylko w jednym z wyodrębnionych pasm należy podać kryteria wyboru informacyjnego pasma. Najczęściej stosowane kryteria bazują na entropii [11, 12].

### „Leakage effect”

Jak już wspomniano dekompozycja DWT może być interpretowana jako prosta operacja filtracji dolno- i górno- przepustowej [6]. Ze względu na dalekie od idealnych parametry filtra (charakterystyka amplitudowa zawiera pewien obszar przejściowy pomiędzy pasmem przenoszonym a tłumionym – stromość tej części charakterystyki determinuje jakość filtra) mamy do czynienia z efektem niepełnym tłumieniem sygnału w paśmie poza zakresem pożądanym. W opublikowanym niedawno artykule Peng [13] podczas eksperymentu numerycznego wykazał relacje pomiędzy rodzajem falki a wielkością efektu LE (rys. 7). Ignorowanie niedokładności filtracji może być przyczyną błędnych wniosków.



Rys. 7. charakterystyki częstotliwościowe dla falek z rodziny dBN i dmey

### Podejście optymalizacyjne i adaptacyjne

W literaturze istnieją propozycje rodzin funkcji bazowych o przeróżnych kształtach. Wybór odpowiedniej falki jest zadaniem trudnym ale i kluczowym zarazem. W zależności od właściwości sygnału informacyjnego parametry impulsu (przenoszącego informację o uszkodzeniu lokalnym) mogą być inne, zatem stosowanie jednego typu falki do dowolnego typu uszkodzenia lokalnego jest całkowicie nieuzasadnione. Niestety, w wielu przypadkach dobór falki na zasadzie niemalże

przypadku, lub co najwyżej wzrokowej oceny podobieństwa kształtu falki do teoretycznego kształtu impulsu pozwala uzyskać interesujące rezultaty, co zniechęca badaczy do dalszego poszukiwania lepszych rezultatów. W literaturze można znaleźć prace, które świadczą o pozytywnych skutkach stosowania optymalizacji lub adaptacji pewnych parametrów w analizie falkowej tak, aby dla konkretnego przypadku uzyskać możliwie najlepszy rezultat filtracji wg przyjętego kryterium.

Przykładowo w pracy [14] zaproponowano kryteria i procedury optymalizacji doboru falki w zależności od modelu impulsu.

W pracy Lin i Zuo [15] zaproponowano procedurę adaptacji filtra opartego na falce Moleta. Parametry filtra dla danej skali ( $a, \beta$ ) były zmieniane w zależności od wartości kurtozy przyjętej jako kryterium adaptacji.

$$\psi(t) = \exp(-\beta^2 t^2 / 2) \cos(\pi t).$$

$$\psi_{a,b}(t) = \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) = e^{-\frac{\beta^2(t-b)^2}{2a^2}} \cos\left[\frac{\pi(t-b)}{a}\right]$$

Na podobnej zasadzie Qiu [16] zaproponował optymalizację parametrów falki Moleta rozumianej jako filtr pasmowo-przepustowy z wykorzystaniem entropii Shanona. Optymalny dobór parametru  $\beta$  i skali ( $a$ ) w falce Moleta w oparciu o entropię Shanonna.

$$H(p) = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i, \quad \sum_{i=1}^n p_i = 1,$$

### Metody przetwarzania danych w dziedzinie współczynników falkowych

**Odszumianie** [18, 19]. Jednym z podstawowych zadań stawianych analizie falkowej jest odszumianie sygnałów. Odszumianie w dziedzinie współczynników falkowych wykorzystuje fakt, że sygnały deterministyczne, wąskopasmowe mają energię skupioną wokół jednego prążka bądź pasma, natomiast energia szumu (zwykle białego) jest rozproszona równomiernie w całym paśmie. Elementy macierzy współczynników falkowych związane z sygnałem pożądanym będą znacznie większe niż elementy macierzy związane z szumem. Poprzez zerowanie współczynników o małych wartościach i pozostawienie pozostałych realizuje się odszumianie metodą tzw. „hard- thresholding”.

### Ekstrakcja cech diagnostycznych [17-20, 22]

#### • Macierz współczynników jako zestaw danych.

Podejście wykorzystujące całą macierz współczynników jako źródło cech diagnostycznych jest kosztowne obliczeniowo, ale pozwala zachować pełną informację o sygnale. Jeśli znane są wzorce dla stanu prawidłowego i nieprawidłowego zwykle stosuje się kryteria odległościowe do oceny stanu technicznego reprezentowanego przez macierz współczynników.

- **Wybór współczynników o największych wartościach**

Niektórzy z badaczy uważają, że nie ma potrzeby analizować całej macierzy współczynników, ponieważ uszkodzenie lokalne jest zwykle umiejscowione w określonym zakresie skali/częstotliwości i w tym zakresie współczynniki falkowe są znacznie większe niż poza tym zakresem. Na potrzeby klasyfikacji dokonuje się prostej selekcji wg reguły

$If\ cwt(a,t) > threshold\ then\ cwt(a,t)\ else\ cwt(a,t) = 0$

W istocie jest to zbliżona reguła do odsumowania w dziedzinie współczynników falkowych

- **Kompresja PCA, LDA**

„Twarda” selekcja współczynników wymaga określenia poziomu akceptacji/odrzućcia współczynników i zwykle wiąże się z określonymi stratami informacji. Informacyjne metody kompresji wymiaru danych takie jak Principal Component Analysis czy Linear Discriminant Analysis pozwalają wyekstrahować te współczynniki które zawierają informację użyteczną i odrzucić te które jej nie niosą [22].

- **Agregacja w określonym zakresie skali**

Algorytmy kompresji danych są złożone obliczeniowo. W pewnych przypadkach możliwe jest zbudowanie docelowych cech diagnostycznych poprzez agregację informacji zawartej we współczynnikach falkowych z pewnego (informacyjnego) zakresu  $f_1$ - $f_2$  [4]:

$$A_{-F} = \sum_{f=f_1}^{f=f_2} SC(t, f)$$

- **Uśrednianie synchroniczne po skali [23]**

W celu wyeliminowania zakłóceń i eksponowania użytecznych cech sygnału powiązanych z uszkodzeniem lokalnym w pracy [23] zaproponowano uśrednianie współczynników falkowych. Jest to w zasadzie rozszerzenie koncepcji uśredniania synchronicznego sygnałów (TSA) w dziedzinie czasu z powodzeniem stosowanego przez wielu badaczy. W tym przypadku dla sygnał został poddany segmentacji i dla każdego segmentu wyznaczono czasowo-częstotliwościową reprezentację sygnału w postaci macierzy współczynników falkowych, które zostały następnie uśrednione.

Podejście to łączy w sobie zalety TSA i czasowo-częstotliwościowej analizy sygnałów

## 2. ANALIZA FALKOWA W DIAGNOSTYCE UKŁADÓW NAPĘDOWYCH MASZYN GÓRNICZYCH

Bazując na omówionych metodach stosowanych przez różnych badaczy na potrzeby diagnostyki przekładni i łożysk będących elementami układów napędowych maszyn górniczych zaproponowano procedurę detekcji uszkodzenia lokalnego w oparciu o przekształcenie falkowe.

Schemat procedury pokazano na rys. 8.

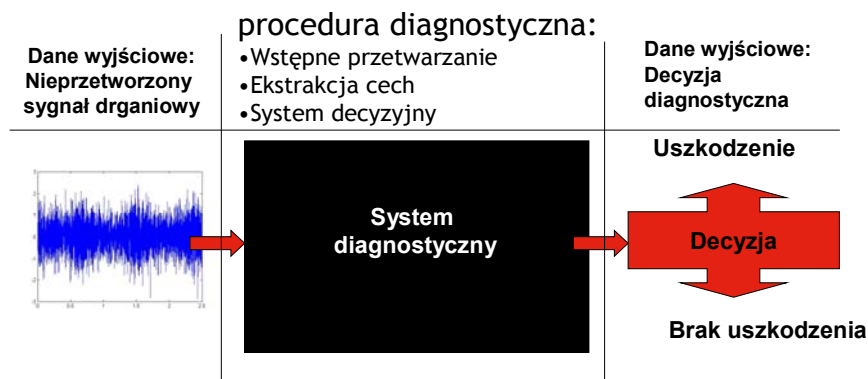
Dane wejściowe stanowią nieprzetworzone sygnały drganiowe zarejestrowane w czasie normalnej eksploatacji w warunkach kopalni odkrywkowej. Badane obiekty to dwustopniowa przekładnia zębata i łożysko bębna napędowego stanowiące elementy układu napędowego przenośnika taśmowego oraz wielostopniowa przekładnia ze stopniem planetarnym na wejściu stosowana w układzie napędowych koła czerpakowego.

Dane wyjściowe oczekiwane po zrealizowaniu procedury to informacja o braku lub o wystąpieniu uszkodzenia lokalnego.

Podstawą do stwierdzenia wystąpienia uszkodzenia lokalnego jest występowanie w przetworzonym wyekstrahowanym sygnale informacyjnym cyklicznych impulsów.

W zależności od potrzeby w ramach procedury wykorzystywane były:

- Filtracja (dekompozycja) falkowa z wykorzystaniem dwóch metod;
- odsumowanie sygnału w dziedzinie współczynników falkowych;
- ekstrakcja cech z czasowo-częstotliwościowej reprezentacji wyekstrahowanego sygnału z wykorzystaniem sumowania współczynników falkowych w określonym zakresie częstotliwości (dla  $cwt(a,t) > threshold$ );
- odsumowania cech diagnostycznych (traktowanych jako sygnał informacyjny).



Rys. 8. Koncepcja procedury diagnostycznej

Tabela 1. Zadania cząstkowe i metody transformacji danych

etap	Dane we	zadanie	Metody	Dane wy	detekcja	uwagi
1	nieprzetworzony sygnał drganiowy	-	-	nieprzetworzony sygnał drganiowy	Niemożliwa	Sygnał silnie zakłócony
2	nieprzetworzony sygnał drganiowy	przetwarzanie wstępne	BP filtering, adaptive filtering, blind extraction, wavelet decomposition	Sygnał informacyjny 1	Możliwa	
3	Sygnał informacyjny 1	przetwarzanie wstępne - odsumianie	Filtry adaptacyjne Odszumianie w dziedzinie współczynników falkowych	Sygnał informacyjny 2	Możliwa	
4	Sygnał informacyjny 1 lub 2	ekstrakcja cech	Analiza falkowa	Skalogram1 (obraz) Macierz współczynników1	Możliwa	
5	Macierz współczynników	Poprawa jakości cech	Odszumianie w dziedzinie współczynników falkowych	Skalogram2 (obraz) Macierz współczynników 2	Możliwa	
6	Macierz współczynników 1 lub 2	Agregacja cech (redukcja wymiarów)	Operacje na współczynnikach falkowych	Przebieg cech w czasie	jednoznaczna	

W tabeli 1 zestawiono dla określonych danych wejściowych stawiane wymagania i metody, którymi posłużono się do osiągnięcia postawionych celów. Każdy etap został opatrzony komentarzem na temat możliwości i skuteczności detekcji uszkodzenia lokalnego.

W dalszej części artykułu poszczególne zadania zostaną zilustrowane przykładami

## 2. PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ

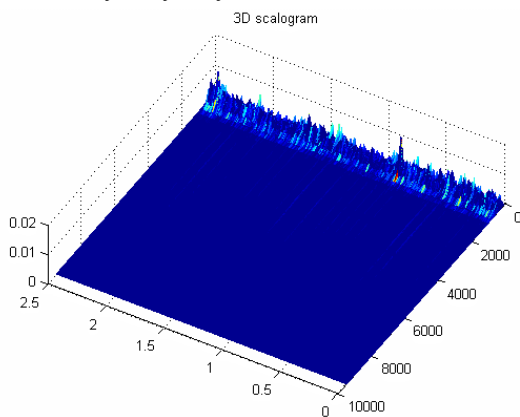
### • Łożysko skalogram

Na rys. 9 przedstawiono skalogram dla sygnału z łożyska. Identyfikacja jakichkolwiek cech sygnału świadczących o występowaniu uszkodzenia jest niemożliwa. Przyczyną tego jest skomplikowana struktura sygnału – a ściślej niekorzystna relacja między amplitudami składowych informacyjnych i zakłóceń.

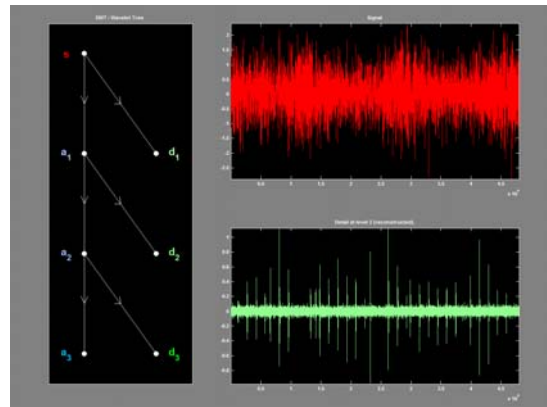
### • Łożysko dekompozycja 1

Na rys. 10 pokazano dekompozycję dla nieprzetworzonego sygnału z uszkodzonego łożyska. Jako falkę bazową wykorzystano funkcję db10.

Warto odnotować jest to że w sygnale oryginalnym (przed filtracją) zidentyfikowanie jakichkolwiek impulsów jest niemożliwe, związek sygnału informacyjnego z uszkodzeniem jest jednoznaczny i czytelny.



Rys. 9. Skalogram dla nieprzetworzonego sygnału z uszkodzonego łożyska



Rys. 10. Dekompozycja dla nieprzetworzonego sygnału z uszkodzonego łożyska: a) drzewo dekompozycji, b) sygnał oryginalny, c) sygnał odfiltrowany informacyjny

### • Łożysko dekompozycja 2 WPT

Na rys. 11 pokazano dekompozycję z wykorzystaniem WPT dla nieprzetworzonego sygnału z uszkodzonego łożyska

W tym przypadku jako falkę bazową wykorzystano funkcję dmey.

Jak wspomniano wcześniej mimo różnic pomiędzy falkami możliwe jest odzyskanie informacji z sygnału oryginalnego.

Zmiana falki bazowej podyktowana była możliwością poprawy „impulsowości” sygnału mierzona poprzez wyznaczenie kurtozy z sygnału informacyjnego.

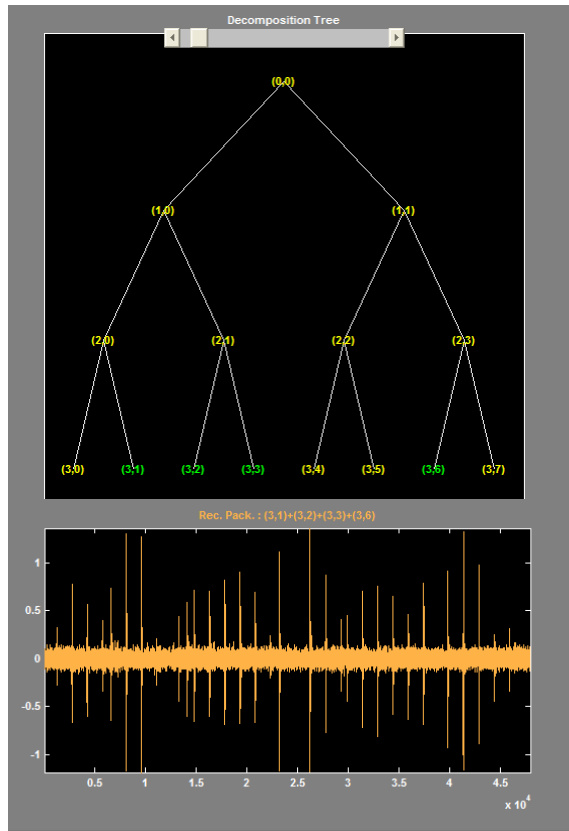
### • Łożysko odszumianie

Sygnał rejestrowany na łożysku w stanie dobrym jest sygnałem o charakterze szumowym, co stanowi podstawę do wykorzystania odszumiających właściwości analizy falkowej. W analizowanym przypadku sygnał z łożyska można wyrazić jako mieszaninę deterministycznego sygnału zakłócającego (źródłem zakłóceń jest przekładnia zębata połączona z bębniem poprzez sprzęgło), sygnału informacyjnego oraz szumu. Po dekompozycji uzyskano sygnał impulsowy (jak na rys. 12), ale relacja sygnał/szum była ciągle

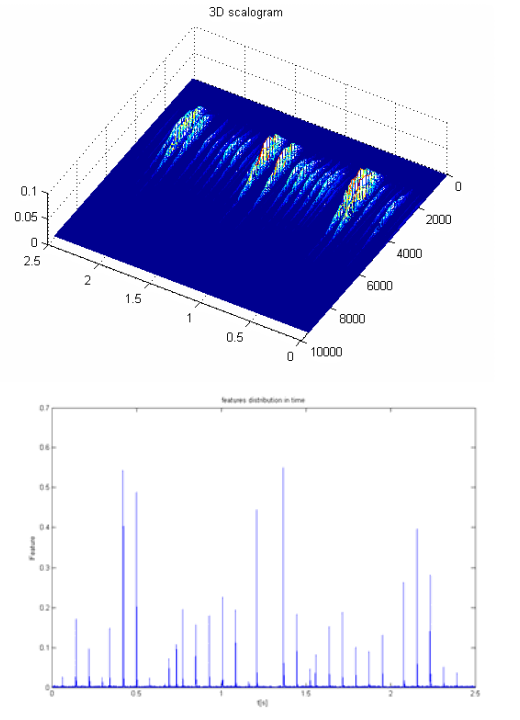


niezadowalająca. Poprzez zastosowanie filtracji odsumiającej (pięciopoziomowej) uzyskano znaczną poprawę.

ciągłości procedury wyznaczono cechy diagnostyczne na podstawie skalogramu (rys. 13).



Rys. 11. Dekompozycja WPT dla nieprzetworzonego sygnału z uszkodzonego łożyska: a) drzewo dekompozycji, b) sygnał łożyska i przebieg cechy diagnostycznej

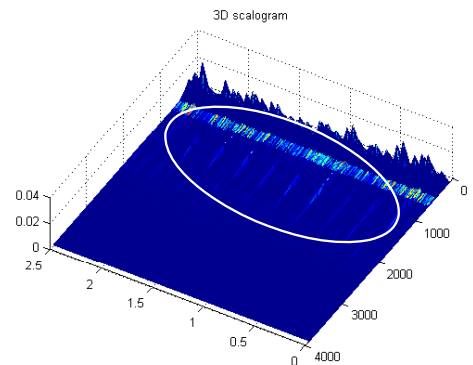


Rys. 13. Skalogram dla odsumionego sygnału z łożyska i przebieg cechy diagnostycznej

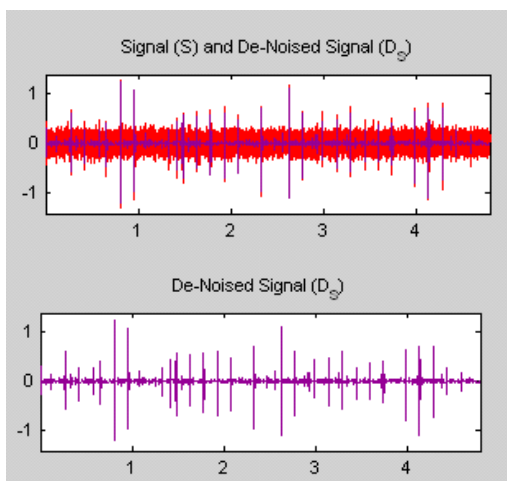
Zaletą wyznaczania cechy diagnostycznej w funkcji czasu zostanie szerzej omówiona przy analizie danych z przekładni.

- Przekładnia dwustopniowa skalogram

Na rys. 14 przedstawiono skalogram dla sygnału z dwustopniowej przekładni zębatej. Identyfikacja szerokopasmowych zaburzeń struktury częstotliwościowej świadczących o występowaniu uszkodzenia jest trudna, sygnał informacyjny jest silnie maskowany przez wysokoenergetyczne składowe związane z zazębieniem.



Rys. 14. Skalogram dla nieprzetworzonego sygnału z uszkodzonego przekładni dwustopniowej



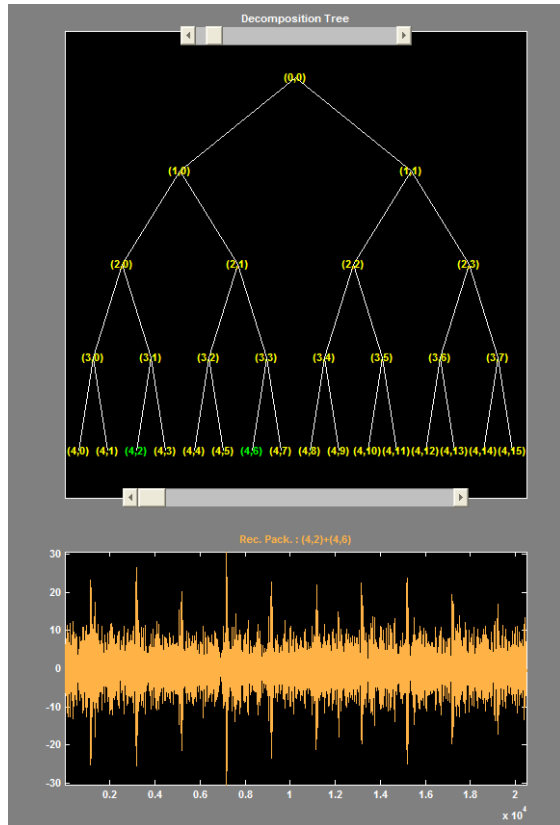
Rys. 12. Sygnał łożyska: a) zaszumiony i b) po odsumieniu

- Łożysko - skalogram dla SOI – ekstrakcja cech  
Mimo że odsumiony sygnał z rys. 12 stanowi bardzo klarowny dowód na występowanie uszkodzenia lokalnego w łożysku dla zachowania

- Przekładnia dwustopniowa dekompozycja 2  
Na rys. 15 pokazano dekompozycję z wykorzystaniem WPT dla nieprzetworzonego sygnału z uszkodzonej przekładni.

W tym przypadku jako falkę bazową wykorzystano funkcję dmey, dekompozycja realizowana była na 4 poziomach.

Sygnał informacyjny w odróżnieniu od nieprzetworzonego zawiera cykliczne impulsy świadczące o uszkodzeniu.



Rys. 15. Dekompozycja WPT dla nieprzetworzonego sygnału z uszkodzonej przekładni: a) drzewo dekompozycji, b) sygnał odfiltrowany informacyjny

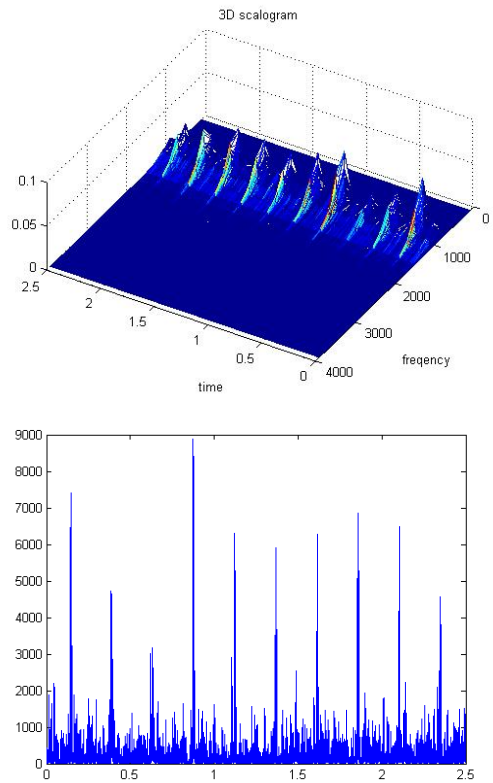
- Przekładnia dwustopniowa - skalogram dla SOI – ekstrakcja cech

Na rys. 16 przedstawiono czasowo-częstotliwościową reprezentację sygnału informacyjnego, na którym wyraźne są cykliczne zmiany struktury częstotliwościowej w określonym paśmie. Sumowanie wartości współczynników falkowych w tym paśmie daje przebieg zmian cechy diagnostycznej w funkcji czasu (rys.16b)

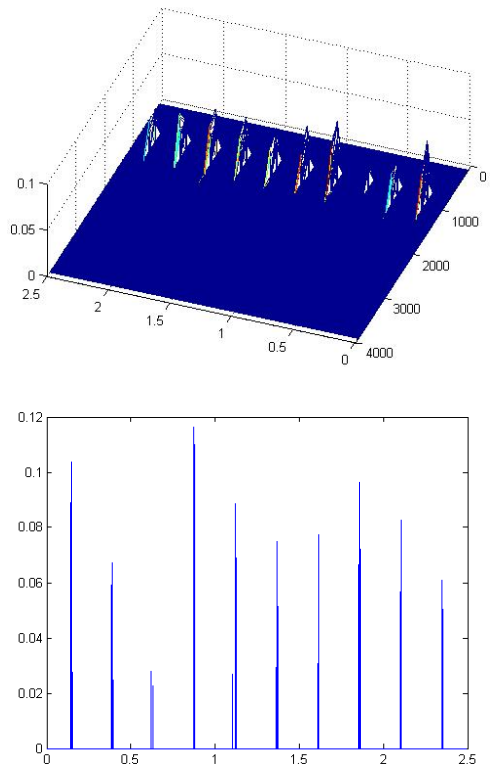
- Przekładnia dwustopniowa - skalogram dla SOI – poprawa jakości ekstrakcji cech

Przebieg zmian cechy diagnostycznej w funkcji czasu pokazany na rys. 16b jest nadal zakłócony. Dla wczesnych form niesprawności może to być przyczyną błędnej detekcji, warto zatem pokusić się o poprawę SNR dla tego sygnału.

Wykorzystując technikę odsumowania sygnału w dziedzinie współczynników falkowych uzyskano znaczną poprawę SNR, co pokazano na rys. 17.



Rys. 16. a) skalogram sygnału informacyjnego b) przebieg cechy diagnostycznej



Rys. 17. a) skalogram sygnału informacyjnego po odsumowaniu b) przebieg cechy diagnostycznej po odsumowaniu

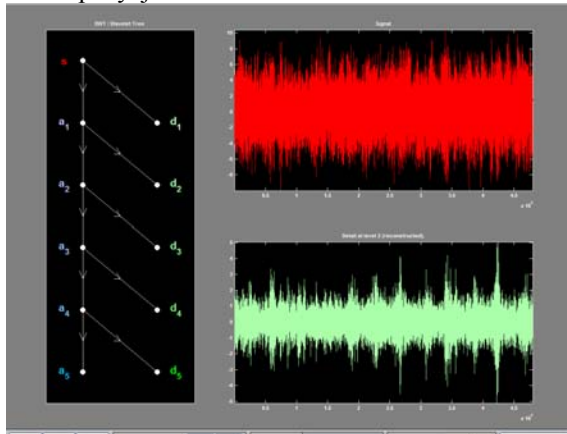


- Przekładnia planetarna – dekompozycja WPT

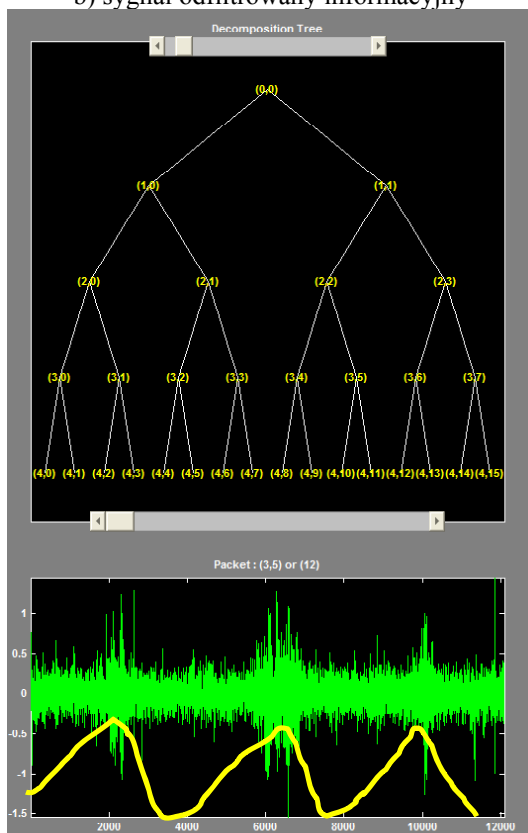
Na rys. 18 pokazano dekompozycję WPT dla nieprzetworzonego sygnału z uszkodzonej przekładni planetarnej. Na podstawie analizy sygnału nieprzetworzonego nie jest możliwe wykrycie impulsów świadczących o uszkodzeniu.

Sygnał poddano dekompozycji (5 poziomów, falka Meyera). Użyteczną informację diagnostyczną zidentyfikowano w detalu na poziomie 2.

Porównywalne wyniki uzyskano przy użyciu dekompozycji WPT.



Rys. 18. Dekompozycja dla nieprzetworzonego sygnału z uszkodzonej przekładni planetarnej: a) drzewo dekompozycji, b) sygnał oryginalny b) sygnał odfiltrowany informacyjny



Rys. 19. Dekompozycja WPT dla nieprzetworzonego sygnału z uszkodzonej przekładni planetarnej: a) drzewo dekompozycji, b) sygnał odfiltrowany informacyjny

Na rys. 19 pokazano dekompozycję WPT dla nieprzetworzonego sygnału z uszkodzonej przekładni planetarnej. Na podstawie analizy sygnału nieprzetworzonego nie jest możliwe wykrycie impulsów świadczących o nieprawidłowej pracy jarzma w przekładni planetarnej.

Sygnał poddano dekompozycji (e poziomów, falka Meyera). Użyteczną informację diagnostyczną zidentyfikowano w detalu na poziomie 3 (node 3,5)

Zaburzenia w tym przypadku są silnie skorelowane z cyklicznymi zmianami obciążenia zewnętrznego (cykliczne zmiany obciążenia związane są z procesem urabiania materiału przez koło czerpakowe).

## WNIOSKI

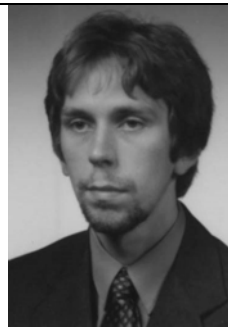
W pracy przedstawiono wyniki prac dotyczących zastosowania analizy falkowej w diagnostyce uszkodzeń lokalnych układów napędowych maszyn górniczych. Na podstawie studiów literaturowych określono główne kierunki zastosowań, sformułowano problemy związane z analizą falkową i wreszcie zaproponowano wstępny szkielet procedury diagnostycznej z wykorzystaniem metod falkowych na etapie wstępnego przetwarzania sygnałów (filtracji-dekompozycji, odszumiania), wstępnej analizy na podstawie obserwacji skalogramu, ekstrakcji cech diagnostycznych oraz poprawy ich jakości.

Wyniki analiz uzyskane dla sygnałów z łożysk, przekładni stożkowo-walcowych i planetarnych są bardzo satysfakcjonujące. Detekcja cyklicznych zaburzeń o charakterze impulsowym jest jednoznaczna. Dobra jakość uzyskanych wyników nie oznacza zakończenia prac poświęconych tym zagadnieniom. Jak wspomniano kwestie doboru falki bazowej, poziomu dekompozycji, wyboru bazy itd. były dokonywane manualnie w oparciu o dobrą znajomość sygnałów. Kontynuacja prac będzie związana z optymalizacją i automatyzacją poszczególnych etapów procedury.

## LITERATURA

- [1] Batko W., Ziółko M.: *Zastosowanie teorii falek w diagnostyce technicznej*. Seria: Problemy inżynierii mechanicznej i robotyki nr 7. Wydawnictwo AGH, Kraków 2002.
- [2] B. Wysogład: *Diagnozowanie łożysk tocznych z zastosowaniem paczkowej transformacji falkowej*. Diagnostyka. vol. 30, t. 2 s. 195-198.
- [3] B. Wysogład: *Metody diagnozowania łożysk tocznych z zastosowaniem transformacji falkowej*. Diagnostyka 2003 nr 29, s. 47-61.
- [4] Łazarz B., Madej H., Wilk A., Figlus T., Wojnar G.: *Diagnozowanie złożonych przypadków uszkodzeń przekładni zębatych*. Instytut Technologii Eksploatacji - PIB, 2007
- [5] Z. K. Peng, F. L. Chu: *Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with*

- bibliography*, Mechanical Systems and Signal Processing, 18 (2004) 199-221
- [6] Michel Misiti Yves Misiti Georges Oppenheim Jean-Michel Poggi Wavelet Toolbox™ 4 User's Guide, Mathworks
- [7] S. G. Mallat: *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, San Diego (1998).
- [8] F Auger, P Flandrin: *Improving the readability of time-frequency and time-scale representations by the reassignment method*. IEEE Transactions on Signal Processing 43 (1995) 1068-1089
- [9] Z. K. Peng, F. L. Chu, Peter W. Tse: *Detection of the rubbing-caused impacts for rotor-stator fault diagnosis using reassigned scalogram*, Mechanical Systems and Signal Processing, 19 (2005) 391- 409
- [10] Li Li, Liangsheng Qu, Xianghui Liao: *Haar wavelet for machine fault diagnosis*. Mechanical Systems and Signal Processing 21 (2007) 1773-1786
- [11] B Liu, SF Ling: *On the selection of informative wavelets for machinery diagnosis*. Mechanical Systems and Signal Processing 1999 13/1 145-162
- [12] R. R. Coifman, M. V. Wickerhauser: *Entropy-based algorithms for best basis selection*, IEEE Transactions on Information Theory 38 (1992) 713-718.
- [13] Z. K. Peng, M. R. Jackson, J. A. Rongong, F. L. Chu and R.M. Parkin: *On the energy leakage of discrete wavelet transform*, Mechanical Systems and Signal (2008), doi:10.1016/j.ymssp.2008.05.014
- [14] E. L. Schukin, R. U. Zamaraev, L. I. Schukin: *The optimisation of wavelet transform for the impulse analysis in vibration signals*. Mechanical Systems and Signal Processing 18 (2004) 1315-1333
- [15] J. Lin, M. J. Zuo: *Gearbox fault diagnosis using adaptive wavelet filter*. Mechanical Systems and Signal Processing 17 (6) (2003) 1259-1269.
- [16] Hai Qiua, Jay Leea, Jing Linb, Gang Yuc: *Wavelet filter-based weak signature detection method and its application on rolling element bearing prognostics*. Journal of Sound and Vibration 289 (2006) 1066-1090
- [17] W. J. Staszewski: *Wavelet based compression and feature selection analysis*. Journal of Sound and Vibration 211 (1998) 735-760
- [18] D. L. Donoho, I. M. Johnstone: *Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage*. Biometrika 81 (3) (1994) 425-455.
- [19] D. Donoho: *De-Noising by Soft-Thresholding*. Ieee Transactions On Information Theory, VOL. 41, NO. 3, MAY 1995
- [20] J. Lin and L. Qu: *2000 Feature extraction based on Morlet wavelet, its application for mechanical fault diagnosis*. Journal of Sound, Vibration 234, 135-148.
- [21] N. G. Nikolaou, I. A. Antoniadis: *Rolling element bearing fault diagnosis using wavelet packet*, NDT&E International 35 (2002) 197-205.
- [22] Gary G. Yen, and Kuo-Chung Lin: *Wavelet Packet Feature Extraction for Vibration Monitoring Ieee Transactions On Industrial Electronics*, VOL. 47, NO. 3, JUNE 2000
- [23] Enayet B. Halim, M. A. A. Shoukat Choudhury, Sirish L. Shah, Ming J. Zuo: *Time domain averaging across all scales: A novel method for detection of gearbox faults Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 22, Issue 2, February 2008, Pages 261-278



PhD Radosław ZIMROZ,  
MSc from Faculty of Electronics (speciality: Acoustics) Wrocław University of Technology, 1998, PhD (2002) at Mining Faculty, WUT (with honours).  
Until now with Machinery Systems Group at Institute of Mining Engineering, WUT.

9 months postdoc (2004) at Cranfield University (SOE/PASE/AMAC), U K.

Interest: modelling and diagnostics of gearboxes used in mining industry, vibration signal processing, application of AI methods, adaptive systems

## NIEPEWNOŚĆ W PROCESACH DIAGNOZOWANIA I DOZOROWANIA

Lesław BĘDKOWSKI, Tadeusz DĄBROWSKI

Instytut Systemów Elektronicznych, Wydział Elektroniki, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa  
[lbedkowski@wel.wat.edu.pl](mailto:lbedkowski@wel.wat.edu.pl), [tdabrowski@wel.wat.edu.pl](mailto:tdabrowski@wel.wat.edu.pl)

### Streszczenie

W procesie użytkowania obiektu występują co najmniej dwa rodzaje zakłóceń: oddziaływania zakłócające proces wytwarzania efektu użytkowego i oddziaływania zakłócające proces diagnozowania. Oddziaływania zakłócające proces wytwarzania efektu wywołują niestabilność właściwości użytkowych obiektu i obniżają jego efektywność użytkową. Oddziaływania zakłócające proces diagnozowania obniżają niezawodność diagnoz. W referacie rozpatruje się formy diagnozowania pozwalające utrzymać wymaganą niezawodność diagnoz mimo wysokiego poziomu zakłóceń wywołujących znaczną niepewność symptomów stanu obiektu.

Słowa kluczowe: diagnozowanie, dozorowanie, niepewność symptomu, niezawodność diagnozy.

### UNCERTAINTY IN PROCESSES OF DIAGNOSING AND SUPERVISING

#### Summary

At least two kind of disturbances take a stand in process of use of object interactions disturb in process fabricate effect utilitarian and interactions disturbing process diagnose. Interactions which disturb process of produce effect creates instability of properties of utilitarian effect. Interactions which disturb diagnosis process lower reliability of diagnosis. Forms of diagnosing which keep required reliability diagnosis in split of high level of disturbance which creates uncertainty symptom state object has been presented in this paper.

Keywords: diagnosing, supervision diagnosing, symptom uncertainty, reliability of diagnosis.

## 1. WPROWADZENIE

Obserwacja praktyki eksploatacyjnej wskazuje, że decydenci eksploatacji podejmują szereg aktywnych działań zmierzających do utrzymania lub szybkiego odtworzenia zdatności użytkowej obiektu, głównie dlatego by zapewnić wysoką niezawodność **zrealizowania** zadań.

Przypomnijmy znane w teorii niezawodności twierdzenie:

$$R(t) = R(t_0) R(t_0 + \partial t, t | \mathbf{E}_{ob}(t_0) \equiv \mathbf{E}_{ob}^l) \quad (1)$$

gdzie:  $R(t)$  – prawdopodobieństwo utrzymania stanu zdatności użytkowej obiektu w przedziale czasowym  $[t_0, t]$ ;

$R(t_0)$  – prawdopodobieństwo stanu zdatności obiektu w chwili  $t_0$ ;

$R(t_0 + \partial t, t | \mathbf{E}_{ob}(t_0) \equiv \mathbf{E}_{ob}^l)$  – prawdopodobieństwo utrzymania stanu zdatności obiektu w przedziale czasowym  $[t_0 + \partial t, t]$  (przy  $\partial t \rightarrow 0$ ) pod warunkiem, że w chwili  $t_0$  obiekt jest w stanie zdatności;

Jest oczywiste, że utrzymanie wysokiej wartości prawdopodobieństwa stanu zdatności użytkowej w czasie przewidzianym na zrealizowania zadania użytkowego zależy od obu składników tego iloczynu.

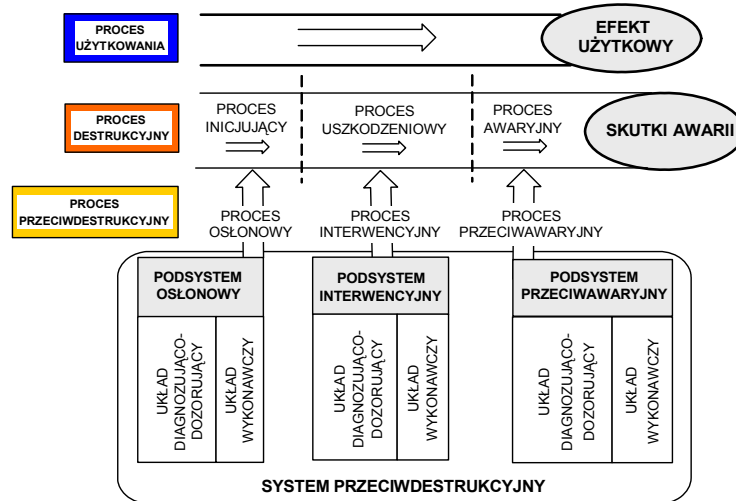
Utrzymanie wysokiej wartości składnika  $R(t_0)$  zależy od **niezawodnej diagnozy wstępnej**.

W oparciu – bowiem – o taką informację możliwe jest niedopuszczenie do użytkowania obiektów niezdatnych lub obiektów o zbyt małym potencjale użytkowym albo przywrócenie tym obiektom stanu zdatności jeszcze przed użyciem.

Utrzymanie wysokiej wartości składnika  $R(t_0 + \partial t, t | \mathbf{E}_{ob}(t_0) \equiv \mathbf{E}_{ob}^l)$  zależy od biernych właściwości obiektu (np. od właściwości konstrukcyjnych) oraz od aktywnych działań przeciwdestrukcyjnych, realizowanych w trakcie użytkowania. Jak wiadomo warunkiem skuteczności działań przeciwdestrukcyjnych jest możliwie bezzwłoczne i niezawodne wykrywanie procesów destrukcyjnych i wykrywanie powstania stanów niezdatności – czyli warunkiem jest **niezawodne dozowanie**. Działania aktywne w wielu przypadkach mogą mieć decydujące znaczenie.

Przypomnijmy tu trójwarstwowy model procesu eksploatacji, omówiony w [4] (Rys. 1).

System przeciwdestrukcyjny zawiera trzy moduły: osłonowy, interwencyjny i przeciwawaryjny. Każdy moduł zawiera dwa układy: układ diagnozująco-dozorujący i układ wykonawczy (odpowiednio: osłonowy, interwencyjny i ratunkowy). Aktywne utrzymywanie zdatności użytkowanego obiektu, czyli aktywne zwiększanie niezawodności zależy – rzecz jasna – od skuteczności układów wykonawczych (o czym



Rys. 1. Trójwarstwowy model procesu eksploatacji obiektu wyposażonego w układy dozorująco-terapeutyczne (w system przeciwdestrukcyjny)

decydują działania dostatecznie szybkie i adekwatne do sytuacji eksploatacyjnej).

Warunkiem niezbędnym skuteczności wykonawczych układów przeciwdestrukcyjnych są niezawodne i szybko uzyskiwane informacje dozorowe o stanie procesu destrukcyjnego. W tym sensie należy rozumieć uwarunkowanie aktywnego zwiększania niezawodności procesami dozorowania.

W wielu przypadkach (zwłaszcza w odniesieniu do obiektów elektronicznych) diagnozowanie sondujące i dozorowanie oparte jest na pomiarach słabych sygnałów diagnostycznych, a więc łatwo ulegających zakłóceniom. Uzasadnione jest zatem poszukiwanie metod pozwalających na **wykorzystywanie niepewnych wyników pomiarów w procesach niezawodnego diagnozowania i dozorowania – jako podstawy działań przeciwdestrukcyjnych.**

Zazwyczaj proces destrukcyjny oraz stan obiektu identyfikowane są na podstawie zbioru charakterystycznych symptomów czyli **syndromu**.

Każdy symptom identyfikowany jest na podstawie pomiaru (testu) jednej lub więcej charakterystycznych wielkości. Niepewności pomiarowe, zakłócenia mierzonych wielkości i inne przyczyny mogą powodować fałszowanie wyników pomiarów. Mogą też występować niepewności wnioskowania diagnostycznego. W rezultacie wynik identyfikacji jest niepewny.

Zauważmy, że identyfikacja czynników inicjujących, procesu uszkodzeniowego oraz stanu obiektu stanowi identyfikację pewnej, zaistniałej **sytuacji użytkowej**. Identyfikacja taka polega na rozpoznaniu **charakterystycznych symptomów** tworzących **syndrom charakteryzujący zaistniałą sytuację**. W najprostszym przypadku identyfikacja symptomu polega na stwierdzeniu tego, że wartość pewnej wielkości (jednej lub wielu) mieści się w wymaganym przedziale (symptom pozytywny) lub wykracza poza wymagany przedział (symptom negatywny). Wynik pomiaru **wielkości**

**symptomowej** może być fałszywy np. z powodu niewłaściwej metody pomiarowej lub zakłóceń nakładających się na wielkość rzeczywistą. Rys. 2a ilustruje przypadek fałszywego symptomu negatywnego, a rys. 2b przypadek fałszywego symptomu pozytywnego.

Jeśli identyfikacja symptomu polega na badaniu jednej wielkości to symptom ma postać jednowymiarową. Jeśli identyfikacja symptomu wymaga badania wielu wielkości to symptom ma postać wielowymiarową.

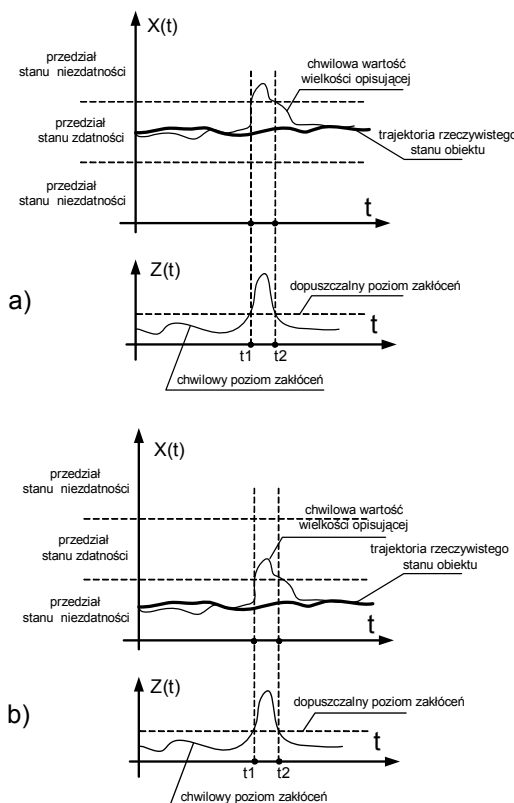
Rozpatrzmy nieco dokładniej przypadek najprostszy, w którym wszystkie symptomy są jednowymiarowe, a zbiór wyników badań każdej wielkości symptomowej zawiera dwie kategorie symptomów: symptomy pozytywne i symptomy negatywne.

Niezawodna identyfikacja symptomów i syndromu określonego stanu (lub określonej sytuacji eksploatacyjnej) może być oparta na **wielokrotnym powtarzaniu pomiarów i identyfikacji symptomów** oraz na wyznaczaniu ich wartości (tj. wyznaczaniu prawdopodobieństwa prawdziwości otrzymanych wyników badania) w oparciu o model matematyczny, który w skróconym zapisie, ma postać jak niżej.

Zauważmy, że podczas **testowania symptomowego**<sup>1</sup> mogą wystąpić cztery rodzaje zdarzeń:

**Zdarzenie nr 1** – polegające na  $L_i^0$ -krotnym wystąpieniu prawdziwego symptomu negatywnego  $Sm_i^0$  (w czasie testowania moduł jest w stanie niezdatności  $E^0$ ).

<sup>1</sup> **Test symptomowy** – procedura pomiaru, wnioskowania i jednokrotnej identyfikacji **symptomu stanu** określonego **modułu** obiektu (lub całego obiektu jeśli jest on traktowany jako jeden moduł diagnostyczny).



Rys. 2. Ilustracja zakłóceń, które mogą spowodować: a) fałszywy symptom negatywny; b) fałszywy symptom pozytywny

Oznaczenia:  $X(t)$  – wielkość opisująca stan (wielkość symptomowa);  $Z(t)$  – zakłócenia

Prawdopodobieństwo tego zdarzenia wyraża się zapisem:

$$p_i(0|0) = [P(\overline{Sm}_i^0 | \mathbf{E}_i^0)]^{L_i^0} = [R_{m,i}(0|0)]^{L_i^0} \quad (2)$$

gdzie:  $i$  – numer testowanego modułu;  $L_i^0$  – liczność podzbioru symptomów negatywnych;  $R_{m,i}(0|0)$  – prawdopodobieństwo jednokrotnego wystąpienia prawdziwego symptomu negatywnego.

• **Zdarzenie nr 2** – polegające na  $L_i^0$ -krotnym wystąpieniu fałszywego symptomu negatywnego  $\overline{Sm}_i^0$  (w czasie testowania moduł jest w stanie zdadności  $\mathbf{E}_i^1$ ). Prawdopodobieństwo tego zdarzenia wynosi:

$$p_i(0|1) = [P(\overline{Sm}_i^0 | \mathbf{E}_i^1)]^{L_i^0} = [R_{m,i}(0|1)]^{L_i^0} \quad (3)$$

gdzie:  $R_{m,i}(0|1)$  – prawdopodobieństwo jednokrotnego wystąpienia fałszywego symptomu negatywnego.

• **Zdarzenie nr 3** – polegające na  $L_i^1$ -krotnym wystąpieniu prawdziwego symptomu pozytywnego  $Sm_i^1$  (w czasie testowania moduł jest w stanie zdadności  $\mathbf{E}_i^1$ ). Prawdopodobieństwo tego zdarzenia można zapisać następująco:

$$p_i(1|1) = [P(Sm_i^1 | \mathbf{E}_i^1)]^{L_i^1} = [R_{m,i}(1|1)]^{L_i^1} \quad (4)$$

gdzie:  $R_{m,i}(1|1)$  – prawdopodobieństwo jednokrotnego wystąpienia prawdziwego symptomu pozytywnego.

• **Zdarzenie nr 4** – polegające na  $L_i^1$ -krotnym wystąpieniu fałszywego symptomu pozytywnego  $\overline{Sm}_i^1$  (w czasie testowania moduł jest w stanie niezadadności  $\mathbf{E}_i^0$ ).

Prawdopodobieństwo tego zdarzenia wynosi:

$$p_i(1|0) = [P(\overline{Sm}_i^1 | \mathbf{E}_i^0)]^{L_i^1} = [R_{m,i}(1|0)]^{L_i^1} \quad (5)$$

gdzie:  $R_{m,i}(1|0)$  – prawdopodobieństwo jednokrotnego wystąpienia fałszywego symptomu pozytywnego.

Przyjmijmy dodatkowo, dla jasności wnioskowania, że w czasie trwania **sesji symptomowej**<sup>2</sup> stan testowanego modułu nie zmienia się i jest jednym z dwu możliwych stanów: zdadności lub niezadadności.

Wobec tego może zajść tylko jedno z dwu zdarzeń złożonych:

**a) Zdarzenie  $Z_i^0$** . W czasie sesji symptomowej diagnozowany moduł jest w stanie **niezadadności**  $\mathbf{E}_i^0$  oraz wystąpił  $L_i^0$ -krotnie prawdziwy symptom negatywny  $\overline{Sm}_i^0$  i wystąpił  $L_i^1$ -krotnie fałszywy symptom pozytywny  $\overline{Sm}_i^1$ ; przypadek ten stanowi więc iloczyn trzech zdarzeń elementarnych. **Prawdopodobieństwo** tego złożonego zdarzenia  $Z_i^0$ , czyli prawdopodobieństwo a'posteriori **niezadadności modułu**, jest zatem iloczynem trzech prawdopodobieństw:

$$P(Z_i^0) \equiv P(\mathbf{E}_i^0) = (1 - R_{0,i}) p_i(0|0) p_i(1|0) \quad (6)$$

gdzie:  $R_{0,i}$  – prawdopodobieństwo a'priori stanu zdadności modułu o numerze „i”.

**b) Zdarzenie  $Z_i^1$** . W czasie sesji symptomowej diagnozowany moduł jest w stanie **zadadności**  $\mathbf{E}_i^1$  oraz wystąpił  $L_i^0$ -krotnie fałszywy symptom negatywny  $\overline{Sm}_i^0$  i wystąpił  $L_i^1$ -krotnie prawdziwy symptom pozytywny  $Sm_i^1$ ; stanowi to iloczyn trzech zdarzeń elementarnych. **Prawdopodobieństwo** tego złożonego zdarzenia  $Z_i^1$ , czyli prawdopodobieństwo a'posteriori **zadadności modułu**, jest iloczynem trzech prawdopodobieństw:

$$P(Z_i^1) \equiv P(\mathbf{E}_i^1) = R_{0,i} p_i(0|1) p_i(1|1) \quad (7)$$

W konsekwencji powyższych stwierdzeń możemy przyjąć, że:

– **warunkowe prawdopodobieństwo zdarzenia polegającego na tym, że diagnozowany moduł jest w stanie niezadadności** przedstawia wyrażenie:

<sup>2</sup> **Sesja symptomowa** – procedura  $L_{Sm}$ -krotnej identyfikacji **symptomu stanu** określonego **modułu** obiektu (tj. procedura polegająca na  $L_{Sm}$ -krotnym powtórzeniu testu symptomowego).

$$P_{wi}(\mathbf{E}_i^0) = \frac{P(\mathbf{E}_i^0)}{P(\mathbf{E}_i^0) + P(\mathbf{E}_i^1)} = P(\text{Sm}_i^0) \quad (8)$$

Wyrażenie (8) stanowi **warunkową wartość symptomu negatywnego**  $\text{Sm}_i^0$ , wynikającą z wielokrotnego testowania modułu o numerze „i”;

– **warunkowe prawdopodobieństwo zdarzenia polegającego na tym, że diagnozowany moduł jest w stanie zdatności** przedstawia wyrażenie:

$$P_{wi}(\mathbf{E}_i^1) = \frac{P(\mathbf{E}_i^1)}{P(\mathbf{E}_i^0) + P(\mathbf{E}_i^1)} = P(\text{Sm}_i^1) \quad (9)$$

Wyrażenie (9) stanowi **warunkową wartość symptomu pozytywnego**  $\text{Sm}_i^1$ , wynikającą z wielokrotnego testowania modułu o numerze „i”.

Jest oczywiste, że dla dwuelementowego zbioru możliwych stanów modułu spełnione jest równanie:

$$P_{wi}(\mathbf{E}_i^0) + P_{wi}(\mathbf{E}_i^1) = 1 \quad (10)$$

oraz

$$P(\text{Sm}_i^1) + P(\text{Sm}_i^0) = 1 \quad (11)$$

Sesję symptomową należy kontynuować, aż do spełnienia jednego z warunków granicznych:

$$P_{wi}(\mathbf{E}_i^0) \geq P_{i,gr}^0 \quad (12)$$

lub

$$P_{wi}(\mathbf{E}_i^1) \geq P_{i,gr}^1 \quad (13)$$

przy czym uzasadnione jest przyjęcie granicznej wartości prawdopodobieństwa stanu modułu bliskiej jedności:

$$0,5 \ll P_{i,gr} \leq 1 \quad (14)$$

Spełnienie granicznego warunku (12) lub (13) implikuje **wiarygodną** diagnozę stanu modułu tj. **diagnozę symptomową**. Oznaczmy – dla wyróżnienia – wartość symptomu spełniającego warunek graniczny wiarygodnej diagnozy jako:  $P_{wi}^*$ .

Pamiętając, że syndromem stanu obiektu jest zbiór pozyskanych w badaniu diagnostycznym symptomów, możemy przyjąć, iż **wartość syndromu k-tego stanu obiektu** jest nie mniejsza niż iloczyn granicznych wartości symptomów  $P_{wi}^*$ :

$$P(\text{Sn}, \mathbf{E}_{ob}^k) \geq \prod_{i=1}^N P_{wi}^* \quad (15)$$

przy czym:

N – liczba objętych badaniem diagnostycznym modułów obiektu;

k – numer stanu obiektu,  $k \in L(\mathbf{E}_{ob})$ ;

$L(\mathbf{E}_{ob}) = 2^N$  – licznosc zbioru możliwych kombinacji stanów modułów czyli licznosc zbioru rozróżnialnych stanów obiektu.

Sprawdzenie czy wartość uzyskanego – w powyższym postępowaniu – syndromu jest niemniejsza od wartości wymaganej stanowi istotę **syndromowej komparacji wartościującej**. Zagadnienie to omówiono dokładniej w [3, 6].

Dla ilustracji podanego powyżej wnioskowania symptomowo-syndromowego rozpatrzmy przypadek diagnozowania stanu obiektu złożonego z  $M_i$

modułów ( $i = 1, 2, \dots, N$ ). Każdy z tych modułów może znajdować się w jednym z dwu stanów tj. w stanie zdatności lub w stanie niezdatności. Stany modułów są od siebie niezależne. Obiekt uznajemy za zdalny tylko wtedy, gdy wszystkie moduły są zdalne. W konsekwencji liczba stanów zdalności obiektu wynosi:

$$L(\mathbf{E}_{ob}^1) = 1 \quad (16)$$

zaś liczba rozróżnialnych stanów niezdatności obiektu wynosi:

$$L(\mathbf{E}_{ob}^0) = 2^N - 1 \quad (17)$$

Zakładamy, że stan każdego modułu  $M_i$  opisywany jest wystarczająco wiarygodnie **jednym** symptomem  $\text{Sm}_i$ , który może przyjmować wartość logiczną „1” gdy moduł jest w stanie zdalności lub wartość logiczną „0” gdy moduł jest w stanie niezdatności:

$$\mathbf{E}(M_i) \equiv \mathbf{E}_i^1 \Rightarrow \text{Sm}_i^1 = 1 \quad (18)$$

$$\mathbf{E}(M_i) \equiv \mathbf{E}_i^0 \Rightarrow \text{Sm}_i^0 = 0 \quad (19)$$

Symptomy o wartości logicznej „1” nazwijmy **symptomami pozytywnymi**, zaś symptomy o wartości logicznej „0” nazwijmy **symptomami negatywnymi**.

Informacji o stanie obiektu dostarcza syndrom (czyli zbiór symptomów). Wartość logiczna syndromu wyznaczona jest przez iloczyn wartości logicznych symptomów. Zerowy wynik tego iloczynu oznacza stan niezdatności obiektu.

Symptom pozytywny jest uznawany za wiarygodny gdy jego wartość jest niemniejsza od określonej wartości granicznej. Symptom spełniający ten warunek implikuje wiarygodną informację o **stanie zdalności modułu**:

$$[P(\text{Sm}_i^1) \geq P_{i,gr}^1] \Rightarrow [\mathbf{E}(M_i) \equiv \mathbf{E}_i^1] \quad (20)$$

Analogicznie należy wnioskować w przypadku symptomu negatywnego:

$$[P(\text{Sm}_i^0) \geq P_{i,gr}^0] \Rightarrow [\mathbf{E}(M_i) \equiv \mathbf{E}_i^0] \quad (21)$$

W celu sformułowania dostatecznie wiarygodnej diagnozy stanu obiektu należy przyjąć odpowiednio duże graniczne wartości każdego syndromu stanu obiektu  $\mathbf{E}_{ob}^k$ .

$$0,5 \ll P_{ob,gr}^k \leq 1 \quad (22)$$

Często, dla uproszczenia, przyjmuje się jednakowe graniczne wartości wszystkich syndromów rozróżnianych stanów obiektu.

Spełnienie warunku granicznego wartości syndromu stanu  $\mathbf{E}_{ob}^k$  implikuje wiarygodną diagnozę o k-tym stanie obiektu, co można zapisać:

$$[P(\text{Sn}, \mathbf{E}_{ob}^k) \geq P_{ob,gr}^k] \Rightarrow [\mathbf{E}_{ob} \equiv \mathbf{E}_{ob}^k] \quad (23)$$

W przypadku gdy żaden syndrom nie spełnia warunku (23) należy kontynuować **sesję syndromową**<sup>3</sup> aż do uzyskania wymaganej wartości syndromu.

<sup>3</sup> **Sesja syndromowa** – procedura  $L_{\text{Sn}}$ -krotnej identyfikacji **syndromu** stanu obiektu tj. procedura



Zauważmy, że sytuacja taka może występować stosunkowo często w przypadku **silnych zakłóceń** wpływających na niską wartość symptomów. Wystarczająco wiarygodna **diagnoza syndromowa** musi wówczas opierać się na odpowiednio licznych zbiorze **testów syndromowych**<sup>4</sup> stanowiących sesję syndromową.

Syndrom o największej wartości implikuje efektywną diagnozę stanu obiektu; **wartość diagnozy** czyli inaczej **niezawodność diagnozy** jest równa wartości tego syndromu:

$$R_D = \max_{k \in L(\mathbf{E}_{ob})} (P(\mathbf{S}_n, \mathbf{E}_{ob}^k)) \quad (24)$$

## 2. DIAGNOZOWANIE W PRZYPADKU NIEPEWNYCH SYMPTOMÓW

W oparciu o model opisany powyżej (2÷24) przeprowadzono diagnostyczny eksperyment symulacyjny na obiekcie, który może znajdować się w jednym z dwu stanów: w stanie zdatności ( $k=1$ ) lub w stanie niezdatności ( $k=0$ ). W wyniku eksperymentu wyznaczone zostały przykładowe przebiegi wartości dwu alternatywnych syndromów: pozytywnego i negatywnego oraz przebieg niezawodności diagnozy (zgodnie z warunkiem (24)). Wykresy tych wielkości w funkcji liczby sesji syndromowych pokazano na rysunkach 3 i 4. Dla porównania – na wykresach tych – pokazany został obraz rzeczywistego stanu obiektu – w rozważanym przypadku jest to stan zdatności. Przyjęto – dla przykładu – początkowe, a'prioryczne prawdopodobieństwo stanu zdatności równe:

$$R(t_0) = R_D(L_{Sn} = 0) = 0,8 \quad (\text{dla przypadku jak na Rys. 3);}$$

$$R(t_0) = R_D(L_{Sn} = 0) = 0,5 \quad (\text{dla przypadku jak na Rys. 4)}$$

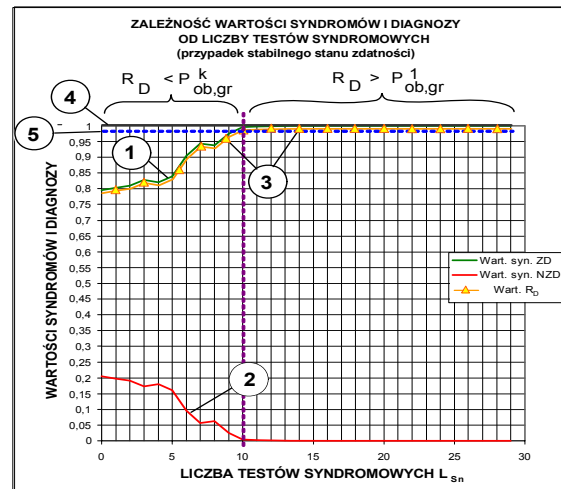
gdzie:  $L_{Sn}$  – liczba zrealizowanych testów syndromowych.

Jeśli założymy, że diagnoza (informacja dozorowa) może zostać uznana za wiarygodną wówczas, gdy spełniony jest **warunek**:

$$R_D \geq P_{ob,gr}^k = 0,99 \quad k = 0 \text{ lub } 1 \quad (25)$$

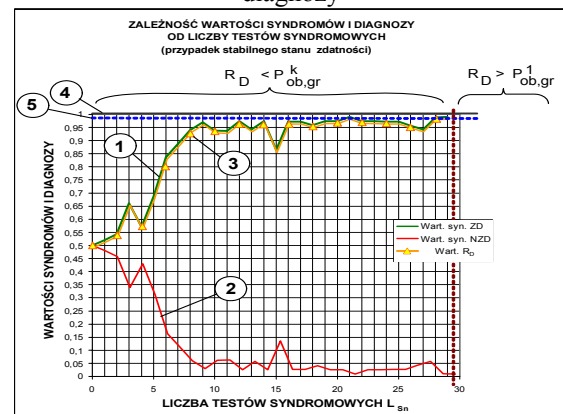
to, jak wynika z wykresów pokazanych na Rys. 3, diagnoza może być przyjęta po wykonaniu 10 sesji syndromowych, a w przypadku jak na Rys. 4 nawet wykonanie 30 testów można uznać za niewystarczające. Diagnosta powinien zwiększać liczbę sesji (tj. liczbę zidentyfikowanych syndromów), aż do stabilnego spełnienia warunku (25), gdyż to dopiero pozwala przyjąć, że

formułowana **diagnoza ma wymaganą wiarygodność.**



Rys. 3. Ilustracja diagnozowania dla przypadku gdy obiekt jest w stanie zdatności

*Oznaczenia:* 1 – funkcja wartości syndromu pozytywnego; 2 – funkcja wartości syndromu negatywnego; 3 – funkcja niezawodności (wartości) diagnozy; 4 – obraz rzeczywistego stanu obiektu; 5 – wartość progowa wiarygodnej diagnozy



Rys. 4. Ilustracja diagnozowania dla przypadku gdy obiekt jest w stanie zdatności

*Oznaczenia:* 1 – funkcja wartości syndromu pozytywnego; 2 – funkcja wartości syndromu negatywnego; 3 – funkcja niezawodności (wartości) diagnozy; 4 – obraz rzeczywistego stanu obiektu; 5 – wartość progowa wiarygodnej diagnozy

## 3. DOZOROWANIE W PRZYPADKU NIEPEWNYCH SYMPTOMÓW

W oparciu o model opisany powyżej (2÷24) rozpatrzmy przypadek obiektu, który jest w stanie zdatności lub w stanie niezdatności z takim samym – początkowo – prawdopodobieństwem:

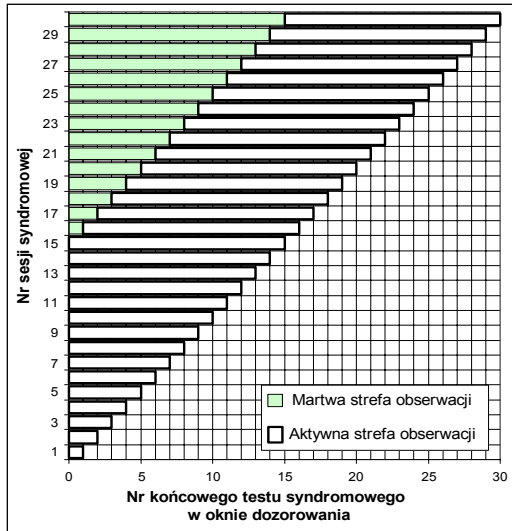
$$R(t_0) = R_D(L_{Sn} = 0) = 0,5$$

Przyjmijmy, dla ułatwienia wnioskowania o wiarygodności uzyskiwanych wyników procesu dozorowania, że rzeczywisty stan obiektu (nieznany

polegająca na  $L_{Sn}$ -krotnym powtórzeniu testu syndromowego.

<sup>4</sup> **Test syndromowy** – procedura jednokrotnej identyfikacji **syndromu stanu** obiektu (najczęściej jest to procedura składająca się z  $L_{Sm} = N$  procedur symptomowych;  $N$ -liczba diagnozowanych modułów obiektu).

a priori) jest stanem zdatności i zmienia się skokowo na stan niezdatności w czasie realizacji procesu dozorowania. Przyjmijmy, że podstawą obliczeń i wnioskowania diagnostycznego są wyniki pomiarów uzyskiwane w **oknie dozorowania**<sup>5</sup> o długości 15-u testów syndromowych (Rys. 5).



Rys. 5. Ilustracja „okna dozorowania” o długości  $L_{Sn} = 15$  testów syndromowych

Załóżmy, że w rozważanym przypadku, diagnoza (informacja dozorowa) uznawana jest za **wiarygodną**, gdy spełniony jest warunek:

$$R_D \geq P_{ob,gr}^k = 0,95 \quad k = 0 \text{ lub } 1 \quad (26)$$

W rezultacie wykonywanych cyklicznie testów syndromowych wyznaczane są przebiegi wartości dwu alternatywnych syndromów: pozytywnego i negatywnego oraz funkcja niezawodności informacji dozorowej (diagnozy) określona zgodnie z warunkiem (24). Wyniki procesu pomiarowo-analitycznego ilustruje Rys.6. Dla ułatwienia wnioskowania diagnostycznego, na rysunku tym, zaznaczono rzeczywisty stan obiektu dozorowanego. Wykresy wymienionych wielkości sporządzono w funkcji liczby zrealizowanych testów syndromowych.

Na podstawie przyjętych założeń diagnosta może uznać informację dozorową za dostatecznie wiarygodną jeśli spełniony jest warunek (26), czyli gdy  $R_D \geq 0,95$ . Jak wynika z rysunku 6 warunek ten jest spełniony w przedziale 6÷20 testów dla syndromu stanu zdatności oraz w przedziale powyżej 23 testu dla syndromu stanu niezdatności. W przedziale do 5 testu oraz w przedziale 21÷23 testy wartość diagnozy warunku tego nie spełnia. Zatem żadnej diagnozy nie można uznać za wiarygodną.

<sup>5</sup> **Okno dozorowania** – czas trwania sesji syndromowej (inaczej: czas niezbędny na wykonanie  $L_{Sn}$  testów syndromowych stanowiących podstawę diagnozy sesyjnej); liczba testów syndromowych, których wyniki stanowią podstawę wnioskowania diagnostycznego.

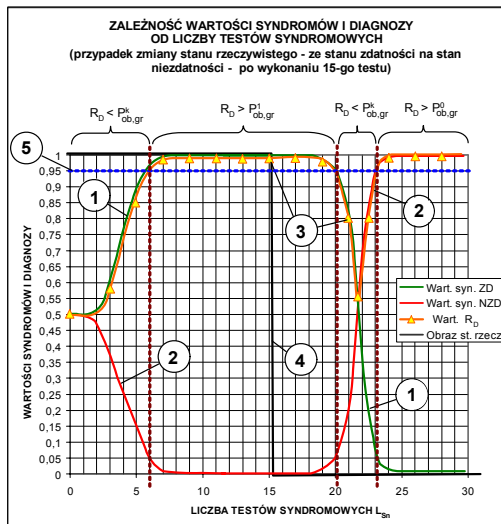
W przypadku dozorowania istnieją trzy charakterystyczne wielkości (Rys. 5 i Rys. 6):

- długość okna dozorowania;
- wartość pierwszego opóźnienia wiarygodnej informacji dozorowej, to jest przedział między rzeczywistą zmianą stanu a spadkiem wartości diagnozy poniżej wartości wymaganej (w przypadku pokazanym na rysunku 6 jest to czas równy wykonaniu 5 testów syndromowych);
- wartość drugiego opóźnienia wiarygodnej informacji dozorowej, to jest przedział między rzeczywistą zmianą stanu a ponownym wzrostem wartości diagnozy powyżej wartości wymaganej (w przypadku pokazanym na rysunku 6 jest to czas równy wykonaniu 8 testów syndromowych).

Długości opóźnień dozorowania zależą od prawdopodobieństwa zafałszowania symptomów i od przyjętej długości okna dozorowania. Należy dążyć do minimalizacji tych opóźnień gdyż wpływają niekorzystnie na czas realizacji działań terapeutycznych, a tym samym **na niezawodność wykonania zadania**.

#### 4. PODSUMOWANIE

1. Zauważmy, że w przypadku gdy prawdopodobieństwo pojawienia się błędnego symptomu zdąża do zera to wynik diagnozowania niepewnego zdąża do wyniku diagnozowania pewnego. **Zatem diagnozowanie niepewne można uważać za uogólnioną formę diagnozowania.**
2. Przeprowadzone eksperymenty diagnostyczne potwierdzają możliwość uzyskiwania diagnoz chwilowych o wysokiej niezawodności pomimo dużej niepewności symptomów. Wymaga to jednak opierania wnioskowania na wynikach sesji diagnostycznych o odpowiednio długich „oknach” dozorowania. Takie postępowanie wprowadza zwłokę czasową w wykryciu zmiany stanu. Z tego powodu - w przypadku dozorowania stanów szybkozmiennych - dla zmniejszenia tej zwłoki, należy stosować dozorowanie wielotorowe, zmienno-programowe [9, 10].
3. Opisana metoda dozorowania stanu w zasadzie nie wymaga znajomości rozkładu zakłóceń. Wystarczające jest stwierdzenie, że prawdopodobieństwa prawdziwości wyznaczonych symptomów pozytywnych i negatywnych są większe od 0,5.
4. Omówiona metoda diagnozowania i dozorowania stanu nie wymaga dokładnej znajomości prawdopodobieństw a priori zdatności poszczególnych modułów obiektu. Dopuszczalne jest założenie, że wartości tych prawdopodobieństw wynoszą po 0,5.



Rys. 6. Ilustracja przebiegu dozoru stanu obiektu, w którym zachodzi zmiana stanu zdadności na stan niezadadności

Oznaczenia: 1 – funkcja wartości syndromu pozytywnego; 2 – funkcja wartości syndromu negatywnego; 3 – funkcja wartości (niezawodności) informacji dozoru (diagnozy); 4 – obraz rzeczywistego stanu obiektu; 5 – wartość progowa wiarygodnej diagnozy

#### Literatura

- [1] Będkowski L., Dąbrowski T.: *Podstawy eksploatacji, cz. 1. Podstawy diagnostyki technicznej*. Wyd. WAT Warszawa 2000, ss. 110.
- [2] Będkowski L.: *Wielopoziomowe systemy dozoru terapeutycznego*. Biuletyn WAT nr 5/2004, Warszawa 2004, ss. 5÷17.
- [3] Będkowski L., Dąbrowski T.: *Diagnozowanie na podstawie niepewnych syndromów stanu obiektu*. Diagnostyka, PTDT, Vol. 37, 2006, ss. 55÷60.
- [4] Będkowski L., Dąbrowski T.: *Podstawy eksploatacji, cz. 2. Podstawy niezawodności eksploatacyjnej*. Wyd. WAT, Warszawa 2006, ss. 188.
- [5] Będkowski L., Dąbrowski T.: *Wpływ komparacyjnego diagnozowania efektu na niezawodność systemu*. XXXIV Zimowa Szkoła Niezawodności „Niekonwencjonalne metody badania niezawodności”, Szczyrk, 9÷14.01.2006, ss. 41÷53.
- [6] Będkowski L.: *Diagnozowanie z dwupoziomą komparacją niepewnych symptomów i syndromu stanu obiektu*. Diagnostyka, PTDT, Vol. 2(38)/2006, ss. 109÷114.
- [7] Będkowski L., Dąbrowski T.: *Modele komparatywnego wyboru diagnozy*. XXXIII Ogólnopolskie Sympozjum „Diagnostyka Maszyn”. Węgierska Górka, 6.03-11.03.2006, Wyd. Politechniki Śląskiej, ss. 7÷14.
- [8] Będkowski L., Dąbrowski T.: *Aktywne zwiększanie niezawodności w procesach eksploatacyjnych*. XXXV Zimowa Szkoła

Niezawodności „Problemy niezawodności systemów”, Szczyrk, 8÷12.01.2007, ss. 71÷83.

- [9] Będkowski L., Dąbrowski T.: *Niepewność w procesach dozoru środków transportu – dozowanie jednocanalowe*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, z.62 Transport. Warszawa 2007, ss. 35÷42.
- [10] Będkowski L., Dąbrowski T.: *Niepewność w procesach dozoru środków transportu – dozowanie dwucanalowe*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, z.62 Transport. Warszawa 2007, ss. 43÷50.
- [11] Fidelis E., Firkowicz S., Grzesiak K., Kołodziejcki J., Wiśniewski K.: *Matematyczne podstawy oceny niezawodności*. Wyd. PWN Warszawa 1966, ss. 276.
- [12] Firkowicz S.: *Statystyczne badanie wyrobów*. WNT. Warszawa 1970, ss. 369.
- [13] Grabski F., Jaźwiński J.: *Metody bayesowskie w niezawodności i diagnostyce*. WKiŁ, Warszawa 2001.
- [14] Ott H. W.: *Metody redukcji zakłóceń i szumów w układach elektronicznych*. WNT, Warszawa 1979.
- [15] Opr. pod redakcją J. Korbicz, K. Patan, M. Kowal: *Diagnostyka procesów i systemów*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2007, ss. 456.



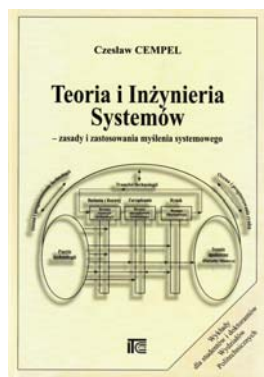
diagnostyki systemów bezpieczeństwa.

Prof. dr hab. inż. **Lesław BĘDKOWSKI** pracuje w Wydziale Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Jest specjalistą w zakresie teorii diagnostyki technicznej, diagnostyki systemów antropotechnicznych, teorii użytkowania w ujęciu wieloprocessowym oraz



antropotechnicznych.

Dr hab. inż. **Tadeusz DĄBROWSKI** jest profesorem nadzwyczajnym i pełni funkcję dyrektora Instytutu Systemów Elektronicznych Wydziału Elektroniki WAT. Zainteresowania naukowe koncentruje w obszarze teorii eksploatacji - a w tym głównie na zagadnieniach diagnostyki technicznej obiektów i systemów



**Czesław CEMPEL**

***Teoria i inżynieria systemów***

*Wydanie drugie –  
rozszerzone.*

**ITE Radom, 2008**

Książka stanowi znakomite kompendium wiedzy z teorii i inżynierii systemów. Zaprezentowano w niej klasyczne modele wzrostu systemów oraz metody twórczego myślenia. W odróżnieniu jednak od wielu podręczników i skryptów książka przedstawia także najnowsze osiągnięcia inżynierii wiedzy, w tym inżynierii wirtualnej, co więcej przybliży czytelnikowi algorytmy i procedury dostępu do zasobów wiedzy w sieci i sposoby jej wykorzystania. Wyraźnie daje się odczuć, po lekturze tekstu książki, że zagadnienia w niej poruszane pasjonują Autora, zostały głęboko przemyślane na gruncie filozoficznym i egzystencjalnym i że przekazywane treści mają bardzo zindywidualizowany charakter.

Studując poszczególne rozdziały, czytelnik przechodzi od ogólnych definicji teorii systemów, poprzez modele szczegółowe, przykłady ich rozwiązania, na adaptacji w warunkach gospodarczych kończąc. Książka ma charakter hipertekstowy, a więc każdy kogo jakieś zagadnienie interesuje, w szczególności może je pogłębić korzystając z bardzo aktualnych pozycji literaturowych bądź przytoczonych linków do sieci www.

Autor podkreśla, że jesteśmy świadkami przełomu cywilizacyjnego, który związany jest z kształtowaniem się społeczeństw informacyjnych, stawiających w centrum swoich zainteresowań rozwój cywilizacji wiedzy. Niesie to ze sobą nowe wyzwania dla nauki i edukacji. Jak wielu współczesnych wybitnych intelektualistów, Autor recenzowanej książki do najważniejszych wyzwań nowej epoki zalicza powszechność i poziom wykształcenia warunkujących możliwość wykorzystania i efektywnego użytkowania wiedzy, podstawowego dobra cywilizacji informatycznej. Wymaga to ukształtowania nowego, holistycznego widzenia świata, które dzięki systemowemu ujęciu pozwoli porządkować intensywny wzrost informacji.

# Diagnostyka

Obszar zainteresowania czasopisma to:

- ogólna teoria diagnostyki technicznej
- eksperymentalne badania diagnostyczne procesów i obiektów technicznych;
- modele analityczne, symptomowe, symulacyjne obiektów technicznych;
- algorytmy, metody i urządzenia diagnozowania, prognozowania i genezowania stanów obiektów technicznych;
- metody detekcji, lokalizacji i identyfikacji uszkodzeń obiektów technicznych;
- sztuczna inteligencja w diagnostyce: sieci neuronowe, systemy rozmyte, algorytmy genetyczne, systemy ekspertowe;
- diagnostyka energetyczna systemów technicznych;
- diagnostyka systemów mechatronicznych i antropotechnicznych;
- diagnostyka procesów przemysłowych;
- diagnostyczne systemy utrzymania ruchu maszyn;
- ekonomiczne aspekty zastosowania diagnostyki technicznej;
- analiza i przetwarzanie sygnałów.

Topics discussed in the journal:

- General theory of the technical diagnostics,
- Experimental diagnostic research of processes, objects and systems,
- Analytical, symptom and simulation models of technical objects,
- Algorithms, methods and devices for diagnosing, prognosis and genesis of condition of technical objects,
- Methods for detection, localization and identification of damages of technical objects,
- Artificial intelligence in diagnostics, neural nets, fuzzy systems, genetic algorithms, expert systems,
- Power energy diagnostics of technical systems,
- Diagnostics of mechatronic and antropotechnic systems,
- Diagnostics of industrial processes,
- Diagnostic systems of machine maintenance,
- Economic aspects of technical diagnostics,
- Analysis and signal processing.

*Wszystkie opublikowane artykuły uzyskały pozytywne recenzje wykonane przez niezależnych recenzentów.*

*All the published papers were reviewed positively by the independent reviewers.*

---

Druk:

Centrum Graficzne „GRYF”, ul. Pieniężnego 13/2, 10-003 Olsztyn, tel. / fax: 089-527-24-30

Oprawa:

Zakład Poligraficzny, UWM Olsztyn, ul. Heweliusza 3, 10-724 Olsztyn  
tel. 089-523-45-06, fax: 089-523-47-37

