# DIAGNOZA - GENEZA - PROGNOZA => PODSTAWA KAŻDEJ DECYZJI





# Nr 3(39)/2006

# **RADA PROGRAMOWA**

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

*REDAKTOR NACZELNY:* prof. dr hab. inż. **Ryszard MICHALSKI** *UWM w Olsztynie* 

CZŁONKOWIE:

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

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

prof. dr hab. inż. Walter BARTELMUS Politechnika Wrocławska

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 – Szwecja

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

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

prof. dr hab. inż. Jerzy KISILOWSKI Politechnika Warszawska prof. dr hab. inż. **Wojciech MOCZULSKI** *Politechnika Śląska* 

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

prof. Vasyl OSADCHUK Politechnika Lwowska – Ukraina

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 – Anglia

prof. Vasily S. SHEVCHENKO BSSR Academy of Sciences Mińsk – Białoruś

prof. Menad SIDAHMED University of Technology Compiegne – Francja

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

prof. Vitalijus VOLKOVAS Kaunas University - Litwa

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

prof. Alexandr YAVLENSKY Aerospace University Sankt Petersburg – Rosja

prof. dr hab. inż. Bogdan ŻÓŁTOWSKI ATR w Bydgoszcz

Wszystkie opublikowane prace uzyskały pozytywne recenzje wykonane przez niezależnych recenzentów. Obszar zainteresowania czasopisma to problemy diagnostyki, identyfikacji stanu technicznego i bezpieczeństwa maszyn, urządzeń, systemów i procesów w nich zachodzących. Drukujemy oryginalne prace teoretyczne, aplikacyjne, przeglądowe z badań, innowacji i kształcenia w tych zagadnieniach.

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:

Uniwersytet Warmińsko – Mazurski w Olsztynie Katedra Budowy, Eksploatacji Pojazdów i Maszyn 10-736 Olsztyn, ul. Oczapowskiego 11 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 Przemysłowo Handlowy S.A. II O/ Warszawa nr konta: 40 1060 0076 0000 3200 0046 1123

NAKŁAD: 270 egzemplarzy

# Spis Treści

Słowo wstępne – Lesław BĘDKOWSKI	6
Grzegorz WOJNAR, Bogusław ŁAZARZ, Zbigniew STANIK – Politechnika Śląska	7
Diagnozowanie łożysk tocznych metodą analizy drgań	
Grzegorz RUBIN, Mirosław OMIELJANOWICZ – Politechnika Białostocka	13
Środowisko do szybkiego prototypowania systemów do diagnostyki w czasie rzeczywistym Rapid Prototyping Enivironment For Diagnosis Real Time Systems	
Jarosław SMOCZEK, Janusz SZPYTKO – AGH Kraków	19
Metodyka kształtowania procesu sterowania środkiem transportu ukierunkowana na wymagany jego stan techniczny Supervision Methodology Of Control Process Of Transport Device Focusing On His Overlooked	
Technical State	
Joanna SOSZYŃSKA – Akademia Morska w Gdyni	25
Analiza bezpieczeństwa systemów wielostanowych w zmiennych warunkach eksploatacji Multi State System Safety Anglysis In Changing Operation Conditions	
Munt-state System Safety Analysis in Changing Operation Conditions	
Henryk TYLICKI – ATR Bydgoszcz	35
The Procedures Of Condition Machines Investigation In Past	
Grzegorz WOJNAR, Bogusław ŁAZARZ – Politechnika Śląska	41
Wykrywanie różnych uszkodzeń kół przekładni zębatych The Mathed Legging Of Pagidugi And Differential Signale For Cogn Working With Variables	
The Rotational Speeds And Loads	
Dariusz LASKOWSKI, Ireneusz KRYSOWATY, Paweł NIEDZIEJKO – WAT Warszawa	59
Skaner bezpieczeństwa jako narzędzie diagnostyczne Security Scanners As Diagnostic Tool	
Jerzy LEWITOWICZ – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych w Warszawie	69
Genezowanie zdarzeń eksploatacyjnych Genesis Of Happening Maintenance And Operation (Exploatation)	
Wojciech BREJWO, Jacek PAŚ – WAT Warszawa	79
Diagnostyka pól elektromagnetycznych w wybranych stacjach radiolokacyjnych Diagnostics Of Electromagnetic Fields In Chosen Radar Stations	
Wojciech WAWRZYŃSKI, Mirosław SIERGIEJCZYK – Politechnika Warszawska	87
Metody diagnozowania linii abonenckich z wykorzystaniem robota pomiarowego Methods Of Diagnosis Of The Subscriber's Lines With Using Of The Measuring Robot	
Memous Of Diagnosis Of the Subscriber's Lines with Osing Of the Measuring Robbi	
Andrzej DOBROWOLSKI, Piotr KOMUR, Kazimierz TOMCZYKIEWICZ – WAT Warszawa	95
Diagnose Of Muscle Condition On The Basis Of Mup Spectral Analysis	
Józef BŁACHNIO – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych w Warszawie	101
Określenie rozkładu naprężeń własnych w funkcji głębokości warstwy wierzchniej elementu maszyny The Assessment Of Internal Stress Distribution Against Depth Of The Machine Component's Surfac	v e Layer
Marta PAWŁOWSKA, Marcin WITCZAK – Uniwersytet Zielonogórski	109
Obserwatory o nieznanym wejściu w diagnostyce układu dwóch zbiorników Unknown Input Observers In Fault Diagnosis Of A Two-Tank System	
Tomasz GAŁKA – Instytut Energetyki w Warszawie	117
Symptomy drganiowe w diagnostyce turbin przeciwprężnych i upustowych Vibration Based Symptoms In The Diagnostics Of Counter Programs And Tapped Turbings	
r toration-based symptoms in the Diagnosites Of Counter-i ressure And tupped turbines	

Piotr BASZUN, Henryk KRÓL, Marek PISZCZEK – WAT Warszawa	5
Jan CHUDZIKIEWICZ, Krzysztof MURAWSKI – WAT Warszawa	1
Mieczysław PLICH – Politechnika Warszawska	7
Barbara KUCHARSKA – Politechnika Opolska	.3
Maciej TABASZEWSKI – Politechnika Poznańska	.9
Janusz MIKOŁAJCZYK, Zbigniew BIELECKI – WAT Warszawa	5
<ul> <li>Barbara KUCHARSKA – Politechnika Opolska</li> <li>Pomiary porównawcze deskryptora akustycznego A<sub>rms</sub> dla różnych form wyładowań niezupełnych, występujących w układach izolacyjnych transformatorów</li> <li>Comparative Measurments Of Acoustic Descriptors For Various Forms Of Partial Discharges</li> <li>Occuring In The Insulation Systems Of Transformers</li> </ul>	1
Adam KOTOWSKI – Politechnika Białostocka	5
Paweł OSTAPKOWICZ – Politechnika Białostocka	'1 n
<ul> <li>Paweł LINDSTEDT – Politechnika Białostocka</li></ul>	'9
Marek KUCHTA, Krzysztof KWIATOS, Krzysztof FOKOW – WAT Warszawa	7
Andrzej MICHALSKI, Andrzej KALICKI – Politechnika Warszawska	3
Aleksander JASTRIEBOW, Stanisław GAD, Grzegorz SŁOŃ – Politechnika Świętokrzyska	9

Zbigniew ZIELIŃSKI – WAT Warszawa Model symulacyjny procedur diagnostycznych w rozproszonych systemach sieciowych The Simulation Model Of Distributed Network System Diagnostic Procedures	209
Jacek JAKUBOWSKI, Marek PISZCZEK, Piotr BASZUN – WAT Warszawa Badanie możliwości technicznego wspomagania oceny stanu biodegradacji drzew Research On Technically Aided Assessment Of Biodegradation In Trees	215
Radosław ZIMROZ – Politechnika Wrocławska Modelowanie sygnałów drganiowych generowanych przez przekładnie planetarne w warunkach zmiennego obciążenia Modelling Of Vibration Signals Generated By Planetary Gearbox Under Time Varying Load Condition.	219 s
Jan Maciej KOŚCIELNY, Michał SYFERT, Paweł WNUK – Politechnika Warszawska System zaawansowanego monitorowania i diagnostyki procesów przemysłowych 'AMandD' Advanced Monitoring And Diagnostic System Of Industrial Processes 'AMandD'	229
Piotr BASZUN, Henryk KRÓL – WAT Warszawa. Ocena współpracy tensometrycznych przetworników siły stosowanych w systemach ważenia Evaluation Of Cooperation Multiple Strain Gange Force Sensors In Load Measurement Systems	239
Janusz PŁOMIŃSKI – Wojskowy Instytut Medyczny, Zbigniew WATRAL, Andrzej MICHALSKI, Jan SIENKIEWICZ – WAT Warszawa Ocena stabilności zamocowania sztucznej panewki stawu biodrowego Fixing Stability Assesment Of Artificial Acetabulum Of A Hip Joint	245
Adam BARYLSKI – Politechnika Gdańska Systemy automatycznej kontroli wymiarowej mikroziaren ściernych Automatic Control Systems Of Abrasive Micrograins Size	253
Marcin BEDNAREK – Politechnika Rzeszowska, Tadeusz DĄBROWSKI – WAT Warszawa Rezerwa potencjałowa w układzie komunikacji – wybrane aspekty A Potential Redundancy Of A Communication System – Selected Aspects	259
Andrzej GRZĄDZIELA – Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni Identyfikacja niewyważenia wirników okrętowych turbinowych silników spalinowych w trybie off line Identyfication Of Rotor Unbalancing Of Gas Turbine Engines Using Off Line Proceduress	263
Andrzej MICHALSKI, Jan SIENKIEWICZ, Zbigniew WATRAL – WAT Warszawa Metody pomiaru przepływu na małych otwartych kanałach przepływowych Evaluation Of Flow Monitoring Methods In Small Open Channels	269
Henryk BOROWCZYK, Radosław KWIECIŃSKI – Politechnika Białostocka Ekspertowy system diagnostyczny układu sterowania dopalaczem turbinowego silnika odrzutowego The Diagnostic Expert System Of The Afterburner Control System	279
Jerzy SENDKOWSKI – Politechnika Świętokrzyska. Problemy diagnostyki technicznej obiektów budowlanych Problems Of Technical Diagnostics Of Structures	285
Tomasz BOJKO, Grzegorz CHMAJ – AGH Kraków Bezprzewodowy system pomiarowo-diagnostyczny Wireless Measurement System	291
Dariusz CHALECKI – Politechnika Warszawska Algorytm minimalizacji sygnatur uszkodzeń The Algorithm of Fault Signatures Minimization	297
Zbigniew DĄBROWSKI – Politechnika Warszawska Zastosowanie prostych modeli dynamicznych w diagnostyce wibroakustycznej maszyn The Use Of Uncomplicated Dynamical Model In The Task Of Vibroacoustical Diagnostics	301
Warto przeczytać	306

#### SŁOWO WSTĘPNE

Artykuły zawarte w niniejszym numerze powstały w znacznej części na bazie referatów zgłoszonych na VI Krajową Konferencję "Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów – DIAG'2006" i uzyskały wymagane do publikacji w DIAGNOSTYCE recenzje.

Cykl konferencyjny DIAG został zainicjowany w 1986 roku. Kolejne konferencje odbywają się średnio co 4 lata. Podstawowym celem tego cyklu spotkań naukowych jest – nieodmiennie od dwudziestu lat – stworzenie szerokiego i przyjaznego forum wymiany informacji naukowej i technicznej pomiędzy osobami i zespołami zajmującymi się zarówno teorią jak i praktyką szeroko rozumianej diagnostyki.

Organizatorom merytorycznym konferencji szczególnie zależy na zwiększaniu zainteresowań diagnostyków takimi kierunkami badań, które wydają się jeszcze niedostatecznie spenetrowane.

Do tych kierunków należy - moim zdaniem szeroko rozumiane wykorzystanie diagnostyki w celu polepszenia właściwości użytkowych urządzeń technicznych. Dotyczy to zwłaszcza wykorzystania metod diagnostycznych do poprawy wskaźników niezawodnościowych i bezpiecznościowych. Chodzi tu głównie o zastosowanie odpowiednich metod i procedur diagnostycznych do tak wczesnego wykrywania procesów uszkodzeniowych, aby istniały realne możliwości zapobiegania powstawaniu poważnych stanów niezdatności - zwłaszcza stanów awaryjnokatastroficznych. Ważnym obszarem badań w diagnostyce jest też zagadnienie niepewności i błędności diagnoz. Niepewne diagnozy moga wskaźników prowadzić do niepewnych niezawodnościowych bezpiecznościowych, i a błędne diagnozy na ogół prowadzą do błędnych decyzji eksploatacyjnych.

Mervtoryczni organizatorzy cvklu konferencyjnego dokładają starań by w spotkaniach brali udział przedstawiciele jak największej liczby ośrodków zainteresowanych diagnostyką - i to nie tylko diagnostyką ukierunkowaną ściśle na obiekty techniczne. Duża waga przywiązywana jest do metod i narzędzi diagnostyki środowiska diagnostyki człowieka pełniącego funkcje i operatora obiektu technicznego lub administratora systemu eksploatacji. Z tego względu nierzadko wśród referatów konferencyjnych pojawiają się opracowania dotyczące pogranicza diagnostyki technicznej i medycznej oraz diagnostyki środowiska. Obserwacja zainteresowań ośrodków zajmujących się diagnostyką wskazuje na wzrost współpracy ośrodków medycznych i technicznych. Często wynika to z rozwoju takich metod diagnostyki technicznej, które moga bvć adaptowane do potrzeb diagnostyki medycznej. Wydaje się, że te działania należy intensyfikować.

Treść artykułów przedstawionych wyraźnie wskazuje na takie tendencje badawcze. Czytelnik znajdzie tu zarówno opracowania teoretyczne jak i doniesienia o badaniach i praktycznych zastosowaniach nowych metod diagnozowania różnych kategorii obiektów – tak technicznych jak i antropotechnicznych.

Warto zauważyć, że Autorzy artykułów konglomerat stanowia swoisty twórców interesujących się diagnostycznymi aspektami projektowania, eksploatowania i likwidowania charakterze obiektów 0 mechanicznym, mechatronicznym, elektrycznym, elektronicznym, chemicznym, biologicznym. Są wśród nich zarówno liderzy polskiej diagnostyki jak i adepci wkraczający na drogę rozwoju naukowego i zawodowego. Na tej podstawie można dojść do optymistycznych wniosków wskazujących na to, że polska diagnostyka rozwija się prawidłowo i utrzymuje się niezmiennie na wysokim poziomie merytorycznym.

Na zakończenie – zachęcając do wnikliwego studiowania zawartych w numerze artykułów – składam serdeczne podziękowania wszystkim tym, którzy przyczynili się do ukazania się tej publikacji, a szczególnie PT Recenzentom za terminowo i rzetelnie wykonaną pracę.

Dogath

Lesław BĘDKOWSKI

#### DIAGNOSTICS OF ROLLING BEARING BY VIBRATION ANALYSIS

#### Grzegorz WOJNAR, Bogusław ŁAZARZ, Zbigniew STANIK

The Silesian University of Technology, Faculty of Transport 8 Krasińskiego Street, 40-019 Katowice tel: (032) 603 41 93, e-mail: Grzegorz.Wojnar@polsl.pl

#### Summary

The bearings of wheels of carriageable vehicles with regard on disastrous state of roads in east Europe undergo accelerated waste what often it leads in consequence to damages different elements and threatens the safety of drive. Frequency analysis of vibroacoustical signals for diagnostics of bearing failure and wear are shown. Special focus is laid on typical faults (outer race, wear of surface). Axial vibrations have been recorded on bearing pivot at a different speed of carriageable wheels. Proposed methods are very sensitive to the development of bearings failure and wear.

Keywords: beraing, diagnostics, vibration car.

#### DIAGNOZOWANIE ŁOŻYSK TOCZNYCH METODĄ ANALIZY DRGAŃ

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono metodę wykrywania zużycia oraz lokalnego uszkodzenia bieżni zewnętrznej łożysk nie napędzanych kół jezdnych pojazdu samochodowego. Analizom poddawano uzyskane na podstawie eksperymentów czynnych sygnały przyspieszeń drgań wzdłużnych czopa łożyskowego. Zaproponowana w pracy metoda okazała się być bardzo wrażliwa na zużycie oraz lokalne uszkodzenie bieżni zewnętrznej łożysk.

Słowa kluczowe: łożyska, diagnostyka, drgania, samochód, koła jezdne.

#### 1. INTRODUCTION

During motor vehicle operation, its components are subject to wear. In terms of safety, major parts of a motor vehicle are bearing units in road wheels. Although the methods of recording and converting the vibration signals have developed dynamically, especially in recent years [2, 3, 4, 6, 7, 8, 10], today, car inspection stations to detections of wheel bearings damages use only untrustworthy organoleptic methods (fig. 1).



Fig. 1. Diagnostics method using by car inspection stations: 1-stethoscope, 2 - headphones, 3 - diagnosed bearing

Therefore, an attempt was made under this study at applying the method of vibration signals

analysis of motor vehicle suspension components, for the purpose of detection of their faults , which breakdown (fig. 2) it can threaten the safety of road traffic.



Fig. 2. Crack of the external race of double-breasted ball bearing

#### 2. THE SELECTION OF A PROCESS AS A SOURCE OF INFORMATION ABOUT THE DYNAMIC CONDITION

Information about the dynamic condition of a particular component can be found in various processes which occur inside the machine or in its surroundings, the processes including vibration, changes in acoustic pressure, driving torque and other. It is clear that each of the processes carries additional information, redundant from the point of view of the diagnostics' purpose. As a result, it is essential to properly reconstruct the information model of a particular process, based on which a decision can be taken to assume this particular process as the diagnostic signal. The course of the information model reconstruction for a machine with mechanical defects is presented in paper [1]. The model shown in Fig. 1 can be also assumed when analysing bearing units of motor vehicle wheels. The vibration signal coming from the mechanical defect to be investigated can be only disturbed by the movement of close kinematic pairs and by signals from other defects in the area (Fig. 1), whereas the acoustic signal can be additionally interfered by acoustic effects: some resulting from other faults in the machine and some connected with the properties of the environment where measurement takes place. If the situation when measurement is being taken is as in Figure 1, the vibration signal will include less information unnecessary from the point of view of the diagnosis purpose.



Fig. 1. Diagram showing the formation of vibration and acoustic signals connected with mechanical defectiveness of the machine [1]

Therefore, if the assessed condition of a machine is designated as w, and the vibration and acoustic signals by  $s_d$  and  $s_h$ , respectively, the following inequality will be highly probable:

$$\frac{\partial s_d}{\partial w} > \frac{\partial s_h}{\partial w} \tag{1}$$

which means that sensitivity of the vibration signal to changes will be higher than the sensitivity of the acoustic signal [1].

As a consequence, for the detection of wear and local damage to the outer race of a rolling bearing, only acceleration signals were used of axial vibration of the bearing pivot (Fig. 2) which were measured with a piezoelectric acceleration transducer.

#### 3. EXPERIMENTAL RESEARCH ANALYSIS OF THE RESULTS

The tests were carried out on cone rolling bearings of rear, non-driven wheels of a Seat Ibiza car – year of production 1993. Stand tests were carried out with the car lifted on a workshop lift. A car wheel balancer was used to velocity up one of the wheels (Fig. 2). This allowed acceleration of the wheel up to the rotation velocity which corresponded to the car's velocity of maximum ca.150 km/h.



Fig. 2. Method of speeding up the wheel for the purpose of vibration measurement: 1 – on the car wheel balancer, 2 – accelerometer, 3 – measuring apparatus

The acceleration values of axial vibration of the bearing pivot were measured. Also, synchronous reference signals corresponding to the wheel revolutions were recorded. The vibration signal and the signal from the system of averaging synchronization were sampled with the frequency of 25,600 Hz and recorded on a computer hard disk. The car wheel whose rolling bearings were diagnosed, was balanced on a standard balancer. The recorded vibration signal was analyzed within ten intervals (in Fig. 3 marked as bars) with a width corresponding to 25 revolutions of the wheel.



Fig. 3. Changes of rotation velocity and frequency of the wheel during its coasting – new bearings

This study shows only the results for the case where the initial rotation frequency (finitial) amounted to 22 Hz. In an active experiment, damage of the bearing gasket was simulated, in consequence of which was sand and other impurities got in the bearing unit. The bearings were damaged by adding sand and corundum powder to the lubricant. They caused accelerated wear of the race and rolling elements (Fig. 4), undetectable by organoleptic methods. There was no bearing slackness, either, and some traces of wear were observed only after its dismantling.



Fig. 4. Traces of wear of rolling elements

Fig. 5 shows changes of the frequency structure of a fragment of the vibration acceleration signal recorded when f initial = 22 Hz. In the spectrum of the vibration acceleration signal during the operation of new bearings, practically only the rotation frequency of the wheel (fwheel) and its harmonics (Fig. 5) were present.



Fig. 5. Signal frequency analysis – new bearings

The addition of sand and corundum powder to the lubricant caused an increase of component values of amplitudes of signal component frequencies in a higher frequency range of over 400 Hz (Fig. 6a).



Fig. 6. Signal frequency analysis: a) worn bearings – sand and corundum were present in the lubricant, b) worn bearings – the lubricant was replaced with new one and one type of operational wear was simulated

The lubricant was then replaced with a new one so as to simulate the operation of worn rolling bearings without foreign matter, e.g. sand. In the spectrum of the vibration signal recorded, a considerable increase is visible (as compared to new bearings) of the wheel rotation frequency values (fwheel) and its harmonics (Fig. 6b). The amplitude values of successive harmonics of the wheel rotation frequency (fwheel) for new bearings are compared in Fig. 7 with the corresponding values for worn bearings after adding sand and in the case of using "pure" lubricant.



Fig. 7. Amplitudes of subsequent harmonics of the wheel rotation frequency (fwheel) for new and worn bearings in operation

During the operation of rolling bearings, the most common phenomenon is fatigue wear of the race working surfaces, as a result of which pitting occurs on them. In the next phase of the investigations, based on the fatigue damage of the bearing race (Fig. 8a), local damage was simulated of the outer race of the smaller of two bearings fitted on the bearing pivot of the investigated vehicle wheel (Fig. 8b)



local damage of bearing race



Fig. 8. Local damage of the rolling bearing race: a) operational, b) used in experimental research

The damage shown in Fig. 8b caused an increase in the frequency value  $(f_{bzM})$  connected with the rolling of rolling elements over the damaged piece of the small bearing's outer race. In the case under consideration, the frequency  $(f_{bzM})$  determined based on dependencies presented in [2, 3, 6, 9] was by ca. 5.619 times higher than the rotational frequency of the wheel  $(f_{wheel})$ . Fig. 9 shows the envelope spectrum for new bearings in operation. In the spectrum, a component of the wheel rotational frequency  $(f_{wheel})$  and its harmonics predominate. Fig. 10 presents the envelope spectrum in the case of local damage to the outer race of the smaller of the rolling bearings. Components of frequency  $f_{bzM}$ connected with the rolling of rolling elements over the damaged piece of the race and its harmonics are clearly visible.



Also, a linear dependence was noticed between the wheel rotational frequency  $(f_{wheel})$  and the RMS value of the signal (Fig. 11). Next, the amplitudes of subsequent harmonics of the frequency  $(f_{bzM})$ connected with the rolling of rolling elements over the damaged piece of the small bearing's outer race were referred to the RMS value of the signal (Fig. 12a). Furthermore, the amplitude values of the first six frequency harmonics  $(f_{bzM})$  were added up, since this is were the energy related to the damage was cumulated and the so calculated sum was referred to the signal's RMS. The proposed measure calculated from relation (2) is little sensitive to any changes in the wheel rotational velocity (the maximum deviation from the mean value is  $\pm$  8%). It is sensitive, however, to local damage of the bearing race (Fig. 12b).

$$M_{a} = \frac{\sum_{i=1}^{6} \max A_{o} \left( i \cdot f_{bzM} \pm 5\% f_{bzM} \right)}{a_{RMS}}, \quad (2)$$

where:

- $a_{RMS}$  RMS value of the vibration acceleration signal,
- $f_{bzM}$  frequency connected with the rolling of a rolling element over the damaged piece of the small bearing's outer race,
- $\max A_o(i \cdot f_{bzM} \pm 5\% f_{obzM}) \text{maximum amplitude}$ of envelope spectrum determined in bands  $i \cdot f_{bzM} \pm 5\% f_{bzM}$  for  $i=1\div 6$ .



Fig. 10: Envelope spectrum – local damage of outer race of the smaller bearing,  $f_{initial} = 22$  Hz











#### 4. CONCLUSIONS

Based on the investigations and analyses carried out, the following conclusions can be formulated:

• the wear of working surfaces of rolling elements in wheels' bearings and presence of sand in

a bearing caused an increase in the component amplitudes of frequencies above 400 Hz,

- in the case of operational wear simulation (absence of foreign matters), the wear of working surfaces of rolling elements in wheels' bearings caused a significant increase in the amplitudes of subsequent harmonics of the wheel rotational frequency,
- local damage to the rolling bearing's outer race caused an increase in the component amplitude of frequency (*f<sub>bzM</sub>*) connected with the rolling of rolling elements over the damaged piece of the bearing race.
- The proposed dimensionless measure of outer race damage is little sensitive to any changes in the wheel rotational velocity, however, it is sensitive to local damage of the bearing race.

#### REFERENCES

- [1] Cempel Cz.: *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn* (Fundamentals of machine diagnostics). WNT, Warszawa 1982.
- [2] Batko W., Mikulski A.: Zastosowanie metod falkowych w systemach monitoringu wibroakustycznego łożyskowania urządzenia wyciągowego (Application of wavelet transform in vibroacoustical monitoring system of hoist device bearings). Diagnostyka vol. 26, 2002, p. 7-12.
- [3] Dąbrowski Z., Radkowski St: *Wykorzystanie* sygnału wibroakustycznego łożysk w diagnozowaniu łożysk tocznych (Utilization the vibroacoustical signal in rolling bearing diagnostics) . Exploitation Machine Problem vol. 34 1999, p. 31-41.
- [4] Dziurdź J.: Odtwarzanie rzeczywistego rozkładu obciążenia na podstawie analizy drgań (Reconstruction of real distribution on the base of vibration analysis) XXII Symposium of Basic Machine Construction, Gdynia – Jurata 2005.
- [5] Krzemiński Freda H.: *Łożyska toczne* (Rolling bearings). PWN, Warszawa 1985.
- [6] Łazarz B., Wojnar G.: Contactless laser measurement of vibration in vibroacoustic diagnostics, The 11th Scientific Symposium "New Technologies and Materials in Metallurgy and Material Engineering"., Katowice, 16.05.2003.
- [7] Mc Fadden P. D., Toozhy M. M.: Application of Synchronous Averaging to Vibration Monitoring of Rolling Elements Bearings. Mechanical Systems and Signal Processing 14 (6), 2000, s. 891÷906.
- [8] Randall R. B.: Developments in Digital Analysis Techniques for Diagnostics of Bearings and Gears. Fifth International Congress on Sound and Vibration, Adelaide, South Australia 1997.
- [9] SKF: *Guide on technical servicing of bearings*. SKF, 1994.

[10] Yiakopoulos C., Antoniadis I.: Application of some advanced signal processing techniques for rolling element bearing fault detection. Diagnostyka vol. 36/2005, p. 33-38.

Eng.

WOJNAR adjunct of The

interest: modeling of dynamic

processes, diagnostics of tooth

gear, machine design and

University

PhD.

Silesian

Technology.

processing

signal.





Bogusław DSc. Eng. ŁAZARZ profesor of The Silesian University of Technology. Scientific interest: modeling of dynamic processes, diagnostics of tooth gear, machine design and processing vibroacoustical signal. Member of Machines Construction Committee.



PhD. Eng. **Zbigniew STANIK** adjunct of The Silesian University of Technology. Scientific interest: wear outer layer and cars design.

Grzegorz

Scientific

vibroacoustical

of

# ŚRODOWISKO DO SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA SYSTEMÓW DO DIAGNOSTYKI W CZASIE RZECZYWISTYM

#### Grzegorz RUBIN, Mirosław OMIELJANOWICZ

Politechnika Białostocka, Wydział Informatyki, Katedra Systemów Czasu Rzeczywistego 15-351 Białystok, ul. Wiejska 45A, <u>gregor@ii.pb.bialystok.pl</u>

#### Streszczenie

Idea szybkiego prototypowania (ang. rapid prototyping) oznacza takie prowadzenie prac projektowych i wdrożeniowych aby maksymalnie ograniczyć czas i koszty związane z wprowadzeniem nowych koncepcji i produktów zaawansowanych technologii na rynek. Prototypowanie to, ujmując lapidarnie szybkie stworzenie prototypu urządzenia, czy też programu, umożliwiającego dokonanie oceny jego funkcjonalności, przydatności i akceptowalności przez końcowego odbiorcę. Realizacja takiego podejścia w ogólnym przypadku jest bardzo trudna. Tworzone są więc systemy prototypowania dla wybranych dziedzin i gałęzi przemysłu. W przedstawionej pracy opisana została koncepcja postępowania i propozycja zestawu narzędzi szybkiego prototypowania z dziedziny cyfrowego przetwarzania sygnałów akustycznych i wibroakustycznych. Pokazano też wykorzystanie jej do stworzenia modelu i prototypu uniwersalnej architektury do prowadzenia złożonych obliczeń (w tym zaawansowanych pomiarów) w czasie rzeczywistym.

Słowa kluczowe: szybkie prototypowanie, sieci Petri, FPGA.

#### RAPID PROTOTYPING ENIVIRONMENT FOR DIAGNOSIS REAL TIME SYSTEMS

#### Summary

Rapid prototyping aims to reducing development cost via prototyping. Prototypes are built to assess whether proposed system will be acceptable to its user and whether a proposed design will provide adequate functionality and performance. A prototype is constructed prior to the system's production version to gain information that guides analysis and design. In this article is proposed RPPE (Rapid Prototyping Project Environment) for real-time embedded systems. This environment is based on modeling using new modification of Petri nets called hardware Petri nets. Implementation is made using special hardware architecture called dynamic reconfigurable internal architecture. The main advantage of proposed RPPE is that there is no need to change hardware, even if all used algorithms must be changed. There is a possibility to make all design process to be almost fully automated from modeling to working prototype.

Keywords: Rapid Prototyping, Petri nets, FPGA.

#### 1. WPROWADZENIE

Prace prowadzone nad stworzeniem środowiska szybkiego prototypowania mają na celu redukcję kosztów związanych z przygotowaniem wersji produkcyjnych programów i urządzeń. Prototyp jest tworzony aby zdobyć wiedzę i umiejętności pozwalające na opanowanie i opracowanie efektywnego czasowo i kosztowo procesu wytworzenia wersji produkcyjnej produktu. Daje też możliwość zbadania funkcjonalności przyjętych rozwiązań i oceny zrealizowania założeń projektowych. Pracująca wersja programu czy urządzenia pozwala na sprawdzenie jej przez użytkownika końcowego oraz ustalenie jego proponowanych rozwiązaniach. opinii 0 Ich uwzględnienie w przygotowywanej wersji produkcyjnej stanowi klucz do sukcesu rynkowego lub pokazuje popełnione błędy i pozwala na dokonanie korekt nawet na poziomie podstawowych założeń. Szybkie prototypowanie to koncepcja, która "szybko tworzy prototyp", co oznacza, że zmiana założeń wyjściowych staje się zwykłym elementem procesu projektowego. Aby było to możliwe prototypowanie musi realizować dwa zasadnicze zadania. Pierwsze to stworzenie modelu, który ma jednoznacznie pokazać poprawność pracy na poziomie logicznym. Drugie to metoda sprawnej i bezbłędnej konstrukcji pracującego prototypu. Oba zadania powinny być realizowane w maksymalnym stopniu korzystać z komputerowego wspomagania projektowania. W prezentowanej pracy opracowano środowisko szybkiego prototypowania (RPPE – ang. Rapid Prototyping Project Environment) dla wbudowanych systemów czasu rzeczywistego Real-Time Embedded Systems). (RTES ang. Modelowanie oparto o sprzętowe sieci Petri [1] zaś wdrażanie o platformę sprzętową o dynamicznie rekonfigurowanej architekturze wewnętrznej. Dodatkowo opracowano założenia do stworzenia w pełni automatycznego systemu implementującego sprawdzony model w układach FPGA.

#### 2. METODA MODELOWANIA PRZY WYKORZYSTANIU ZMODYFIKOWANYCH SIECI PETRI

Pierwszym elementem składowym RPPE musi być sprawny mechanizm modelowania. Dzisiejsze metody diagnostyczne opierają się na sygnałach pomiarowych czujników analogowych z przetworzonych na informację cyfrową. Dalszy proces odbywa się na danych cyfrowych przy wykorzystaniu zaawansowanego aparatu matematycznego. Właściwe odwzorowanie zależności matematycznych za pomocą algorytmów obliczeniowych jest kluczem poprawnego działania diagnostycznego. Poszukiwania systemu i weryfikacja poprawności algorytmów to złożony proces i możliwy do szybkiego przeprowadzenia jedynie przy wykorzystaniu metod modelowania komputerowego. Biorąc pod uwagę implementację sprzętową prototypu jako metodę modelowania wykorzystano sieci Petri [4].

Znane na dzień dzisiejszy różne interpretacje poszerzania i modyfikacji sieci Petri pozwalają w zasadzie modelować równoległe procesy za środowiska pomoca programistycznego [2] systemów obliczeniowych (na wielu poziomach: od systemowego do mikroprogramowego). W takich podejściach należy wykluczyć krytyczne sytuacje w modelach. opracowywanych W przypadku pojawienia się dowolnej krytycznej sytuacji należy rozbudować funkcję środowiska w ten sposób, żeby w równoważnym modelu sytuacje krytyczne nie występowały. Brak takiej możliwości powoduje większą pracochłonność przy śledzeniu pracy algorytmu w innym urządzeniu, a co za tym idzie wielokrotność opracowywania i zmieniania modelu algorytmu. Uwzględniając wykonanie sprzętowe prototypu sieci Petri, powinny obowiązkowo uwzględniać występowanie krytycznych sytuacji. W celu budowy takich modeli proponuje się formalne opisanie modyfikowanych sprzętowych sieci Petri. Są to metody nie sieciowe pozwalające rozszerzać możliwości modelowanego sieciowego obiektu badań oraz przeprowadzić symulację i opracować wyniki. Proponowane rozwiązywanie pozwala na budowe adekwatnych modeli operacyjnych automatów cyfrowego przetwarzania sygnałów czasu rzeczywistego i przeprowadzić śledzenie działania różnorodnych algorytmów. W sytuacji kiedy mamy problem z realizacją jakiegoś elementu układu np. mnożenia i nie jesteśmy pewni czy operacja wykona się w założonym czasie, możemy zejść na niższy poziom detalizacji przebudowując i symulując sprzętową sieć Petri dla samego elementu. Ten proces można powtarzać, aż znajdziemy się na najniższym możliwym poziomie szczegółowości, np. bramki logicznej. Budowanie modeli dla poszczególnych elementów i zagłębianie sie w kolejne poziomy szczegółowości realizowane jest za pomocą Wielopoziomowych Sprzętowych Sieci Petri [1]. Zejście na niższy poziom szczegółowości daje nam możliwość dokładniej kontroli poszczególnych sygnałów sterujących danymi elementami. Efektem eksperymentu moga bvć tymczasowe diagramy zgrania wszystkich części oraz bezpośrednio cyfrowy wynik emitowanych obliczeń (czas cyklu sieciowego). Tak wygenerowany diagram czasowy pozwala na proste zaimplementowanie szybkie i zweryfikowanego algorytmu w struktury FPGA.

#### 3. UNIWERSALNA ARCHITEKTURA IMPLENTACYJNA DRAW

Drugą podstawową składową RPPE jest część przenosząca sprawdzone logicznie algorytmy pracujace urządzenia. Najistotniejszym w elementem tego etapu jest osiągnięcie odpowiedniej mocy obliczeniowej przy minimalizacji środków finansowych oraz zautomatyzowania przejścia "od algorytmów do prototypu". Tradycyjne podejście polega na wyborze specjalistycznych rozwiązań sprzętowych dopasowanych do jednego konkretnego zagadnienia. Niestety, często się zdarza, że badania pracującego prototypu wskazują na konieczność zmian w sprzęcie. Naturalnie spowoduje to wzrost kosztów oraz czasu potrzebnego na modyfikacje. Tego typu postępowanie w oczywisty sposób nie przystaje do koncepcji szybkiego prototypowania. Proponowane rozwiązanie w/w problemu polega na zastosowaniu nowego podejścia do cech i wykonania części sprzętowej. Zaprojektowane RPPE opiera się na specjalnie do tego celu opracowanej platformie. Jest to zestaw środków sprzętowych, który dzięki odpowiednio zaplanowanym połączeniom pomiędzy nimi tworzy klasyfikowany system obecnie jako rekonfigurowalny system cyfrowego przetwarzania sygnałów. Został on nazwany platforma o dynamicznie rekonfigurowanej architekturze wewnetrznej (DRAW).

Platforma DRAW składa się z trzech modułów funkcjonalnych. Jej schemat blokowy przedstawiono na rys. 1. Realizację idei dynamicznie rekonfigurowalnej architektury wewnętrznej zapewniają moduły SOFT i HARD zaś moduł HOST stanowi klasyczny blok komunikacji z operatorem i innymi zewnętrznymi systemami.

Elastyczność wymaganą w środowisku szybkiego prototypowania zapewniają moduły SOFT i HARD. Moduł SOFT to możliwość zmiany realizowanych funkcji drogą klasycznej wymiany oprogramowania. Nową jakość wprowadza moduł HARD. Jest on oparty o logiczne podzespoły reprogramowalne typu FPGA.



#### Rys. 1. Schemat blokowy platformy DRAW

Uruchomienie procesu obliczeniowego następuje na żądanie z zewnątrz (operator lub system komputerowy). W oparciu o ustawione zadania moduł HOŚT definiuje tryb pracy, który jest jednoznacznie określony za pomocą wektorów pracy:  $V_{DO}$  (wektor danych ogólnych) i  $V_{DB}$  (wektor danych binarnych). Wektor danych ogólnych VDO zawiera informacje ogólne typu: rodzaj analizy do wykonania, zakres pomiarowy, sposób podziału na pasma, typy wyjść do których mają być przekazane wyniki. Dodatkowo definiuje wektor danych binarnych V<sub>DB</sub> zawierający informacje szczegółowe typu: dynamika pomiarów, ilość pasm, ewentualnie zakresy poszczególnych pasm, rozdzielczość, ilość kanałów pomiarowych. Wektory  $V_{DO}$  i  $V_{DB}$  są przekazywane do modułu SOFT. W przypadku prostej korekty zadanych opcji wysyłany będzie tylko wektor  $V_{DB}$ . Drugą zasadniczą funkcją bloku HOST jest prezentacja rezultatów obliczeń otrzymywanych z modułu SOFT. Możliwa jest wizualizacja danych otrzymanych w postaci wektora wyników  $V_W$  za pomocą wewnętrznego układu wyświetlającego lub zewnętrznego systemu prezentacji w postaci obrazu czy wydruku. Istotna funkcją dodatkową musi być przekazywanie w postaci ciagu binarnego nowych wersji oprogramowania dla modułu SOFT i nowych architektur sprzetowych modułu HARD (wykorzystanego do tego celu wektory  $V_{DO}$  i  $V_{DB}$ ). Ze względu, iż filozofia komunikacji z operatorem (bezpośredniej - za pomocą klawiatury lokalnej, pośredniej - poprzez system zewnętrzny) może być opracowana jednorazowo bez konieczności późniejszych zasadniczych modyfikacji, moduł HOST nie musi mieć zmiennej architektury i oprogramowania, czyli może być blokiem o stałym oprogramowaniu i stałym układzie sprzętowym. Dobrą propozycją układów do jego realizacji jest zastosowanie mikrokontrolera typu RISC 16/32 bitowego. Zapewni to najprostszą konstrukcję (o niskim koszcie), gdyż wystarczy jeden układ scalony zawierający oprócz mikroprocesora także układy peryferyjne, np. w postaci interfejsów komunikacyjnych, współpracy z różnymi rodzajami pamięci, bezpośredniej komunikacji z różnego typu wyświetlaczami, wewnetrzna pamieć RAM. Maja one również dużą wydajność pozwalającą na implementację wielu protokołów komunikacyjnych

i dodatkową obróbkę otrzymanych wyników do postaci dopasowanej do zastosowanego układu wizualizacji.

Sedno architektury DRAW stanowią cechy funkcjonalne modułu SOFT. Po odebraniu wektorów pracy  $V_{DO}$  i  $V_{DB}$  dokonuje on autokonfiguracji oraz utworzenia wektorów konfiguracji  $V_{RA}$  i  $V_{ST}$  wysyłanych do modułu HARD, ustalając tym jego architekturę. Wektor rekonfiguracji architektury przekazuje  $V_{RA}$ informacje o architekturze wewnętrznej (programuje strukturę logicznych układów reprogramowalnych), zaś wektor stałych  $V_{ST}$  zawiera parametry pracy struktur implementowanych obliczeniowych. W zależności od zadanego trybu pracy, blok SOFT dokonuje wyboru stosowanego algorytmu zarówno użytego na potrzeby pomiaru w ramach własnego modułu jak i ustawianego w formie sprzetowej w module HARD. W sytuacji, gdy zadany tryb pracy oraz zastosowany algorytm nie wymagają dynamicznej zmiany, całość pracuje jak klasyczny statyczny system analizujący dane. Przykładem może być analiza częstotliwościowa w jednym zadanym przedziale częstotliwości. Niezbędna filtracja czy okienkowanie wykonywane jest sprzętowo w bloku HARD, zaś przetworzone dane w postaci wektora wyników pomocniczych V<sub>YP</sub>, przekazane do bloku SOFT, gdzie wykonana zostanie FFT. W przypadku, gdy zadana analiza ma być prowadzona z podziałem pasmowym moduł SOFT wyznacza strukturę banku filtrów ustalając ilość wymaganych filtrów i decymacji oraz przesyłając odpowiednie wektory  $V_{RA}$  i  $V_{ST}$ . Ustalają one również z jakiego punktu przetwarzania będą przesyłane dane w postaci wektora  $V_{YP}$  (np. w celu diagnostyki poprawności pracy struktury obliczeniowej) i czy końcowe sygnały zostana przekazane na bezpośrednie wyjście yonline lub powrotnie do modułu SOFT i wyprowadzone na zewnątrz w postaci yoffline lub przekazane dalej do wizualizacji za pomocą bloku HOST. W przypadku trybu pracy dynamicznej dodatkową funkcją modułu SOFT jest śledzenie stanu sygnałów badanych x(n), sygnałów z nimi skojarzonych  $x_p(n)$  oraz wyników pośrednich  $V_{YP}$ . Polega ono na wyznaczaniu parametrów wymienionych wielkości wejściowych, nastepnie wyliczeniu optymalnych а współczynników pracy głównych algorytmów zaimplementowanych w strukturach sprzętowych HARD i przekazywanie ich za pomocą wektora  $V_{ST}$ . W efekcie takiego działania mamy dynamicznie zmienianv algorytm czasu rzeczywistego. W najbardziej zaawansowanym przypadku moduł SOFT może podjąć decyzje o zmianie lub wymianie całej struktury obliczeniowej zawartej w module HARD. Przykładem mogą być sytuacje gdy badane są sygnały wibroakustycznego zaczną wskazywać na niestabilna pracę i zachodzi konieczność przejścia analizy w dziedzinie rzędów, czy do też przestawienie ilości analizowanych pasm lub zmiana funkcji okienkowania sygnału.

Rozpatrując blok SOFT z punktu widzenia fizycznej jedynym realizacji podzespołem nadającym do się jego konstrukcji są mikroprocesory klasy DSP. Umożliwiają one efektywną implementację algorytmów analizy sygnałów jak i algorytmów decyzyjnych. Ze względu, iż mają one niezmienną budowę wewnętrzną nie jest możliwe dopasowywanie struktury obliczeniowej do wykonywanego algorytmu ale możliwa jest stosunkowo prosta zadań implementacja typowych cyfrowego przetwarzania sygnałów (np. FFT) oraz bardzo złożonych i długich algorytmów. Zmiana sposobu pracy odbywa się drogą wymiany programu. Z jednej strony oznacza to łatwość wymiany funkcji bez konieczności zmian sprzetowych, z drugiej oznacza to jednak, że przy szerokim zestawie wykonywanych przekształceń sygnałów część z nich wykonywana jest ze zmniejszoną efektywnością. Uwzględniając złożoność funkcji wykonywanych w module SOFT należy przyjąć, że może wystąpić użycia konieczność więcej niż iednego mikroprocesora DSP. Ze względu na przyjętą koncepcję funkcjonalną bloku SOFT należy on do kategorii zespołu o stałej architekturze sprzętowej możliwością dynamicznej Z zmiany oprogramowania.

16

Ostatnim elementem składowym architektury DRAW jest moduł HARD. Jego "kształt" jest ustawiany przez moduł SOFT, a zasadniczą funkcją efektywna realizacja algorytmów obliczeniowych czasu rzeczywistego. Efektywność ta oznacza procesora konieczność zmiany architektury obliczeniowego zależności od W zadanego algorytmu. Zgodnie z założeniem architektury DRAW zmiany takie muszą być możliwe do wykonania nawet w trakcie bieżącej pracy. Jedyna możliwość realizacji takiej koncepcji daje w chwili użycie reprogramowalnych układów obecnej logicznych typu FPGA lub CPLD. Typowe operacje o krytycznej ścieżce czasowej to filtracja z precyzyjnym podziałem pasmowym za pomocą banku filtrów, operacja splotu, przetwarzanie potokowe, część obliczeń niezbędnych przy analizie w dziedzinie rzędów. Układy programowalne umożliwiają precyzyjne dopasowanie struktury liczącej do ich specyfiki. Możliwe jest bowiem dobranie długości słowa, zmiana ilości ogniw filtracji i decymacji, pomijania niepotrzebnych w danej chwili bloków funkcjonalnych. Wewnętrzne struktury tego modułu są zorganizowane w architekturze 0 współdzielonej pamieci zespołem elementów wykonawczych [4]. Z Architektura ze współdzieloną pamięcią pokazana na rys. 2. Posiada procesory z wieloma (K) wejściami danych, współdzieloną pamięć podzieloną oddzielnych na (K) pamięci. Używajac powtarzanego schematu dostępu, każdy procesor posiada dostep do pamieci z każdym N cyklem, w którym każdy procesor zapisuje wyniki do jednej lub wielu pamięci, czy też odczytuje równolegle maksymalnie jedną wartość z każdej pamięci. Ten

prosty schemat gwarantuje brak konfliktów dostępu. System jest ściśle sprzężony tak, że wszystkie procesory mają ten sam czas dostępu do pamięci. Tego typu architektura doskonale nadaje się do zastosowań związanych z algorytmami DSP, np. algorytmy rekursywne ze skomplikowanymi zależnościami danych. Wadą tego typu architektury jest możliwość zastosowania niewielkiej liczby procesorów. Ma to związek z wąską szerokością pasma do pamięci, dlatego w takich sytuacjach stosuje się łączenie ze sobą kilku takich mini systemów w sposób równoległy lub kaskadowy.



Rys. 2. Architektura wieloprocesorowa

Takie podejście pozwala na wielokrotne i szybkie zmiany sposobu implementacji algorytmów. Działający prototyp po zebraniu informacji od użytkowników końcowych można w bardzo krótkim czasie przystosować zgodnie i ich uwagami i sugestiami. Możliwe są również korekty pozwalajace na podniesienie wydajności droga zrównoleglenia operacji (angażując więcej elementów wykonawczych) lub zasadniczej zmiany struktury połączeń elementów wykonawczych. Rysunek 3 ilustruje przykład jednego z rozwiązań balansowania struktury pomiędzy ilością pamięci a ilością elementów wykonawczych.



współdzieloną pamięcią

Podsumowujac stwierdzić, można że zaproponowana architektura DRAW-daje możliwość prototypów szybkiej budowy urządzeń diagnostycznych pracujących czasie w rzeczywistym. Jest koncepcją otwartą pozwalająca na szybkie i daleko idace zmiany funkcjonalności bez potrzeby przeprojektowywania konstrukcji urządzenia. Dzięki możliwości łatwego i szybkiego przestawienia realizowanych algorytmów może być cennym składnikiem środowiska szybkiego prototypownia. [7],[8].

#### 4. EKSPERYMENTALNA REALIZACJA RPPE DO DIAGNOSTYKI WIBROAKUSTYCZNEJ

W celu weryfikacji koncepcji RPPE opracowano implementację algorytmu TVDFT [5] do diagnostyki wibroakustycznej. W procesie projektowym zastosowano opracowane postępowanie szybkiego prototypowania. Modelowanie algorytmu wykonano za pomocą sprzętowych sieci Petri. Oprogramowanie modelujące zrealizowano w technologii C++ na komputery osobiste. Narzędzie programowe skonstruowano umożliwiajacy w sposób wvkorzystanie wielopoziomowych sieci Petri. Modelowanie projektowanych algorytmów można zacząć od ogólnego funkcjonalnego poziomu. Następnie każda ze złożonych operacji jest dzielona mniejsze fragmenty. Końcowy na stopień szczegółowości modelowania obejmuje poziom rejestrów, elementów wykonawczych (np. układów mnożących o dobieranej długości słowa) elementów sterujących oraz sekwencji czasowej sygnałów sterujących. Jest to zatem gotowy i sprawdzony logicznie projekt układu realizującego zadane algorytmy. Rysunek 4 ilustruje model sieci Petri elementu wykonawczego obliczającego składową harmoniczną sygnału wibroakustycznego. Natomiast rys. 5 jest to dopasowana zbalansowana architektura pozwalająca elementu wykonawczego na kompromis pomiędzy wykorzystaniem przestrzeni w układzie programowalnym a poborem mocy oraz szybkościa pracy.



Rys. 4. Model sieci Petri jednostki wykonawczej

Diagram czasowy przedstawiony na rys. 6 przedstawia kolejność wykonywania operacji projektowanego elementu wykonawczego. Mając taki diagram zbudowanie układu w strukturze FPGA jest bardzo proste.



Rys. 5. Architektura obliczeniowa ze współdzieloną pamięcią dla TVDFT



Rys. 6. Zestawienie czasowe wykonywania poszczególnych operacji algorytmu TVDFT

Kolejny etap to implementacja sprzętowa. Bazą elementową musiał być zestaw podzespołów umożliwiający stworzenie architektury DRAW. Skonstruowanie w pełni funkcjonalnej platformy zgodnej z architekturą DRAW to zadanie bardzo złożone W związku z tym zdecydowano się na tym etapie prac na weryfikację tylko niektórych elementów. Skoncentrowano się na sprawdzeniu realizowalności koncepcji działania modułu HARD i SOFT. Jako moduł HOST wykorzystano komputer osobisty. (w oczywisty sposób pozwala realizować komunikację z operatorem oraz prezentować wyniki pomiarów i obliczeń). Jako bazę modułów SOFT

wykorzystano platforme i HARD sprzętową SignalWave [6] firmy Lyrtech. Zawiera ona połączone wewnętrzną magistralą podzespoły mikroprocesorowe Texas Instruments (DSP 6713), układy FPGA Xilinx (VirtexII - XC3000). oraz wejścia analogowo-cyfrowe. Zbiór podzespołów mikroprocesorowych tworzy moduł SOFT, zaś układów FPGA moduł HARD. Oprogramowanie dostarczone razem ze sprzętem zapewnia sprawną komunikację z komputerem osobistym. Daje ono możliwość załadowania oprogramowania użytkowego do systemu mikroprocesorowego oraz struktur wewnętrznych układów FPGA. Posiada też funkcje uruchomienia i obserwacji pracy systemu w czasie rzeczywistym. Dotychczasowe prace przy wykorzystaniu w/w platformy potwierdziły możliwość wykonania szybkiej implementacji sprzetowej struktur obliczeniowych opracowanych wyniku modelowania z wykorzystaniem w sprzętowych sieci Petri.

Doświadczenia przy implementacji algorytmu TVDFT wskazują że, wszelkie zmiany czy poprawki mogą być wykonywane bez konieczności wymiany sprzętu. Przeprowadzone próby i eksperymenty z zastosowaniem elementów architektury DRAW oraz mechanizmu współdzielonej pamięci jako jądra konstruowania specjalizowanych struktur obliczeniowych w układach programowalnych pokazały, że umożliwia jest budowa systemu RPPE do celów diagnostycznych dla wszystkich kategorii rozwiązań real-time embedded systems.

### LITERATURA

- [1] Rubin G, Petrovsky A.Omieljanowicz M.: Multilevel hardware Petri nets for rapid prototyping design platform. In the proc. of the 12<sup>th</sup> Intern. Conference Mixed design on integrated circuits and systems, MIXDES' 2005, Kraków, Poland, 20-25 June 2005, 147-152.
- [2] Auguin M., Boeri F.: A method for designing special fast systems for signal processing. Proc. Signal processing: Theories and applications. North-Holland publishing company. 1980. P.239-244.
- [3] Wanhammar L.: *DSP integrated circuits*, Academic Press, USA,1999.
- [4] Peter H. Starke.: "Sieci Petri", PWN, Warszawa, 1987.
- [5] Zubrycki P., Rubin G., Piotrowski A., Omiljanowicz M.: Procesor czasu rzeczywistego do prowadzenia diagnostyki w dziedzinie rzędów oparty na układach typu FPGA. DIAG 2003', Ustroń, 2003.
- [6] http://www.lyrtech.com
- [7] Jones A. B., Cavallaro J. R: A Rapid Prototyping Environment for Wireless Communication Embedded Systems. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 1 May 2003, Vol.6, s. 603-614.

[8] Richards M. A.: The Rapid Prototyping of Application Specific Signal Processors Program: Overview and Accomplishments. Proceedings 1st Annual RASSP Conference, August 1994, s. 1-8.





Mgr inż. Grzegorz RUBIN jest pracownikiem Wydziału Informatyki Politechniki Białostockiej w Katedrze Systemów Czasu Rzeczywistego. Zajmuje się realizacją algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów wibroakustycznych w strukturach FPGA oraz modelowaniem za pomocą sieci Petri.

Dr inż. Mirosław **OMILJANOWICZ** jest pracownikiem Wydziału informatyki Politechniki Białostockiej w Katedrze Systemów Czasu Rzeczywistego. Zajmuje się architekturą systemów komputerowych czasu rzeczywistego, implementacją algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów wibroakustycznych w strukturach FPGA oraz procesorach DSP.

18

# METODYKA KSZTAŁTOWANIA PROCESU STEROWANIA ŚRODKIEM TRANSPORTU UKIERUNKOWANA NA WYMAGANY JEGO STAN TECHNICZNY

#### Jarosław SMOCZEK, Janusz SZPYTKO

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Katedra Urządzeń Technologicznych i Ochrony Środowiska Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków tel. 12 617 31 04, e-mail: <u>smoczek@agh.edu.pl</u>, <u>szpytko@agh.edu.pl</u>

#### Streszczenie

Jakość eksploatacji, bezpieczeństwo oraz realizowane zadania przez systemy i urządzenia transportowe (użytkowane w zautomatyzowanych procesach produkcyjnych) w istotnym stopniu zależą od informacji o oczekiwanym działaniu (procesie), czasie jej dostępu oraz poprawności działania systemu decyzyjnego. Przedmiotem wypowiedzi jest metodyka kształtowania procesu sterowania środkiem transportu ukierunkowana na wymagany jego stan techniczny, na przykładzie suwnicy pomostowej reprezentancie klasy wielkogabarytowych szynowych urządzeń transportowych.

Słowa kluczowe: monitoring, ocena stanu technicznego, sterowanie, środek transportu.

#### SUPERVISION METHODOLOGY OF CONTROL PROCESS OF TRANSPORT DEVICE FOCUSING ON HIS OVERLOOKED TECHNICAL STATE

#### Summary

The operation quality and safety, as well as realized tasks by transportation devices in automated manufacturing, depend on information about waited operation (the process), time of her access and running correctness of decision - making system. The paper is describing the supervision methodology of control process of transport device focusing on his overlooked technical state, on the overhead crane example (the representative of the class large dimensional rail transport devices).

Keywords: monitoring, condition monitoring, control, transportation device.

# 1. WSTĘP

W systemach i urządzeniach transportowych realizujących procesy przemieszczania ładunków i ludzi, jakość eksploatacyjna i precyzja działania, jak też stan techniczny środka transportowego, w istotnym stopniu zależą od podsystemów wykonawczych i sterowania mechanizmami ruchu [Horacek et al, 2005; Jaźwiński et al, 2003]. W procesach, w których sterowanie realizowane jest przez człowieka (układ człowiek - maszyna), dodatkowymi czynnikami wpływającymi na jakość eksploatacji urządzeń transportowych są stan psychofizyczny operatora, jego doświadczenie i umiejętności.

Na stan techniczny i jakość użytkowania urządzenia wpływ mają zarówno nabywane umiejętności doskonalone operatora, iak i rozwiązania techniczne stosowane w podsystemach wykonawczych i sterowania (rys. 1) i ułatwiające wykonywanie zadań (które można wyrazić potencjałem eksploatacyjnym układu człowiek maszyna), a ponadto oddziaływania otoczenia przestrzeni roboczej [2, 9].



Rys. 1. Czynniki wpływające na stan techniczny urządzenia i dokładność realizowanych przez operatora zadań w procesie sterowania w układzie człowiek-maszyna

Niekorzystne oddziaływania zewnętrzne na układ człowiek - maszyna mogą być kompensowane w obszarze dysponowanego łącznego potencjału eksploatacyjnego. Po stronie techniki nie zawsze możliwe jest do zrealizowania ograniczenie wpływu niekorzystnych czynników na precyzję działania układu, oraz na stan techniczny podsystemów urządzenia poprzez pełną lub częściową automatyzację (szczególnie przy zmiennym cyklu roboczym urządzenia i zmieniających się czynnikach zewnętrznych, często trudnych do uwzględnienia w algorytmie sterowania).

Z punktu widzenia zapewnienia wymaganej niezawodności eksploatacyjnej oraz bezpieczeństwa jakości użytkowania urządzenia, w tymi i dokładności wykonywanych zadań, istotnym jest prowadzenie badań w zakresie skutków sterowań mechanizmami urządzenia realizowanych przez operatora na jego stan techniczny i jakość użytkowania. Wyniki badań mogą być przydatne w diagnostyce urządzenia, a ponadto w opracowaniu metodyki definiowania i analizy jakościowych wskaźników eksploatacji [3]. Istotnym zagadnieniem jest ponadto optymalizacja procesu transportowego implementacja i nowvch technicznych rozwiazań w podsystemach wykonawczych i sterowania urządzenia.

W systemach, w których sterowanie realizowane jest przez człowieka poprawność wykonywanych zadań zależy od współdziałania układu człowiekmaszyna. Elementy tego systemu wzajemnie na siebie oddziałują często wchodząc w szerszą relację człowiek - maszyna - otoczenie. W układzie człowiek - maszyna, człowiek oddziałuje na urządzenie i proces z wykorzystaniem dostępnych mu środków technicznych, które determinuja jego sposób działania. Proces decyzyjny człowieka, na podstawie którego w odpowiedni sposób oddziałuje na urządzenie i otoczenie następuje w oparciu o informacje z przebiegu procesu i otoczenia, jak i wiedzę jaką posiada na temat urządzenia, samego procesu i środowiska pracy. Błędne podejmowanie decyzji, które może mieć wpływ na użytkowanie urzadzenia i cały proces może skutkiem braku lub niedostatecznej informacji oraz błędów mechanizmu decyzyjnego, w tym niedoświadczenia operatora [7].

Odpowiednie dostosowanie rozwiązań technicznych w układzie człowiek - maszyna do potrzeb poprawności współdziałania tego układu może ograniczyć błędy operatora w procesie sterowania oraz ich wpływ na proces użytkowania urządzenia i dokładność realizowanych zadań.

Przedmiotem wypowiedzi jest metodyka kształtowania procesu sterowania środkiem transportu ukierunkowana na wymagany jego stan techniczny, na przykładzie suwnicy pomostowej reprezentancie klasy wielkogabarytowych szynowych urządzeń transportowych.

#### 2. SYSTEM MONITOROWANIA PROCESU UŻYTKOWANIA SUWNICY POMOSTOWEJ

W procesie transportu ładunku realizowanym przez suwnice pomostowe dokładność ruchów roboczych, czas realizowanego cyklu jak również jakość eksploatacji urządzenia w istotnym stopniu zależą od podsystemów wykonawczych i sterowania [8]. Niekorzystne zjawiska towarzyszące procesowi przemieszczania ładunku pojawiające się w stanach nieustalonych pracy urządzenia, takie jak oscylacje ładunku zawieszonego na wiotkich cięgnach, ukosowanie mostu suwnicy wynikające z różnicy momentu obciążenia mechanizmów jazdy mostu, przeciążenia w układach napędowych i konstrukcji wpływają na czas i dokładność realizowanego procesu transportowego oraz stan techniczny urządzenia [6].

Złożoność zjawisk towarzyszących przemieszczaniu ładunków wymaga w procesie sterowania uwzględnienia monitorowanej złożonej informacji o procesie. Z punktu widzenia użytkowników suwnic istotnymi zagadnieniami, związanymi z optymalizacją przemieszczanego ładunku jak i jakością eksploatacji urządzenia, są:

- z wymaganą dokładnością pozycjonowanie przemieszczanego ładunku,
- wystarczające tłumienie wychyleń zawieszonego na cięgnie ładunku od stanu równowagi,
- ograniczenie kąta ukosowania mostu suwnicy względem torowiska,
- ograniczenie przeciążeń towarzyszących stanom nieustalonym pracy urządzenia (rozruch, hamowanie) i obciążających dodatkowo konstrukcję i układy napędowe,
- projektowanie i śledzenie bezkolizyjnej trajektorii ruchu przemieszczanego ładunku w trójwymiarowej przestrzeni roboczej urządzenia.

Realizacja powyższych celów możliwa jest poprzez zastosowanie właściwych układów sterowania wspartych układem monitorowania istotnych parametrów eksploatacyjnych urządzenia i otoczenia. Z uwagi na złożoność informacji o procesie, szczególnie przydatne są algorytmy sterowania obejmujące techniki rozmyte, eksperckie, sztuczne sieci neuronowe, lub ich hybrydy. Praktyczne stosowanie inteligentnych technik sterowania wymaga budowy systemów pomiarowokontrolnych umożliwiających rejestrację i przetwarzanie informacji niezbędnej do poprawnej realizacji algorytmu sterowania (w przypadku automatycznej pracy urządzenia), wspomagającego decyzyjny operatora proces (w przypadku sterowania dyspozycyjnego realizowanego przez procesu człowieka) nadzorowania oraz transportowego i stanu technicznego urządzenia [6].

Dla potrzeb badań ukierunkowanych na systemy sterowania i monitorowania procesu transportowego realizowanego przez suwnice pomostowe, opracowany i zbudowany został zintegrowany system nadzorowania pracy rzeczywistego urządzenia, dwudźwigarowej suwnicy pomostowej pracującej w hali produkcyjnej o udźwigu 12,5 ton, wysokości podnoszenia 10 [m] i rozpiętości mostu 16 [m] (rys. 2). Celem zrealizowanego systemu nadzorowania pracy urządzenia transportowego była ocena poprawności działania wybranych metod sterowania, zastosowanych rozwiązań w układach napędowych na podstawie wybranych parametrów eksploatacyjnych urządzenia. Przyjętymi wskaźnikami oceny stanu technicznego urządzenia i poprawności realizowanych zadań transportowych były:

- dokładność i czas pozycjonowania transportowanego ładunku (uchyb statyczny, kąt wychylenia transportowanego ładunku),
- kąt ukosowania mostu suwnicy,
- przeciążenia w układach napędowych mechanizmów ruchu urządzenia (moc czynna pobierana przez układy napędowe),
- odkształcenia i naprężenia konstrukcji mostu oraz lin jako funkcja obciążenia i położenia wciągarki suwnicy,
- opóźnienia występujące w układach sterowania i wykonawczych (np. czas rozruchu, hamowania, czas zadziałania zwalniaka hamulca).
- geometria układu koło-szyna (pomiar ustawienia kół, geometrii jezdni podsuwnicowej przeprowadzany w *off-line*).



Rys. 2. System monitorowania pracy suwnicy

W rezultacie wyników przeprowadzonych badań stwierdzono, że na podstawie powyższych informacji możliwa jest analiza i ocena skutków sterowań realizowanych przez operatora oraz wpływu zastosowanych technik oraz rozwiązań w podzespołach napędowych i sterowania na stan techniczny i dokładność działania urządzenia transportowego typu suwnica pomostowa (reprezentant klasy wielkogabarytowych środków transportowych).

W efekcie monitorowania procesu eksploatacji urządzenia pozyskana informacja, w postaci zmian wybranych parametrów eksploatacyjnych, może zostać poddana analizie pod względem:

- wpływu technik sterowania i zastosowanych rozwiązań w podsystemach wykonawczych i sterowania na stan techniczny urządzenia: przeciążenia konstrukcji i układów napędowych,
- wpływu stanu technicznego urządzenia i zastosowanych technik sterowania na realizowane zadania transportowe: dokładność pozycjonowania, czas cyklu roboczego, tłumienie wahań ładunku,
- wpływu wartości i rozkładu obciążeń konstrukcji mostu oraz przeciążeń w układach napędowych towarzyszących stanom nieustalonym pracy mechanizmów ruchu suwnicy na stan techniczny układu koło-szyna i niekorzystne zjawiska zachodzące w tym układzie.

#### 3. SYSTEM NADZOROWANIA PROCESU UŻYTKOWANIA SUWNICY POMOSTOWEJ

Przedstawiony na rysunku 3 system pomiarowosterujacy umożliwia badanie algorytmów sterowania i ich realizacji na sterowniku PLC (ang. Programmeble Logic Controller) typu FX2N48MR firmy Mitsubishi, a ponadto: pomiar, wizualizację, rejestrację i analizę wybranych parametrów eksploatacyjnych urządzenia. Sygnały pomiarowe wykorzystywane w procesie sterowania podawane były bezpośrednio na wejścia analogowe i cyfrowe sterownika PLC. W układzie pomiarowym zastosowana została karta pomiarowo-sterujaca firmv Advantech PLC818HG umożliwiajaca akwizycję danych pomiarowych, współpracująca oprogramowaniem Matlab. Do celów z monitorowania w czasie rzeczywistym procesu zastosowane zostały narzędzia typu HMI (ang. Human Machine *Interface*) zapewniające współpracę pomiędzy operatorem i procesem zostały sterowanym. Zbudowane aplikacje w programach InTouch oraz Matlab pozwalające na sterowanie i wizualizację procesu sterowanego z poziomu komputera klasy PC.

Wymiana danych pomiędzy sterownikiem PLC realizującym określony algorytm sterowania, a aplikacją programu InTouch oraz środowiskiem Matlab, w którym zbudowane zostały układy pomiarowe, realizowana była z wykorzystaniem protokołu OPC. Zainstalowane kamery cyfrowe przekazujące sygnał za pośrednictwem karty video HICAP100 umożliwiają podgląd obrazu przestrzeni roboczej urządzenia na komputerze PC.



Rys. 3. System nadzorowania procesu transportowego realizowanego przez suwnice pomostową

#### 4. WYKORZYSTANIE HEURYSTYKI W INTELIGENTNYCH SYSTEMACH STEROWANIA PROCESAMI TRANSPORTU

Badania skutków sterowań urządzeniem przez operatora mogą być źródłem informacji wykorzystanej do celów diagnostyki urządzenia i poprawy jakości działania i użytkowania mechanizmów. Doświadczenie operatora procesu, jego wiedza inżynierska wykorzystane mogą być w automatyzacji procesu. Wiedza operatora, użytkownika, czy też doświadczonego inżyniera procesu pozwala na zbudowanie systemu sterowania, w którym algorytm sterowania realizuje heurystyczną strategię sterowania. Przykładem takich systemów sterowania są systemy zbudowane z wykorzystaniem tak zwanych inteligentnych narzędzi obliczeniowych: logiki rozmytej, systemów eksperckich, sztucznych sieci neuronowych.

Modele rozmyte czy systemy eksperckie umożliwiają przedstawienie heurystycznej strategii sterowania pozyskanej od doświadczonego operatora procesu w postaci reguł decyzyjnych typu Jeżeli-To. Inteligentny system sterowania budowany jest często na podstawie informacji pozyskiwanych od operatora-inżyniera w postaci opisu procesu decyzyjnego. Opis ten wyrażony może być językiem naturalnym przedstawiającym zależność typu sytuacja-działanie: ... jeżeli stan procesu jest ... to należy ... Źródłem takiej informacji mogą być na przeprowadzane przykład ankiety na doświadczonych operatorach i użytkownikach danego procesu, na podstawie których możliwe jest opracowanie algorytmu sterowania

i zaimplementowanie go w procesie sterowanym (na przykład poprzez przedstawienie go w postaci języka programowania, czy też języka maszynowego, zrozumiałego dla zastosowanego urządzenia sterującego (rys. 4).



#### Rys. 4. Implementacja strategii sterowania zbudowanej na podstawie wiedzy użytkownika procesu

Wiedza i doświadczenie operatorów i użytkowników, jako źródło informacji o procesie, wykorzystywane są do celów budowy systemów sterowania, systemów wspomagających, decyzyjnych, zarządzania i organizacji w procesach transportowych. Umożliwiają one rozwiązywanie problemów spotykanych szeregu złożonych w inżynierii transportu, a także w systemach sterowania środkami transportu (transport lądowy, morski, powietrzny, bliski).

Przedstawiony na rys. 3 system umożliwia prowadzenie badań na obiekcie rzeczywistym ukierunkowanych na prototypowanie systemów sterowania opartych na inteligentnych metodach obliczeniowych. Zastosowana architektura sprzętowo-programowa pozwala na prowadzenie eksperymentów w czasie rzeczywistym na obiekcie, testowanie i weryfikację algorytmów sterowania opracowanych na modelach matematycznych urządzenia w środowisku Matlab/Simulink oraz układów kontrolno-pomiarowych, a następnie dalsza implementację z użyciem docelowego ich sterownika przemysłowego.

#### 5. SZYBKIE PROTOTYPOWANIE STEROWANIA PROCESAMI TRANSPORTU

W procesie szybkiego prototypowania podsystemu sterowania ruchem suwnicy pomostowej można wyróżnić cztery etapy przedstawiające metodykę realizowanych badań (rys. 5):

1. opracowanie i zbudowanie matematycznych modeli suwnicy w programie Matlab/Simulink,

- opracowanie algorytmu sterowania oraz jego badania symulacyjne w środowisku programowym Matlab'a,
- budowa, testowanie i dostrajanie systemu sterowania i rozmytego algorytmu sterowania na drodze eksperymentów prowadzonych na obiekcie rzeczywistym,
- 4. implementacja algorytmu sterowania na sterowniku programowalnym PLC.



Rys. 5. Proces szybkiego prototypowania podsystemu sterowania urządzenia

Proces szybkiego prototypowania podsystemu sterowania znaczaco skraca czas jego projektowania: budowy i badania regulatora. optymalizacii algorytmu, dostrajania parametrów regulatora. doboru czasu próbkowania oraz testowania poprawności działania elementów zbudowanego układu pomiarowo-sterującego. Proces szybkiego prototypowania podsystemu sterowania realizowany jest poprzez badania opracowanego algorytmu sterowania na matematycznym modelu obiektu sterowania w czasie symulacji komputerowych, a następnie weryfikacji podsystemu sterowania na drodze eksperymentów prowadzonych na obiekcie rzeczywistym. W rezultacie eksperymentów na urządzeniu rzeczywistym możliwe jest dostrojenie parametrów układu (czas próbkowania, kwantyzacja sygnałów pomiarowych i sterujących) oraz walidacja modelu matematycznego obiektu sterowanego.

Ważnym etapem szybkiego prototypowania algorytmu sterowania jest mechanizm automatycznego generowania kodu źródłowego i kompilacji na podstawie schematu blokowego układu sterowania zbudowanego w programie Simulink. Umożliwia on płynne przejście z etapu badań symulacyjnych prowadzonych na cyfrowym modelu układu sterowania do etapu badań eksperymentalnych, w którym regulator oraz układ pomiarowo-sterujący testowany jest na obiekcie rzeczywistym.

Przykładowe wyniki badań przedstawionej metodologii projektowania algorytmów dla potrzeb podsystemu sterowania (z użyciem logiki rozmytej) oraz z wykorzystaniem opracowanego układu monitoringu wybranych parametrów eksploatacyjnych suwnicy pomostowej przedstawiono w pracy [6].

#### 6. UWAGI KOŃCOWE

Zapewnienie wymaganego poziomu eksploatacyjnej niezawodności środków transportowych odgrywa coraz istotniejszą rolę w zautomatyzowanych procesach produkcyjnych, przełożenie bezpośrednie na działanie ma wydajność procesu produkcyjnego. Dla i powyższego istotnym jest ciągły monitoring stanu technicznego urzadzenia i podejmowanie właściwych przedsięwzięć typu prewencyjnego w zakresie utrzymania wymaganego potencjału eksploatacyjnego układu człowiek - maszyna. W systemach, w których sterowanie realizowane jest przez człowieka poprawność wykonywanych zadań zależy od współdziałania układu człowiek-maszyna. Poprawne działanie systemu zależy, z jednej strony zastosowanych od środków technicznych zastosowanych w podsystemach wykonawczych i sterowania dostosowanych do możliwości psychofizycznych operatora, a z drugiej strony od doświadczenia i wiedzy operatora o procesie.

W rezultacie monitoringu procesu sterowania urządzeniem w określonych warunkach otoczenia i jego wybranych parametrów eksploatacyjnych, możliwa jest budowa wskaźników jakości użytkowania układu człowiek (automat) - maszyna. Analiza wskaźników użytkowania umożliwia badanie wpływu zastosowanych metod sterowania realizowanych przez człowieka, rozwiązań technicznych zastosowanych w podsystemach wykonawczych i sterowania na spełnienie wymagań jakościowych i ilościowych użytkownika w zakresie działania oraz stanu technicznego urządzenia.

Ważnym elementem badań może być pozyskanie wiedzy 0 procesie i wykorzystanie jej w implementacji nowych rozwiązań technicznych i organizacyjnych w celu poprawy eksploatacji. Przykładem wykorzystania wiedzy operatora procesu (działania w rezultacie zastosowania być inteligentny urzadzenia) może system wspomagania procesu decyzyjnego, lub inteligentny system sterowania (zbudowany z wykorzystaniem modelowania rozmytego, systemów eksperckich oraz sztucznych sieci neuronowych). Systemy eksperckie oraz logika rozmyta umożliwiają zbudowanie układu sterowania, w którym strategia

sterowania procesem realizowana jest na podstawie algorytmu opracowanego na podstawie wiedzy doświadczonego użytkownika procesu. Przedmiotowa wiedza przedstawiana jest w formie reguł *jeżeli-to* określających zależności typu sytuacja-działanie.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2005-2008 jako projekt badawczy.

#### LITERATURA

- 1. Horacek P., Simandl M., Zitek P., Eds. (2005). Preprints of the 16th IFAC World Congress 2005, Prague.
- Dąbrowski T.M. (2001). Diagnozowanie systemów antropotechnicznych w ujęciu potencjałowo - efektowym. Wojskowa Akademia Techniczna, nr 2676/ 2001, Warszawa.
- Jaźwiński J., Szpytko J. (2006). Investigation of the device technical state changes in operation process. CAD/CAM Robotics and Factories of the Future (Eds. Narayanan S. et al), ISPE, Vellore Institute of Technology, Deemed University, s.813-821, Narosa Publishing House, New Delhi.
- Jaźwiński J., Żurek J., Smalko Z. (2003). Wybrane problemy prognozowania stanów niezawodnościowych obiektów technicznych. Materiały XXXI Zimowej Szkoły Niezawodności, SPE KBM PAN, s. 196-206, Szczyrk.
- Smoczek J., Szpytko J. (2005). The rapid prototyping of a crane intelligent control system. In: *The International Journal of INGENIUM*, Vol. 4, pp. 415-422.
- Smoczek J., Szpytko J. (2006). Fuzzy logic implementation on the PLC controller in the crane's control system. Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Domek S. and Kaszyński R. Eds., Technical University of Szczecin, Szczecin, 2006.
- Szpytko J., Jaźwiński J., Woźniak D. A. (2006). *Reliability shaping aspects of man – automated device set.* Journal of KONBiN, v.1, no 2/2006, p. 41-46, Air Force Institute of Technology, Warszawa.
- Szpytko J. (2004a). Integrated decision making supporting the exploitation and control of transport devices. In: Monographs, UWND AGH, Krakow.
- Szpytko J. (2004b). Kształtowanie procesu eksploatacji środków transportu bliskiego. Biblioteka Problemów Eksploatacji, ITE, Kraków - Radom.



Dr inż. Jarosław SMOCZEK, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki. Specjalista z zakresu budowy i eksploatacji systemów i środków transportu bliskiego; automatyka, monitoring i diagnostyka. Autor lub współautor ponad 20 opublikowanych prac w języku polskim i angielskim.

Prof. dr hab. inż. **Janusz** SZPYTKO, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki. Specjalista z zakresu budowy i eksploatacji systemów i środków transportu; automatyka, bezpieczeństwo

i niezawodność, monitoring i diagnostyka, systemy decyzyjne. Autor lub współautor ponad 270 języku opublikowanych prac polskim w i angielskim. Członek STŚTKT PAN, TC IFAC, SEFI, PTD, PTB, PSRA, ISA, SITPH i inne. Profesor wizytujący, m.in.: w Glasgow Caledonian University, Staffordshire University, Middlesex University I/ CRAN, University, Poincare Politecnico di Milano. Koordynator i uczestnik projektów naukowo-badawczych i edukacyjnych krajowych i międzynarodowych. Członek krajowych i międzynarodowych komitetów naukowych konferencji i sympozjów.

# ANALIZA BEZPIECZEŃSTWA SYSTEMÓW WIELOSTANOWYCH W ZMIENNYCH WARUNKACH EKSPLOATACJI

Joanna SOSZYŃSKA

Akademia Morska w Gdyni 81-225 Gdynia, Morska 81-87, e-mail: joannas@am.gdynia.pl

#### Streszczenie

W artykule zaproponowano wielostanowe podejście do oceny bezpieczeństwa systemów oraz zastosowane są procesy sami-markova do modelowania ich procesu eksploatacji. Zdefiniowano funkcję bezpieczeństwa systemu i funkcja ryzyka systemu. Zaproponowano również podejście do rozwiązania bardzo ważnego, praktycznego problemu powiązania bezpieczeństwa systemów z ich procesami eksploatacji. Zastosowanie proponowanej metody zostało przedstawione na przykładzie oceny bezpieczeństwa portowego systemu transportu paliwa.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo systemów, systemy wielostanowe, diagnostyka, transport rurociągowy.

#### MULTI-STATE SYSTEM SAFETY ANALYSIS IN CHANGING OPERATION CONDITIONS

#### Summary

A multi-state approach to estimation of the systems' safety is proposed and a semi-markov processes for their operation modelling are applied. A system safety function and a system risk function are defined. The paper offers an approach to the solution of a practically very important problem of linking the systems' safety and their operation processes. Application of the proposed method is illustrated in the safety evaluation of the port oil transportation system.

Keywords: system safety, multi-state systems, diagnostics, piping transport.

#### **1. WPROWADZENIE**

Z uwagi na bezpieczeństwo oraz efektywność eksploatacji systemów podczas analizy ich bezpieczeństwa wskazanym jest odejście od modelu dwustanowego ich bezpieczeństwa. Przyjęcie założenia, że są one wielostanowymi systemami starzejącymi się z powodu pogarszających się w czasie stanów technicznych ich elementów jest podstawą do bardziej dokładnej analizy ich procesu eksploatacji. Założenie to pozwala na wyróżnienie progowego stanu krytycznego systemu, którego przekroczenie jest niebezpieczne dla otoczenia lub też nie zapewnia odpowiedniego poziomu efektywności eksploatacji tego systemu. Wtedy podstawową charakterystyką bezpieczeństwa systemu staje się rozkład czasu do przekroczenia stanu progowego zwany funkcją ryzyka systemu. Rozkład ten jest ściśle wyznaczony przez wielostanową funkcję bezpieczeństwa systemu. procesów Modelowanie skomplikowanych eksploatacji systemów jest trudne przede wszystkim z powodu dużej liczby stanów eksploatacyjnych, Z powodu często spotykanej niemożności precyzyjnego ich zdefiniowania oraz z powodu niemożności dokładnego opisu zmian pomiędzy tymi stanami. Dobrym podejściem do modelowania tych skomplikowanych procesów wydaje się być opis ich za pomocą procesów semi-markowskich. Połączenie modelowania bezpieczeństwa systemów

wielostanowych z modelem semi-markowskim procesów eksploatacji tych systemów jest podstawowym zadaniem badawczym niniejszej pracy.

#### 2. POJĘCIA PODSTAWOWE

W celu wprowadzenia wielostanowego podejścia do analizy bezpieczeństwa systemów przyjmujemy, że ([2], [3], [4]):

- $E_{ij}$ ,  $i = 1, 2, ..., k_n$ ,  $j = 1, 2, ..., l_i$ , są elementami systemu,
- wszystkie rozważane elementy oraz system mają zbiór stanów bezpieczeństwa  $\{0,1,...,z\}, z \ge 1$ ,
- stany są uporządkowane, 0 jest stanem najgorszym natomiast stan *z* jest najlepszym,
- $T_{ij}(u)$  są niezależnymi zmiennymi losowymi reprezentującymi czasy przebywania elementów  $E_{ij}$  w podzbiorze stanów {u,u+1,...,z}, podczas gdy elementy te w chwili t = 0 znajdowały się w stanie z,
- T(u) jest zmienną losową reprezentującą czas przebywania systemu w podzbiorze stanów  $\{u,u+1,...,z\}$ , podczas gdy w chwili t = 0 system ten znajdował w stanie *z*,
- stany bezpieczeństwa systemu oraz elementów pogarszają się wraz z upływem czasu t,

- $E_{ij}(t)$  jest stanem elementu  $E_{ij}$  w chwili t,  $t \in (-\infty,\infty)$ , podczas gdy element ten w chwili t = 0 znajdował się w stanie z,
- S(t) jest stanem systemu w chwili t, t ∈ (-∞,∞), podczas gdy system w chwili t = 0 znajdował się w stanie z.

Powyższe założenia oznaczają, że stany bezpieczeństwa systemu oraz elementów mogą zmieniać się w czasie tylko od lepszych do gorszych. Sposób, w jaki zmieniają się stany elementów i systemu zilustrowany jest na rys. 1.



stan najgorszy

Rys. 1. Zmiany stanów bezpieczeństwa systemu

stan najlepszy

Definicja 1. Wektor:

$$s_{ij}(t,\cdot) = [s_{ij}(t,0), s_{ij}(t,1), \dots, s_{ij}(t,z)]$$
  
dla  $t \in (-\infty,\infty), i = 1, 2, \dots, k_n, j = 1, 2, \dots, l_i$ , gdzie

$$s_{ij}(t,u) = P(E_{ij}(t) \ge u \mid E_{ij}(0) = z) = P(T_{ij}(u) > t)$$
(1)

dla  $t \in (-\infty,\infty)$ , u = 0,1,...,z, jest prawdopodobieństwem tego, że element  $E_{ij}$  w chwili  $t, t \in (-\infty,\infty)$ , znajduje się w jednym ze stanów podzbioru  $\{u,u+1,...,z\}$ , podczas gdy w chwili t = 0 znajdował się w stanie z, nazywamy wielostanową funkcją bezpieczeństwa elementu  $E_{ij}$ .

Definicja 2. Wektor:

$$s_n(t, \cdot) = [s_n(t,0), s_n(t,1), \dots, s_n(t,z)], t \in (-\infty, \infty),$$

gdzie:

$$s_n(t,u) = P(S(t) \ge u \mid S(0) = z) = P(T(u) > t)$$
 (2)  
dla  $t \in (-\infty, \infty), u = 0, 1, ..., z,$ 

jest prawdopodobieństwem tego, że system w chwili  $t, t \in (-\infty,\infty)$ , znajduje się w podzbiorze stanów  $\{u,u+1,...,z\}$ , podczas gdy w chwili t = 0 znajdował się w stanie z, nazywamy wielostanową funkcją bezpieczeństwa systemu.

Definicja 3. Prawdopodobieństwo:

$$\mathbf{r}(t) = P(S(t) < r \mid S(0) = z) = P(T(r) \le t), t \in (-\infty, \infty),$$

tego, że system w chwili *t* znajduje się w podzbiorze stanów bezpieczeństwa gorszych niż stan krytyczny  $r, r \in \{1,...,z\}$ , podczas gdy w chwili t = 0 znajdował się w stanie *z*, nazywamy funkcją ryzyka systemu lub krótko ryzykiem.

Przy tej definicji, uwzględniając (2), mamy:

$$r(t) = 1 - P(S(t) \ge r \mid S(0) = z) = 1 - s_n(t,r)$$
(3)  
dla  $t \in (-\infty,\infty)$ .

Ponadto, jeśli  $\tau$  jest chwilą, w której ryzyko przekroczy pewien dopuszczalny poziom  $\delta$ ,  $\delta \in \langle 0, 1 \rangle$ , to

$$\tau = \mathbf{r}^{-1}(\delta),\tag{4}$$

gdzie  $r^{-1}(t)$ , jeśli istnieje, jest funkcją odwrotną funkcji ryzyka r(t).

#### 2. BEZPIECZEŃSTWO SYSTEMU SZEREGOWO-PROGOWEGO

**Definicja 4**. System wielostanowy nazywamy szeregowo-progowym "m z  $k_n$ ",  $m \le k_n$ , jeśli jego czas T(u) przebywania w podzbiorze stanów bezpieczeństwa  $\{u, u+1, ..., z\}$  określony jest wzorem:

$$T(u) = T_{(k_n - m + 1)}(u), u = 1, 2, ..., z$$
,

gdzie  $T_{(k_n-m+1)}(u)$  jest *m*-tą statystyką maksymalną w zbiorze zmiennych losowych:

$$T_i(u) = \min_{1 \le j \le l_i} \{T_{ij}(u)\}, \ i = 1, 2, ..., k_n, \ u = 1, 2, ..., z.$$

Powyższa definicja oznacza, że wielostanowy system szeregowo-progowy znajduje się w podzbiorze stanów  $\{u,u+1,...,z\}$  wtedy i tylko wtedy, gdy co najmniej *m* z jego  $k_n$  podsystemów szeregowych znajduje się w tym podzbiorze stanów. Można uzasadnić następujący fakt. System wielostanowy szeregowo-progowy jest systemem wielostanowym szeregowym, gdy  $m = k_n = 1$ , natomiast jest systemem wielostanowym szeregoworównoległym, gdy m = 1,  $k_n > 1$ .

*Wniosek* 1. Funkcja bezpieczeństwa wielostanowego systemu szeregowo-progowego określona jest wzorem

$$\boldsymbol{s}_{k_{n},l_{1},l_{2},...,l_{k_{n}}}^{(m)}\left(t,\cdot\right) = [1,\,\boldsymbol{s}_{k_{n},l_{1},l_{2},...,l_{k_{n}}}^{(m)}\left(t,1\right),\,...,\,\boldsymbol{s}_{k_{n},l_{1},l_{2},...,l_{k_{n}}}^{(m)}\left(t,z\right)],$$

gdzie:

$$\begin{split} \mathbf{s}_{k_{n},l_{1},l_{2},\ldots,l_{k_{n}}}^{(m)}\left(t,u\right) &= \\ 1 - \sum_{\substack{r_{1},r_{2},\ldots,r_{k_{n}}=0\\r_{1}+r_{2}+\ldots+r_{k_{n}}\leq m-1}}^{1} \prod_{i=1}^{k_{n}} \sum_{j=1}^{l_{i}} s_{ij}(t,u)^{r_{i}} \left[1 - \prod_{j=1}^{l_{i}} s_{ij}(t,u)\right]^{1-r_{i}}, \end{split}$$

 $t \in (-\infty, \infty), \ u = 1, 2, \dots, z,$ 

lub wzorem:

$$\vec{s}_{k_{n},l_{1},l_{2},...,l_{k_{n}}}^{(m)}(t,\cdot) = [1, \vec{s}_{k_{n},l_{1},l_{2},...,l_{k_{n}}}^{(m)}(t,1), ..., \vec{s}_{k_{n},l_{1},l_{2},...,l_{k_{n}}}^{(m)}(t,z)],$$

gdzie:

$$\begin{split} & \stackrel{-(m)}{s}_{k_{n},l_{1},l_{2},...,l_{k_{n}}}(t,u) = \\ & \sum_{\substack{r_{1},r_{2},...,r_{k_{n}}=0\\r_{1}+r_{2}+...+r_{k_{n}}\leq k_{n}-m}}^{l} \prod_{i=1}^{k_{n}} [1-\prod_{j=1}^{l_{i}} s_{ij}(t,u)]^{r_{i}} [\prod_{j=1}^{l_{i}} s_{ij}(t,u)]^{1-r_{i}}, \\ & t \in (-\infty,\infty), \ u = 1,2,...,z. \end{split}$$

**Definicja** 5. Wielostanowy system szeregowoprogowy " $m \ge k_n$ " nazywamy regularnym jeśli:

$$l_1 = l_2 = \ldots = l_{k_n} = l_n, \, l_n \in N.$$

**Definicja 6**. Wielostanowy regularny system szeregowo-progowy "*m* z  $k_n$ " nazywamy niejednorodnym, jeśli składa się z podsystemów szeregowych *a* typów,  $1 \le a \le k_n$ ,  $k_n \in N$ , oraz frakcja podsystemów szeregowych *i*-tego typu w systemie jest równa  $q_i$ , gdzie  $q_i > 0$ ,  $\sum_{i=1}^{a} q_i = 1$ . Ponadto podsystem szeregowy *i*-tego typu składa się z elementów  $e_i$  typów,  $1 \le e_i \le l_n$ ,  $l_n \in N$ , o składowych wielostanowej funkcji

$$s^{(i,j)}(t,u) = 1 - F^{(i,j)}(t,u), \quad j = 1,2,...,e_i,$$
  
 $u = 1,2,...,z,$ 

bezpieczeństwa:

oraz frakcja elementów *j*-tego typu w tym podsystemie jest równa  $p_{ij}$ , gdzie  $p_{ij} > 0$  oraz  $\sum_{j=1}^{e_i} p_{ij} = 1.$ 

Wniosek2.Funkcjabezpieczeństwaniejednorodnegowielostanowegosystemuszeregowo-progowego"mz $k_n$ "określona jestwzorem:

$$\mathbf{s'}_{k_{n}l_{n}}^{(m)}(t,\cdot) = [1, \mathbf{s'}_{k_{n}l_{n}}^{(m)}(t,1), \mathbf{s'}_{k_{n}l_{n}}^{(m)}(t,2), \dots, \mathbf{s'}_{k_{n}l_{n}}^{(m)}(t,z)],$$

gdzie:

$$\begin{split} s^{(m)}_{k_{n}l_{n}}(t,u) \\ = &1 - \sum_{\substack{r_{1}+\ldots+r_{n}=0\\0 \leq r_{i} \leq q_{i}k_{n}}}^{m-1} \prod_{i=1}^{a} {\binom{q_{i}k_{n}}{r_{i}}} s^{(i)}(t,u) ^{l_{n}r_{i}} [1 - (s^{(i)}(t,u))^{l_{n}}]^{q_{i}k_{n}-r_{i}}, \\ t \in (-\infty,\infty), \end{split}$$

lub wzorem:

$$\bar{s}_{k_{n}l_{n}}^{\prime(m)}(t,\cdot) = [1, \bar{s}_{k_{n}l_{n}}^{\prime(m)}(t,1), \bar{s}_{k_{n}l_{n}}^{\prime(m)}(t,2), ..., \bar{s}_{k_{n}l_{n}}^{\prime(m)}(t,z)],$$
gdzie:

$$\vec{s}_{k_{n}l_{n}}^{(m)}(t,u) = \sum_{\substack{r_{1}+\ldots+r_{a}=0\\0\leq r_{i}\leq q_{i}k_{n}}}^{k_{n}-m} \prod_{i=1}^{a} {q_{i}k_{n} \choose r_{i}} \left[1 - (s^{(i)}(t,u))^{l_{n}}\right]^{r_{i}} \left[(s^{(i)}(t,u))^{l_{n}}\right]^{(q_{i}k_{n}-r_{i})},$$
  
$$t \in (-\infty,\infty),$$
  
przy czym:

$$s^{(i)}(t,u) = \prod_{j=1}^{e_i} [s^{(i,j)}(t,u)]^{p_{ij}}, i = 1,2,...,a,$$
  
$$u = 1,2,...,z.$$

*Wniosek* 3. Jeśli elementy niejednorodnego wielostanowego systemu szeregowo-progowego mają wykładniczą funkcję bezpieczeństwa, tzn., gdy:

$$s^{ij}(t,\cdot) = [1, s^{ij}(t,1), \dots, s^{ij}(t,z)],$$

gdzie:

$$s^{ij}(t,u) = 1, t < 0,$$

$$s^{ij}(t,u) = \exp[-\lambda_{ij}(u)t], t \ge 0, \lambda_{ij}(u) > 0$$
  
dla  $u = 1, 2, ..., z, i = 1, 2, ..., a, j = 1, 2, ..., e_i,$ 

to jego funkcja bezpieczeństwa określona jest wzorem

$$\boldsymbol{s'}_{k_{n}l_{n}}^{\cdot(m)}(t,\cdot) = \left[1, \boldsymbol{s'}_{k_{n}l_{n}}^{(m)}(t,1), \boldsymbol{s'}_{k_{n}l_{n}}^{(m)}(t,2), \dots, \boldsymbol{s'}_{k_{n}l_{n}}^{(m)}(t,z)\right],$$

gdzie:

$$s'_{k_n l_n}^{(m)}(t,u) = 1$$
 dla  $t < 0$ ,

$$s_{k_{n}l_{n}}^{(m)}(t,u) = 1 - \sum_{\substack{r_{1}+\ldots+r_{a}=0\\0\leq r_{i}\leq q_{i}k_{n}}}^{m-1} \prod_{i=1}^{a} {q_{i}k_{n} \choose r_{i}} [(s^{(i)}(t,u))^{l_{n}}]^{r_{i}} [1 - (s^{(i)}(t,u))^{l_{n}}]^{(q_{i}k_{n}-r_{i})}]$$

dla  $t \ge 0$ ,

lub

$$\vec{s}_{k_{n}l_{n}}^{\prime(m)}(t,\cdot) = [1, \vec{s}_{k_{n}l_{n}}^{\prime(m)}(t,1), \vec{s}_{k_{n}l_{n}}^{\prime(m)}(t,2), ..., \vec{s}_{k_{n}l_{n}}^{\prime(m)}(t,z)],$$

gdzie:

$$\bar{s'}_{k_n l_n}^{(m)}(t,u) = 1 \text{ dla } t < 0,$$

$$\bar{\mathbf{s}'}_{k_{n}l_{n}}^{(m)}(t,u) = \sum_{\substack{r_{1}+\ldots+r_{a}=0\\0\leq r_{i}\leq q_{i}k_{n}}}^{k_{n}-m} \prod_{i=1}^{a} {q_{i}k_{n} \choose r_{i}} [1-(s^{(i)}(t,u))^{l_{n}}]^{r_{i}} [(s^{(i)}(t,u))^{l_{n}}]^{(q_{i}k_{n}-r_{i})}]$$

dla  $t \ge 0$ ,

przy czym:

$$s^{(i)}(t,u) = \prod_{j=1}^{e_i} [\exp[-p_{ij}\lambda_{ij}(u)t]], i = 1, 2, ..., a,$$
  
$$u = 1, 2, ..., z.$$

#### 3. BEZPIECZEŃSTWO SYSTEMU SZEREGOWO-PROGOWEGO W ZMIENNYCH WARUNKACH EKSPLOATACYJNYCH

Zakładamy, że system podczas eksploatacji przyjmuje v,  $v \in N$  różnych stanów eksploatacyjnych. Stąd możemy zdefiniować proces eksploatacji systemu Z(t),  $t \in <0,\infty)$ , z dyskretnymi stanami ze zbioru stanów:

$$Z = \{z_1, z_2, ..., z_{\nu}\}.$$

Przyjmujemy semi-markowski model ([1]) procesu eksploatacji systemu Z(t) oznaczmy przez  $\theta_{bl}$  jego losowe warunkowe czasy przebywania w stanie eksploatacyjnym  $z_b$  przy warunku, że następne przejście nastąpi do stanu eksploatacyjnego  $z_l$ , b, l = 1,2,...,v,  $b \neq l$ . Wtedy proces ten można opisać przez:

- macierz prawdopodobieństw przejść pomiędzy tymi stanami  $[p_{bl}]_{vxv}$ , gdzie  $p_{bb} = 0$  dla b = 1, 2, ..., v,

- macierz  $[H_{bl}(t)]_{vxv}$  warunkowych dystrybuant czasów  $\theta_{bl}$  przebywania procesu Z(t) w stanie eksploatacyjnym  $z_b$  przy warunku, że następne przejście nastąpi do stanu eksploatacyjnego  $z_l$ , b, l= 1,2,...,v,  $b \neq l$ , gdzie  $H_{bl}(t) = P(\theta_{bl} < t)$  dla  $b, l = 1,2,...,v, b \neq l$ , i H(t) = 0 dla b = 1,2,...,v.

Przy tych założeniach, wartości oczekiwane  $E[\theta_{bl}]$  określone są wzorem:

$$M_{bl} = E[\theta_{bl}] = \int_{0}^{\infty} t dH_{bl}(t), \ b, l = 1, 2, ..., v, \ b \neq l.$$
(5)

Bezwarunkowe dystrybuanty czasów  $\theta_b$ przebywania procesu Z(t) w stanie eksploatacyjnym  $z_b$ , b = 1,2,...,v, określone są wzorem:

$$H_b(t) = \sum_{l=1}^{v} p_{bl} H_{bl}(t), \ b = 1, 2, ..., v,$$

natomiast wartości oczekiwane  $E[\theta_b]$  zmiennych  $\theta_b$  określone są odpowiednio:

$$M_{b} = E[\theta_{b}] = \sum_{l=1}^{v} p_{bl} M_{bl}, b = 1, 2, ..., v,$$

gdzie  $M_{bl}$  są określone przez (5).

Graniczne wartości prawdopodobieństw chwilowych w poszczególnych stanach eksploatacyjnych:

$$p_b(t) = P(Z(t) = z_b), t \in <0,+\infty), b = 1,2,...,v,$$

są określone przez

$$p_{b} = \lim_{t \to \infty} p_{b}(t) = \frac{\pi_{b}M_{b}}{\sum_{l=1}^{v} \pi_{l}M_{l}}, \quad b = 1, 2, ..., v,$$
(6)

gdzie prawdopodobieństwa  $\pi_b$  występujące we wzorze (6) spełniają układ równań:

$$\begin{cases} [\pi_b] = [\pi_b] [p_{bl}] \\ \sum_{l=1}^{\nu} \pi_l = 1 \end{cases},$$

gdzie

$$[\pi_b] = [\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_v].$$

Zakładamy, że zmiany stanów procesu eksploatacji Z(t) powodują zmiany funkcji bezpieczeństwa elementów systemu  $E_{ij}$ . Ponadto zakładamy, że proces eksploatacji systemu ma wpływ na jego strukturę bezpieczeństwa.

Oznaczmy, więc warunkową funkcję bezpieczeństwa elementu  $E_{ij}$  systemu, podczas gdy system znajduje się w stanie eksploatacyjnym  $z_b$ , b = 1, 2, ..., v, przez:

$$[s^{(i,j)}(t,\cdot)]^{(b)} = [1, [s^{(i,j)}(t,1)]^{(b)}, ..., [s^{(i,j)}(t,z)]^{(b)}],$$

gdzie dla  $t \in < 0, \infty$ ), b = 1, 2, ..., v, u = 1, 2, ..., z,

$$[s^{(i,j)}(t,u)]^{(b)} = P(T^{(b)}_{ij}(u) > t | Z(t) = z_b),$$

natomiast warunkową funkcję bezpieczeństwa systemu szeregowo-progowego " $m \ge k_n$ "oznaczmy przez:

$$[\mathbf{s'}_{k_n,l_n}^{(m)}(t,\cdot)]^{(b)} = [1, [\mathbf{s'}_{k_n,l_n}^{(m)}(t,1)]^{(b)}, \dots, [\mathbf{s'}_{k_n,l_n}^{(m)}(t,z)]^{(b)}$$

gdzie dla  $t \in < 0, \infty$ ), b = 1, 2, ..., v, u = 1, 2, ..., z,

$$[s'_{k_n,l_n}^{(m)}(t,u)]^{(b)} = P(T^{(b)}(u) > t | Z(t) = z_b)$$

$$\bar{\boldsymbol{s}}_{k_{n},l_{n}}^{(m)}(t,\cdot) = [1, \bar{\boldsymbol{s}}'_{k_{n},l_{n}}^{(m)}(t,1), ..., \bar{\boldsymbol{s}}'_{k_{n},l_{n}}^{(m)}(t,z)],$$

gdzie

$$\overline{\mathbf{s}'}_{k_n,l_n}^{(m)}(t,u) = P(T(u) > t)$$

$$=1-\sum_{\substack{r_1+\ldots+r_a=0\\0\le r_i\le q_ik_n}}^{m-1}\prod_{i=1}^{a} \binom{q_ik_n}{r_i} [([s^{(i)}(t,u))]^{(b)^{l_n}}]^{r_i} [1-([s^{(i)}(t,u)]^{(b)})^{l_n}]^{(q_ik_n-r_i)} \qquad \cong \sum_{b=1}^{\nu} p_b [\overline{s'}_{k_n,l_n}^{(m)}(t,u)]^{(b)}, \ t\ge 0, \tag{8}$$

lub przez:

$$\begin{split} & [\bar{\boldsymbol{s}}'_{k_{n},l_{n}}^{(m)}(t,\cdot)]^{(b)} = [1, [\bar{\boldsymbol{s}}'_{k_{n},l_{n}}^{(m)}(t,1)]^{(b)}, \dots, \\ & [\bar{\boldsymbol{s}}'_{k_{n},l_{n}}^{(m)}(t,z)]^{(b)}, \end{split}$$

gdzie dla  $t \in < 0, \infty$ ), b = 1, 2, ..., v, u = 1, 2, ..., z,

$$\begin{bmatrix} \overline{s}'_{k_{n},l_{n}}^{(m)}(t,u) \end{bmatrix}^{(b)} = P(T^{(b)}(u) > t | Z(t) = z_{b})$$
  
= 
$$\sum_{\substack{r_{1}+\ldots+r_{a}=0\\0 \le r_{i} \le q_{i}k_{n}}}^{k_{n}-m} \prod_{i=1}^{a} \binom{q_{i}k_{n}}{r_{i}} [1 - ([s^{(i)}(t,u)]^{(b)})^{l_{n}}]^{r_{i}} [([s^{(i)}(t,u)]^{(b)})^{l_{n}}]^{(q_{i}k_{n}-r_{i})}$$

Funkcja bezpieczeństwa elementu  $[s^{(i,j)}(t, \cdot)]^{(b)}$ jest warunkowym prawdopodobieństwem tego, że czas  $T_{ij}^{(b)}(u)$  przebywania elementu  $E_{ij}$  systemu w podzbiorze stanów bezpieczeństwa  $\{u, u+1, ..., z\}$ jest nie krótszy niż t, podczas gdy proces eksploatacji Z(t) tego systemu znajduje się w stanie z<sub>b</sub>. Podobnie funkcja bezpieczeństwa systemu  $\left[\boldsymbol{s'}_{k_n,l_n}^{(m)}\left(t,u\right)\right]^{(b)}$  $[\overline{\boldsymbol{s}'}_{k_n,l_n}^{(m)}(t,u)]^{(b)}$ lub jest warunkowym prawdopodobieństwem tego, że czas  $T^{(b)}(u)$  przebywania systemu w podzbiorze stanów bezpieczeństwa  $\{u, u+1, ..., z\}$  jest nie krótszy niż t, podczas gdy proces eksploatacji Z(t) znajduje się w stanie  $z_b$ . W przypadku, gdy czas eksploatacji jest dostatecznie duży bezwarunkowa funkcja bezpieczeństwa systemu określona jest wzorem:

$$\boldsymbol{s}_{k_{n},l_{n}}^{(m)}(t,\cdot) = [1, \boldsymbol{s'}_{k_{n},l_{n}}^{(m)}(t,1), ..., \boldsymbol{s'}_{k_{n},l_{n}}^{(m)}(t,z)],$$

gdzie:

$$s'_{k_{n},l_{n}}^{(m)}(t,u) = P(T(u) > t)$$
  
$$\cong \sum_{b=1}^{\nu} p_{b} [s'_{k_{n},l_{n}}^{(m)}(t,u)]^{(b)}, \quad t \ge 0,$$
(7)

lub

dla u = 1, 2, ..., z, oraz T(u) jest bezwarunkowym czasem przebywania systemu w podzbiorze stanów bezpieczeństwa  $\{u, u + 1, ..., z\}$ .

Wartości średnie i odchylenia standardowe czasu przebywania systemu szeregowo-progowego "mz  $k_n$ " w podzbiorach stanów wynoszą odpowiednio:

$$M(u) \cong \sum_{b=1}^{\nu} p_b M_b(u), \quad u = 1, 2, ..., z,$$
(9)

gdzie

$$M_{b}(u) = \int_{0}^{\infty} [s'_{k_{n},l_{n}}^{(m)}]^{(b)}(t,u)dt, \qquad (10)$$

). lub

$$M_{b}(u) = \int_{0}^{\infty} \left[ \overline{s}'_{k_{n}, l_{n}}^{(m)} \right]^{(b)}(t, u) dt, \qquad (11)$$

oraz

$$D[T^{(b)}(u)] = 2 \int_{0}^{\infty} t [s'_{k_{n} l_{n}}^{(m)}(t, u)]^{(b)} dt - E^{2}[T^{(b)}(u)], \quad (12)$$

lub

$$D[T^{(b)}(u)] = 2\int_{0}^{\infty} t[\bar{s}^{(m)}_{k_{n}l_{n}}(t,u)]^{(b)} dt - E^{2}[T^{(b)}(u)].$$
(13)

Bezwarunkowe wartości średnie czasów przebywania systemu w poszczególnych stanach bezpieczeństwa określone są wzorami:

$$M(u) = M(u) - M(u+1), \ u = 1, 2, ..., z - 1,$$
$$\overline{M}(z) = M(z).$$
(14)

#### 5. ZASTOSOWANIA

Baza Paliw Nr 21 w Dębogórzu jest zakładem przeznaczonym do odbioru ze statków, magazynowania i wysyłki drogą kolejową lub transportem samochodowym produktów naftowych (mediów), takich jak benzyna, olej napędowy oraz olej opałowy. Zadania te wykonują trzy części A, B i C Bazy, połączone rurociągowymi systemami transportowymi. Bezpośredni rozładunek tankowców odbywa się na pirsie rozładunkowym znajdującym się na falochronie Portu Gdynia. Pirs jest połączony z częścią A Bazy Paliw poprzez

podsystem transportowy S1 dwóch nitek rurociągów. W części A Bazy Paliw znajduje się stacja podporowa wzmacniająca pompy tankowca i umożliwiająca dalszy transport produktu. Posiada ona agregaty pompowe służące do tłoczenia produktu podsystemem transportowym S2 do części B Bazy Paliw. Podsystem transportowy S<sub>2</sub> stanowia dwie nitki rurociągów. Część B Bazy Paliw jest częścią magazynową, połączoną podsystemem transportowym  $S_3$  z częścią C Bazy Paliw. Podsystem transportowy S<sub>3</sub> składa się z trzech nitek rurociągu. Część C Bazy Paliw przeznaczona jest do załadunku produktem cystern kolejowych oraz do ekspedycji pociągów do węzła kolejowego Gdynia Port i dalej w głąb kraju. Baza Paliw w Dębogórzu przeznaczona jest także do odbioru z wagonów kolejowych lub cystern samochodowych, magazynowania i załadunku na statki produktów naftowych, takich jak benzyna, olej napędowy lub opałowy. Schemat systemu przedstawiony jest na Rysunku 2.



PORT GDYNIA

Rys. 2. Schemat portowego systemu transportu paliwa

Biorąc pod uwagę opinie ekspertów w procesie eksploatacji Z(t),  $t \ge 0$ , rozpatrywanego systemu zostało wyróżnionych 5 stanów eksploatacyjnych.

- Stan eksploatacyjny 1 transport dwóch rodzajów medium z części B (zbiorniki) do części C przy użyciu dwóch z trzech nitek rurociągu w części  $S_{3,}$
- Stan eksploatacyjny 2 transport jednego rodzaju medium z części C, z wagonów kolejowych do części B przy użyciu jednej z trzech nitek rurociągu w części S<sub>3</sub>,
- Stan eksploatacyjny 3 transport jednego rodzaju medium z części B przez część A do pirsu przy użyciu jednej z dwóch nitek rurociągu w części  $S_2$  oraz jednej z dwóch nitek rurociągu w części  $S_1$ .
- Stan eksploatacyjny 4 transport dwóch rodzajów medium z Pirsu przez część A i część B do części C przy użyciu dwóch z dwóch nitek rurociągu w części  $S_1$  i dwóch z dwóch nitek rurociągu w części  $S_2$  oraz dwóch z trzech nitek rurociągu w części  $S_3$ ,
- Stan eksploatacyjny 5 transport jednego rodzaju medium z Pirsu przez część A i część B do części C przy użyciu jednej z dwóch nitek rurociągu w części S<sub>1</sub> i jednej z dwóch nitek

rurociągu w części  $S_2$  oraz jednej z trzech nitek rurociągu w części  $S_3$ .

Na podstawie danych uzyskanych od ekspertów oszacowane zostały prawdopodobieństwa przejść pomiędzy stanami eksploatacyjnymi systemu, dane w poniższej macierzy ([2]):

$$[p_{bl}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.11 & 0.89 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

natomiast wartości oczekiwane wynoszą odpowiednio:

$$\begin{split} M_1 &= E[\theta_1] = 1 \cdot 0.0046 = 0.0046, \\ M_2 &= E[\theta_2] = 1 \cdot 0.0064 = 0.0064, \\ M_3 &= E[\theta_3] = 0.11 \cdot 0.0023 + 0.89 \cdot 0.0027 = 0.00266, \\ M_4 &= E[\theta_4] = 0.5 \cdot 0.0009 + 0.5 \cdot 0.0009 = 0.0009, \\ M_5 &= E[\theta_5] = 1 \cdot 0.1644 = 0.1644. \end{split}$$

Z układu równań:

$$\begin{cases} [\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5] \\ = [\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5] \\ [\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5] \\ [\pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_5 = 1] \end{cases} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

otrzymujemy:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{1}{22}, \ \pi_2 &= \frac{9}{22}, \ \pi_3 &= \frac{9}{22}, \ \pi_4 &= \frac{2}{22}, \\ \pi_5 &= \frac{1}{22}. \end{aligned}$$

Wtedy, niezbędne w dalszych rozważaniach, graniczne wartości prawdopodobieństw chwilowych przebywania procesu Z(t) w poszczególnych stanach eksploatacyjnych wynoszą odpowiednio:

$$p_1 = 0.018, p_2 = 0.228, p_3 = 0.095,$$
  
 $p_4 = 0.007, p_5 = 0.652.$  (15)

Z uwagi na bezpieczeństwo eksploatacji, po przeprowadzeniu konsultacji z użytkownikami rurociągu, wyróżniamy trzy stany bezpieczeństwa ich elementów:

- stan 2 zapewniający pełne bezpieczeństwo eksploatacji rurociągu,
- stan 1 zapewniający mniejsze bezpieczeństwo eksploatacji rurociągu związane z zagrożeniem zanieczyszczeniem środowiska naturalnego,
- stan 0 powodujący niezdatność rurociągu.
- Portowy system transportu paliwa składa się trzech podsystemów  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ .
- Podsystem  $S_1$  składa się z  $k_n = 2$  nitek rurociągu, z których każda jest zbudowana z  $l_n = 178$ elementów. W każdej nitce rurociągu znajdują się: - 176 segmentów rur, których warunkowe funkcje bezpieczeństwa w podzbiorach stanów bezpieczeństwa odpowiednio wynoszą:

$$[s^{(1,1)}(t,1)]^{(b)} = \exp[-0.0062t],$$
  
$$[s^{(1,1)}(t,2)]^{(b)} = \exp[-0.0088t], \ b = 1,2,3,4,5.$$

- 2 zasuwy, których warunkowe funkcje bezpieczeństwa w podzbiorach stanów bezpieczeństwa odpowiednio wynoszą:

$$[s^{(1,2)}(t,1)]^{(b)} = \exp[-0.0166t],$$
$$[s^{(1,2)}(t,2)]^{(b)} = \exp[-0.0181t], b = 1,2,3,4,5.$$

Podsystem  $S_2$  składa się z  $k_n = 2$  nitek rurociągu, z których każda jest zbudowana z  $l_n = 719$ elementów. W każdej nitce rurociągu znajdują się: - 717 segmentów rur, których warunkowe funkcje bezpieczeństwa w podzbiorach stanów bezpieczeństwa odpowiednio wynoszą:

$$[s^{(1,1)}(t,1)]^{(b)} = \exp[-0.0062t],$$
  
$$[s^{(1,1)}(t,2)]^{(b)} = \exp[-0.0088t], \ b = 1,2,3,4,5,$$

- 2 zasuwy, których warunkowe funkcje bezpieczeństwa w podzbiorach stanów bezpieczeństwa odpowiednio wynoszą:

$$[s^{(1,2)}(t,1)]^{(b)} = \exp[-0.0166t],$$
$$[s^{(1,2)}(t,2)]^{(b)} = \exp[-0.0181t], \ b = 1,2,3,4,5.$$

Podsystem  $S_3$  składa się z 2 nitek rurociągu pierwszego typu oraz z jednej nitki rurociągu drugiego typu, z których każda jest zbudowana z  $l_n = 362$  elementów.

W każdej z dwóch nitek rurociągu pierwszego rodzaju znajdują się:

- 360 segmentów rur, których warunkowe funkcje bezpieczeństwa w podzbiorach stanów bezpieczeństwa odpowiednio wynoszą:

$$[s^{(2,1)}(t,1)]^{(b)} = \exp[-0.0059t],$$
  
$$[s^{(2,1)}(t,2)]^{(b)} = \exp[-0.0074t], b = 1,2,3,4,5,$$

- 2 zasuwy, których warunkowe funkcje bezpieczeństwa w podzbiorach stanów bezpieczeństwa odpowiednio wynoszą:

$$[s^{(2,2)}(t,1)]^{(b)} = \exp[-0.0166t],$$

$$[s^{(2,2)}(t,2)]^{(b)} = \exp[-0.0181t], b = 1,2,3,4,5.$$

W nitce rurociągu drugiego rodzaju znajduje się:

 - 360 segmentów rur, których warunkowe funkcje bezpieczeństwa w podzbiorach stanów bezpieczeństwa odpowiednio wynoszą:

$$[s^{(1,1)}(t,1)]^{(b)} = \exp[-0.0071t],$$
  
$$[s^{(1,1)}(t,2)]^{(b)} = \exp[-0.0079t], b = 1,2,3,4,5,$$

- 2 zasuwy, których warunkowe funkcje bezpieczeństwa w podzbiorach stanów bezpieczeństwa odpowiednio wynoszą:

$$[s^{(1,2)}(t,1)]^{(b)} = \exp[-0.0166t],$$
  
[s^{(1,2)}(t,2)]^{(b)} = exp[-0.0181t], b = 1,2,3,4,5.

<u>W stanie eksploatacyjnym 1</u>, system jest zbudowany z podsystemu  $S_3$ , który jest systemem szeregowo-progowym "2 z 3" zbudowanym z trzech niejednorodnych podsystemów szeregowych.



Rys. 3. Schemat struktury portowego systemu transportu paliwa w stanie eksploatacyjnym 1

Zatem funkcja bezpieczeństwa systemu określona jest wzorem:

$$\overline{s}^{(1)}(t,\cdot) = [\overline{s}^{(1)}(t,1), \ \overline{s}^{(1)}(t,2)], \ t \ge 0, \ \text{gdzie}$$

$$\overline{s}^{(1)}(t,1) = [s^{(2)}_{2/2}(t,1)]^{(1)}$$

$$= \exp[-4.3019t] + 2\exp[-4.7375t]$$
  
-2 exp[-6.8885t],  $t \ge 0$ , (16)

$$\overline{s}^{(1)}(t,2) = s_{3,362}^{(2)}(t,2)]^{(1)}$$
  
= exp[-5.3668t] + 2 exp[-5.5544t]  
-2 exp[-8.2378t], t ≥ 0, (17)

natomiast zgodnie z (10) lub (11) wartości średnie i odchylenia standardowe czasu przebywania systemu w podzbiorach stanów bezpieczeństwa wynoszą odpowiednio:

$$M_1(1) \cong 0.3643, \ M_1(2) \cong 0.3036,$$
 (18)

$$\sigma_1(1) \cong 0.263, \ \sigma_1(2) \cong 0.374.$$
 (19)

<u>W stanie eksploatacyjnym 2</u>, system składa się z podsystemu  $S_3$ , który jest niejednorodnym systemem szeregowo-równoległym składającym się z trzech nitek rurociągu.



Rys. 4. Schemat struktury portowego systemu transportu paliwa w stanie eksploatacyjnym 2

Zatem funkcja bezpieczeństwa systemu określona jest wzorem:

$$\bar{s}^{(2)}(t,\cdot) = [\bar{s}^{(2)}(t,1), \ \bar{s}^{(2)}(t,2)], \ t \ge 0, \text{ gdzie}$$

$$\overline{s}^{(2)}(t,1) = [s_{3,362}(t,1)]^{(2)}$$
  
= exp[-2.5865t] +2 exp[-2.15098t]  
-2 exp[-4.7375t] - exp[-4.30196t]  
+ exp[-6.88848t], t ≥ 0, (20)

$$\overline{s}^{(2)}(t,2) = [s_{3,362}(t,2)]^{(2)}$$
  
= exp[-2.8710t] +2 exp[-2.6834t]  
-2 exp[-5.5544t] - exp[-5.3668t]  
+ exp[-8.4378t], t \ge 0, (21)

natomiast zgodnie z (10) lub (11) wartości średnie i odchylenia standardowe czasu przebywania systemu w podzbiorach stanów bezpieczeństwa wynoszą odpowiednio:

$$M_2(1) \cong 0.8066, \ M_2(2) \cong 0.6657,$$
 (22)

$$\sigma_2(1) \cong 0.518, \ \sigma_2(2) \cong 0.429.$$
 (23)

<u>W stanie eksploatacyjnym 3</u>, system jest systemem szeregowym zbudowanym z dwóch niejednorodnych podsystemów szeregoworównoległych  $S_1$  i  $S_2$ , z których każdy zbudowany jest z dwóch nitek rurociągu.



Rys. 5. Schemat struktury portowego systemu transportu paliwa w stanie eksploatacyjnym 3

Zatem funkcja bezpieczeństwa całego systemu określona jest wzorem:

$$\overline{s}^{(3)}(t,\cdot) = [\overline{s}^{(3)}(t,1), \ \overline{s}^{(3)}(t,2)], \ t \ge 0, \ \text{gdzie}$$

$$\overline{s}^{(3)}(t,1) = [\overline{s}_{2,178}(t,1)]^{(3)} [\overline{s}_{2,719}(t,1)]^{(3)}$$
  
= 4 exp[-5.6132t] - 2 exp[-6.7397t]  
-2 exp[-10.0999t] + exp[-11.2264t], t > 0, (24)

$$\overline{s}^{(3)}(t,2) = [\overline{s}_{2,178}(t,2)]^{(3)} [\overline{s}_{2,719}(t,2)]^{(3)}$$
  
= 4 exp[-7.9060t] - 2 exp[-14.2318t]  
-2 exp[-9.4862t] + exp[-15.8120t], t \ge 0, (25)

natomiast zgodnie z (10) lub (11) wartości średnie i odchylenia standardowe czasu przebywania systemu w podzbiorach stanów bezpieczeństwa wynoszą odpowiednio:

$$M_3(1) \cong 0.3069, \ M_3(2) \cong 0.2178,$$
 (26)

$$\sigma_3(1) \cong 0.22, \ \sigma_3(2) \cong 0.157.$$
 (27)

<u>W stanie eksploatacyjnym 4</u>, system jest systemem szeregowym zbudowanym z dwóch niejednorodnych podsystemów szeregowych  $S_1$ i  $S_2$  oraz jednego podsystemu progowego "2 z 3"  $S_3$ .



Rys. 6. Schemat struktury portowego systemu transportu paliwa w stanie eksploatacyjnym 4

Zatem funkcja bezpieczeństwa całego systemu określona jest wzorem:

$$\overline{s}^{(4)}(t,\cdot) = [\overline{s}^{(4)}(t,1), \ \overline{s}^{(4)}(t,2)], \ t \ge 0, \ \text{gdzie}$$

$$\overline{s}^{(4)}(t,1) = [s_{356}(t,1)]^{(4)} [s_{1438}(t,1)]^{(4)} [\overline{s}_{3,362}^{(2)}(t,1)]^{(4)}$$

$$= \exp[-15.5284t] + 2 \exp[-15.964t]$$

$$-2 \exp[-18.115t], \ t \ge 0,$$
(28)

$$\overline{s}^{(4)}(t,2) = [s_{356}(t,2)]^{(4)} [s_{1438}(t,2)]^{(4)} [\overline{s}_{3,362}^{(2)}(t,2)]^{(4)}$$
  
= exp[-21.1789t] + 2 exp[-21.3665t]  
-2 exp[-24.04999t], t \ge 0, (29)

natomiast zgodnie z (10) lub (11) wartości średnie i odchylenia standardowe czasu przebywania systemu w podzbiorach stanów bezpieczeństwa wynoszą odpowiednio:

$$M_4(1) = 0.0793, M_4(2) = 0.0577,$$
 (30)

$$\sigma_4(1) = 0.0745, \ \sigma_4(2) = 0.0546.$$
 (31)

<u>W stanie eksploatacyjnym 5</u>, system jest systemem szeregowym zbudowanym z dwóch niejednorodnych podsystemów szeregoworównoległych  $S_1$  i  $S_2$  (złożonych z dwóch nitek rurociągu) oraz jednego podsystemu szeregoworównoległego  $S_3$  (złożonego z trzech nitek rurociągu).





Rys. 7. Schemat struktury portowego systemu transportu paliwa w stanie eksploatacyjnym 5

Zatem funkcja bezpieczeństwa całego systemu określona jest wzorem:

$$\bar{s}^{(5)}(t,\cdot) = [\bar{s}^{(5)}(t,1), \bar{s}^{(5)}(t,2)], t \ge 0, \text{ gdzie}$$

$$\bar{s}^{(5)}(t,1) =$$

 $[\overline{s}_{2,178}(t,1)]^{(5)} [\overline{s}_{2,719}(t,1)]^{(5)} [\overline{s}_{3,362}(t,1)]^{(5)}$ = 8 exp[-6.967t] +4 exp[-8.1997t] +4 exp[-10.6805t] +4 exp[-10.9083t] +4 exp[-14.0407t] +2 exp[-9.4483t]  $+2 \exp[-12.5807t] +2 \exp[-12.8085t]$  $+ \exp[-13.8129t] + \exp[-16.5215t]$  $-8 \exp[-9.5540t] -4 \exp[-8.0940t]$  $-4 \exp[-8.3218t] -4 \exp[-11.4542t]$  $-2 \exp[-9.3262t] -2 \exp[-12.0348t]$  $-2 \exp[-12.6864t] -2 \exp[-15.1672t]$  $-2 \exp[-15.3950t] - \exp[-13.9350t], t \ge 0, (32)$ 

$$\begin{split} \overline{s}^{(5)}(t,2) &= \\ [\overline{s}_{2,178}(t,2)]^{(5)} [\overline{s}_{2,719}(t,2)]^{(5)} [\overline{s}_{3,362}(t,2)]^{(5)} \\ &= 8 \exp[-10.5894t] + 4 \exp[-10.7770t] \\ &+ 4 \exp[-15.0400t] + 4 \exp[-16.3438t] \\ &+ 4 \exp[-19.7862t] + 2 \exp[-14.8530t] \\ &+ 2 \exp[-18.4954t] + 2 \exp[-19.5986t] \\ &+ \exp[-18.6830t] + \exp[-24.2498t] \\ &- 8 \exp[-13.4604t] - 4 \exp[-12.1696t] \\ &- 4 \exp[-13.2728t] - 4 \exp[-16.9152t] \\ &- 2 \exp[-12.3572t] - 2 \exp[-17.1028t] \\ &- 2 \exp[-17.9240t] - 2 \exp[-21.3664t] \\ &- 2 \exp[-22.6696t] - \exp[-21.1788t], t \ge 0, \end{split}$$

natomiast zgodnie z (10) lub (11) wartości średnie i odchylenia standardowe czasu przebywania systemu w podzbiorach stanów bezpieczeństwa wynoszą odpowiednio:

$$M_5(1) = 0.275, M_5(2) = 0.199$$
 (34)

$$\sigma_5(1) = 0.169, \ \sigma_5(2) = 0.135.$$
 (35)

Ostatecznie bezwarunkowa funkcja bezpieczeństwa portowego systemu transportu paliwa ma postać:

$$\overline{s}(t,\cdot) = [\overline{s}(t,1), \ \overline{s}(t,1)], \ t \ge 0, \tag{36}$$

gdzie

$$\overline{s}(t,1) \approx 0.018 \cdot \overline{s}^{(1)}(t,1) + 0.228 \cdot \overline{s}^{(2)}(t,1) + 0.095 \cdot \overline{s}^{(3)}(t,1) + 0.007 \cdot \overline{s}^{(4)}(t,1) + 0.652 \cdot \overline{s}^{(5)}(t,1) \quad t \ge 0$$
(37)

$$\overline{s}(t,2) \approx 0.018 \cdot \overline{s}^{(1)}(t,2) + 0.228 \cdot \overline{s}^{(2)}(t,2) + 0.095 \cdot \overline{s}^{(3)}(t,2) + 0.007 \cdot \overline{s}^{(4)}(t,2) + 0.652 \cdot \overline{s}^{(5)}(t,2), \quad t \ge 0,$$
(38)

oraz  $\bar{s}^{(1)}(t,1)$ ,  $\bar{s}^{(2)}(t,1)$ ,  $\bar{s}^{(3)}(t,1)$ ,  $\bar{s}^{(4)}(t,1)$ ,  $\bar{s}^{(5)}(t,1)$ , i  $\bar{s}^{(1)}(t,2)$ ,  $\bar{s}^{(2)}(t,2)$ ,  $\bar{s}^{(3)}(t,2)$ ,  $\bar{s}^{(4)}(t,2)$ ,  $\bar{s}^{(5)}(t,2)$ , są odpowiednio określone przez (16), (20), (24), (28), (32) i przez (17), (21), (25), (29), (33). Następnie, uwzględniając (18), (22), (26), (30), (34), otrzymujemy bezwarunkowe wartości średnie i odchylenia standardowe czasów przebywania systemu w podzbiorach stanów bezpieczeństwa:

$$M(1) \cong 0.018 \cdot 0.3643 + 0.228 \cdot 0.8066 + 0.095 \cdot 0.3069 + 0.007 \cdot 0.0793 + 0.652 \cdot 0.275 \cong 0.399,$$
(39)

$$\delta(1) = 0.367 , \qquad (40)$$

$$M(2) \cong 0.018 \cdot 0.3036 + 0.228 \cdot 0.6657 + 0.095 \cdot 0.2178 + 0.007 \cdot 0.0577 + 0.652 \cdot 0.199 \cong 0.308,$$
(41)

$$\delta(2) = 0.308$$
, (42)

a następnie bezwarunkowe wartości średnie czasów przebywania systemu w poszczególnych stanach bezpieczeństwa zgodnie z (14) wynoszą:

$$\overline{M}(1) \cong M(1) - M(2) = 0.091,$$
  
 $\overline{M}(2) \cong M(2) \cong 0.308.$  (43)

Jeśli krytycznym stanem bezpieczeństwa jest r = 1, to jego funkcja ryzyka przyjmuje postać:

$$\mathbf{r}(t) \cong 1 - \overline{\mathbf{s}}(t,1) \; ,$$

gdzie  $\bar{s}(t,1)$  określona jest wzorem (37).

Stąd, chwila kiedy ryzyko przekroczy poziom krytyczny  $\delta = 0.05$  jest:

$$\tau = \mathbf{r}^{-1}(\delta) \cong 0.04 \text{ lat.}$$

#### 6. PODSUMOWANIE

W artykule zaproponowano rozwiązanie praktycznego problemu, jakim jest powiązanie bezpieczeństwa systemu Ζ jego procesem eksploatacji. Zmienne warunki eksploatacyjne systemów implikuja zmienność struktur bezpieczeństwa tych systemów, oraz zmienność charakterystyk bezpieczeństwa ich elementów w czasie eksploatacji. Aby połączyć zależność pomiędzy procesem eksploatacji systemu a zmienną w czasie strukturą bezpieczeństwa systemu zastosowano semi-markowski model procesu eksploatacji tego systemu. Uzyskane wyniki zastosowano w zagadnieniach transportowych do oceny bezpieczeństwa portowego systemu transportu paliwa. W oparciu o przybliżone dane empiryczne uzyskane od użytkowników tego systemu zostały zidentyfikowane parametry jego procesu eksploatacji oraz przy założeniu, że system jest systemem trójstanowym oszacowane zostały

parametry bezpieczeństwa elementów. jego Pozwoliło to w oparciu o zaproponowane w artykule modele oszacować funkcje bezpieczeństwa tego poszczególnych systemu W stanach eksploatacyjnych, oraz wyznaczyć wartości średnie i odchylenia standardowe czasów przebywania systemu w podzbiorach stanów bezpieczeństwa i w poszczególnych stanach. Następnie wyznaczone zostały bezwarunkowe funkcje bezpieczeństwa i jego bezwarunkowe wartości średnie czasów podzbiorach przebywania stanów w i w poszczególnych stanach bezpieczeństwa. Oszacowana została również funkcje ryzyka tego systemu.

Przedstawione podejście jest nowatorskim aspektem pracy i posiada istotny walor praktyczny, gdyż pozwala na dokładniejszą ocenę bezpieczeństwa realnych złożonych systemów wielostanowych o zmiennej w czasie strukturze bezpieczeństwa oraz o zmiennych parametrach bezpieczeństwa ich elementów, wynikających ze zmiennych warunków eksploatacyjnych.

# LITERATURA

- [1] Grabski, F.: Semi-markowskie modele niezawodności i eksploatacji. Polska Akademia Nauk, Warszawa, 2002.
- [2] Kołowrocki, K.: Reliability of Large Systems. Elsevier: Amsterdam - Boston - Heidelberg -London - New York - Oxford - Paris - San Diego - San Francisco - Singapore - Sydney -Tokyo, 2004.
- [3] Soszyńska, J.: Reliability evaluation of a port oil transportation system in variable operation conditions. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 83, Issue 4, 2006, 304-310.
- [4] Xue J., Yang K.: Dynamic reliability analysis of coherent multi-state systems. IEEE Transactions on Reliability 4, 44, 1995, 683–688.



Joanna SOSZYŃSKA ukończyła Wydział Fizyki i Matematyki Uniwersytetu Gdańskiego W 1999 roku. Obecnie jest zatrudniona w Katedrze Matematyki na Wydziale Nawigacyjnym Akademii Morskiej w Gdyni jako asystent. Jej obszarem zainteresowań jest modelowanie bezpiecze-

ństwa i niezawodności złożonych systemów uwzględniając ich zmienne warunki eksploatacji. W tym zakresie opublikowała kilkanaście prac naukowych.

# PROCEDURY BADANIA STANU MASZYN W PRZESZŁOŚCI

Henryk TYLICKI

Katedra Maszyn Roboczych i Pojazdów, Wydział Mechaniczny, Akademia Techniczno – Rolnicza ul. S. Kaliskiego 7, 85-763 Bydgoszcz, tylicki@atr.bydgoszcz.pl

Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono problematykę wyznaczania procedur badania stanu maszyn w przeszłości oraz algorytm wyznaczania tych procedur.

Słowa kluczowe: ocena stanu technicznego maszyn, genezowanie stanu maszyn, algorytmy procedur genezowania.

#### THE PROCEDURES OF CONDITION MACHINES INVESTIGATION IN PAST

Summary

The problems of marking in past as well as algorithm the procedures of condition machine investigation of marking these procedures in study was introduced.

Keywords: the opinion of machine technical condition, the genesis of machines technical condition, algorithms of genesis procedures.

#### WPROWADZENIE

Problemy występujące w procesie badania stanu maszyny sprowadzają się do:

- 1. Analizy procesu pogarszania się stanu technicznego maszyny, określenie tendencji i dynamiki zmian wartości jej parametrów stanu, wybór stanów w których mogła znajdować się maszyna, dekompozycja maszyny na układy i zespoły, kryteria wyboru stanów prawdopodobieństwo i ich występowania oraz wybór "najlepszych" parametrów diagnostycznych opisujących zmianę stanu maszyny.
- Wyboru "najlepszej" metody wyznaczania wartości parametrów diagnostycznych w przeszłości przy założeniu o niepewnej i niepełnej historii ich wartości.
- Wykorzystanie informacji o genezowanej wartości parametru diagnostycznego do analizy przyczyny zaistnienia stanu maszyny.

Na podstawie analizy opracowań dotyczących rozwiązywania problemów zbliżonych do prezentowanych w pracy [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9] stwierdza się, że:

 W celu poprawnego funkcjonowania nowoczesnych systemów obsługiwania maszyn (wykorzystujących informację o stanie maszyny w chwili badania, w czasie przyszłym i w czasie przeszłym) istnieje potrzeba opracowania metodyki, która w przypadku niepełnej lub niepewnej historii wartości parametrów diagnostycznych maszyny umożliwi szacowanie stanu maszyny w czasie przeszłym eksploatacji (prognoza wsteczna, genezowanie stanu maszyny).

- Metody genezowania nie znalazły dotychczas zastosowania w postaci algorytmów obliczeniowych do szacowania stanu maszyny w czasie przeszłym jej eksploatacji;
- 4. Projektowane i wprowadzane obecnie w krajach Unii Europejskiej przepisy ISO dotyczące wymagań, jakie mają spełniać maszyny, np. dla pojazdów, obok ograniczeń zwiazanych z toksycznością spalin i zużyciem paliwa, narzucają również wymagania dotyczące diagnostyki poszczególnych układów pojazdu, w tym szczególnie układów silnika i układów bezpieczeństwa jazdy. Przewiduje się tu pokładowe systemy diagnostyczne, które rozpoznaja, zapamiętują, sygnalizują, prognozują i genezują stany zespołów i układów pojazdu (np. w pokładowym systemie diagnostycznym EOBD - opcja "zamrożonej ramki").
- 5. Stwierdza się, że proste algorytmy prognostyczne zaczynają stanowić element standardowego oprogramowania przyrządów diagnostycznych zaś proste procedury wyznaczania genezy stanu stanowią podstawę oprogramowania systemów doradczych, np. przy analizie wypadków drogowych (pakiet CRASCH i inne).

Reasumując stwierdza się, że istnieje potrzeba i możliwości (istniejące metody szacowania wartości parametrów diagnostycznych opisujących zmianę stanu maszyny w czasie eksploatacji) opracowania metodyki szacowania stanu technicznego w czasie przeszłym eksploatacji maszyny, możliwej do wykorzystania w systemie obsługiwania maszyn.

#### 1. GENEZOWANIE WARTOŚCI PARAMETRÓW DIAGNOSTYCZNYCH

Genezowanie stanu technicznego maszyny powinno polegać na określeniu (przy niepełnych lub niepewnych danych wartości parametrów diagnostycznych) trendu zmian wartości parametrów diagnostycznych, charakteryzującego pogarszania stanu proces sie maszyny w przeszłości, przyrównaniu chwilowych wartości parametrów diagnostycznych do wartości granicznych i na tej podstawie szacowanie zapasu przebiegu niezawodnej pracy zespołów i układów maszyny w interesującym użytkownika czasie przeszłym eksploatacji maszyny lub analiza przyczyny zlokalizowanego w chwili badania uszkodzenia maszyny.

Rozwiązanie przedstawionego postulatu można przedstawić w postaci następującego schematu:

- 1. Niech zjawisko pogarszania się stanu technicznego zespołów maszyny będzie reprezentowane szeregiem czasowym  $y_t = \langle y_1, y_2, ..., y_b \rangle$ , tj. zbiorem dyskretnych obserwacji  $\{y_t = \zeta(t); t = t_1, t_2,..., t_b\}$  pewnego niestacjonarnego procesu stochastycznego  $\zeta(t)$ .
- 2. Przy założeniu, że mechanizm zmian wartości procesu stochastycznego w czasie  $t \in (t_1, t_b)$ kształtuje trend  $\mu(t)$  zakłócony różnymi oddziaływaniami losowymi  $\eta(t)$ :

$$y_t = \mu(t) + \eta(t) \tag{1}$$

- gdzie: μ(t) składnik zdeterminowany szeregu czasowego y<sub>t</sub>, opisuje on tendencję rozwojową obserwowanego parametru diagnostycznego y(t),
  - η(t) charakteryzuje odchylenia od trendu diagnostycznego wyraża działanie czynników przypadkowych (warunki terenowe, warunki klimatyczne, jakość obsług),

konstruuje się takie oszacowanie { $\mu_p$  (t); t=1,...,b} dla nieznanej postaci trendu  $\mu$ (t), które zapewniałoby odpowiednią dokładność genezy y<sub>G</sub>(t), przy ekstrapolacji  $\mu_p$ (t) na odcinek czasu pracy maszyny (t<sub>b</sub>, t<sub>G</sub>), t<sub>p</sub>= t<sub>b</sub>- $\tau_2$ .

3. Oszacowanie  $\mu_G(t)$  wyznacza wówczas wartości obserwowanych parametrów diagnostycznych w genezowanej chwili  $t_G$ , a tym samym genezę stanu technicznego układów lub zespołów maszyny  $W(t_G)$ .  Jako dopuszczalny stan eksploatacji zespołów i układów maszyny W<sub>dop</sub> w przedziale czasu (t<sub>b</sub>, t<sub>G</sub>) przyjmuje się wartość czasu, dla którego granice przedziału błędu dla poszczególnych genez:

$$\sigma(\mathbf{y}_t, \mathbf{y}_G, \mathbf{G}(\mathbf{y}_t, \tau)) \tag{2}$$

określone na podzbiorze  $\Omega^{y} \in \Omega$  dostępnych realizacji obserwowanych parametrów {y<sub>j</sub>(t)} oraz ich genez {y<sub>jG</sub>} według przyjętej metody genezowania wartości parametru diagnostycznego G(y<sub>t</sub>,  $\tau$ ) nie przekraczają wartości granicznych {y<sub>ig</sub>}.

5. Dopuszczalny stan techniczny  $W_{dop}$  maszyny wyznacza horyzont genezy  $\tau_j^{o}$ , dla którego nie występuje przekroczenie wartości granicznej parametru diagnostycznego {y<sub>jg</sub>} przez granicę przedziału błędu genezy wyznaczoną przez promień granicy przedziału błędu r<sub>oG</sub>.

$$r_{\sigma G} = q \sigma_G \tag{3}$$

- gdzie: q<sub>γ,K</sub> parametr stały wyznaczany z tablicy rozkładu Studenta do wymaganego poziomu ufności γ i K-2 liczby stopni swobody,
  - $\sigma_G \ \ \text{- odchylenie standardowe składnika} \\ losowego błędu genezy <math display="inline">e_G.$
- 6. W przypadku systemu obsługiwania wymaganą postacią genezy stanu układów lub zespołów maszyny jest informacja, czy w czasie  $(y_1, y_b)$ stan techniczny był stanem zdatności W<sup>o</sup> (można ja przedstawić jako wartość dopuszczalnego czasu eksploatacji  $t_{G1}$ ). Proponuje się także, aby wielkościami dodatkowymi GST były wartość oczekiwana błędu genezy e<sub>G</sub>.

$$GST = \langle W_{dop}, e_G \rangle$$
 (4)

7. Jako wartość t<sub>G1</sub> proponuje się przyjąć wartość dopuszczalnego czasu eksploatacji maszyny określony wartością horyzontu  $\{\tau^{\circ}\}.$ wyznaczoną jako punkt przecięcia się linii wartości granicznej parametru diagnostycznego  $y_{ig}$  z dolną (przy założeniu, że  $y(t_b) > y_{ig}$ ) lub górną (przy założeniu, że  $y(t_b) < y_{ig}$ ) granicą przedziału błędu genezy wyznaczoną przez promień granicy przedziału błędu r<sub>G</sub> dla współczynnika ufności  $r_{G}^{0.05}$  dla poziomu ufności 1 -  $\gamma = 0.95$ , co odpowiada prawdopodobieństwu o wartości p=0.05, że w przedziale wyznaczonym przez horyzont  $\tau_i^*$ parametr diagnostyczny y<sub>i</sub> osiągnie wartość graniczną y<sub>ig</sub>.
Możliwe są wówczas dwie opcje:

- a) nie przekroczenie przez kontrolowany parametr diagnostyczny granicy wyznaczonej przez promień r<sub>G</sub><sup>0.05</sup> interpretuje się wówczas jako brak sygnału alarmu do wnikliwej i bardziej dokładnej obserwacji diagnostycznej zespołu lub układu maszyny;
- b) czas przekroczenia przez kontrolowany parametr diagnostyczny granicy wyznaczonej przez promień  $r_G^{0.05}$  interpretuje się jako czas  $t_{G1}$  termin przejścia układu lub zespołu maszyny w stan niezdatności.



Rys. 1. Schemat wyznaczania genezy wartości parametru diagnostycznego y<sub>j</sub>

Przedział czasu ( $t_1$ ,  $t_b$ ) jest wówczas okresem estymacji wartości oczekiwanej błędu genezy  $e_G$ i promienia granicy błędu genezy  $r_G$ , zaś okres czasu  $t_b$  -  $\tau_2$  będzie okresem aktywnej genezy, tzn. wyznaczenia (rys.1):

- a) wartości genezowanej parametru diagnostycznego po czasie horyzontu genezy  $\tau_2$ ,  $y_{jG}(t_b-\tau_2)$ ,
- b) określenie wartości promienia granicy przedziału błędu genezy  $r_G(t_b \tau_2)$ ,
- c) wyznaczenie ewentualnych czasów {t<sub>Gli</sub>} przejścia zespołu lub układu maszyny w stan niezdatności.

Oszacowanie stanu maszyny lub wartości wykonanej przez nią w przeszłości pracy wyznaczają wyniki genez wartości parametrów diagnostycznych  $\{y_j(t_{b-\tau 2})\}$ , co pozwala na sformułowanie, przedstawionego poniżej, algorytmu genezowania stanu maszyny:

Zakładając możliwość rejestracji wartości parametrów diagnostycznych oraz stanów maszyny w czasie jej eksploatacji (np. w trakcie eksperymentu bierno – czynnego) uzyskuje się bazę informacji w postaci macierzy informacji: wartości parametrów diagnostycznych – stany maszyny – czas eksploatacji. W chwili utraty przez maszynę stanu zdatności będzie prawdopodobnie możliwość, na podstawie zebranych danych jak i oględzin maszyny, stwierdzić, jaka mogła być przyczyna powstania stanu niezdatności maszyny (rys. 2).



Rys. 2. Schemat określenia informacji o przyczynie uszkodzenia maszyny

Reasumując przedstawione powyżej problemy występujące w procesie genezowania stanu technicznego maszyny można stwierdzić, że w celu ich rozwiązania należy dokonać:

- 1. Analizy procesu pogarszania się stanu technicznego maszyny, określenie tendencji i dynamiki zmian wartości jej parametrów stanu i parametrów diagnostycznych, oraz wybór "najlepszych" parametrów diagnostycznych opisujących zmianę stanu maszyny.
- Wyboru "najlepszej" metody wyznaczania genezy stanu poprzez:
  - a) wyznaczenie wartości genezowanej parametru diagnostycznego,
  - b) określenie wartości błędu genezy,
  - c) określenie relacji pomiędzy zmianami wartości genezowanej parametru diagnostycznego z błędem genezy i wartością graniczną parametru diagnostycznego;
- 3. Wykorzystanie genezy stanu technicznego do analizy przyczyny zaistnienia stanu maszyny w chwili badania maszyny.

Analiza metodyki wyznaczania wartości genezowanej parametrów diagnostycznych oraz odpowiednich dla różnych metod błędów genezy pozwala na sformułowanie następujących wniosków [8]:

W celu wyznaczenia wartości genezowanej parametrów diagnostycznych na podstawie niepewnych i niepełnych ich wartości (przedział czasu  $t_1$ ,  $t_b$ ) należy wykorzystać:

1. W zakresie metod aproksymacyjnych:

a) aproksymację średniokwadratową punktową wielomianową z błędem genezy:

$$e_{G} = \min_{a_{0}, a_{1}, \dots, a_{m}} S = \sum_{i=0}^{n} (f_{i} - \sum_{j=0}^{m} a_{j} x_{i}^{j})^{2} \quad (5)$$

b) aproksymację trygonometryczną z błędem genezy:

$$e_{\rm G} = S = \sum_{i=0}^{n} (y - y_i)^2$$
 (6)

2. W zakresie metod interpolacyjnych:

 a) interpolację za pomocą funkcji sklejanych dla różnych stopni np.: 1, 2 i 3 z błędem genezy:

$$\mathbf{e}_{\mathrm{G}} = \left| f(\mathbf{x})_{k} - F(\mathbf{x}) \right| \tag{7}$$

gdzie:  $k = \frac{n}{2}$  - ilość punktów do porównania

wartości funkcji sklejanych z wartością rzeczywistą parametru diagnostycznego.

#### 2. ALGORYTM BADANIA STANU MASZYNY W PRZESZŁOŚCI

Algorytm rozwiązania problemu genezowania stanu maszyny można realizację określonych etapów badawczych [8]:

- 1. Określenie stanu technicznego maszyny w chwili badania.
- 2. Określenie zbioru parametrów diagnostycznych opisujących ten stan.
- 3. Genezowanie wartości parametrów diagnostycznych w czasie przeszłym (przy założeniu niepełnej lub niepewnej ich historii).
- 4. Geneza stanu technicznego maszyny (określenie przyczyny stanu w chwili badania).
- 5. Wykorzystanie genezy stanu technicznego w eksploatacji maszyny (rys. 3).



Rys. 3. Schemat realizacji rozpoznawania stanu maszyn

Poniżej rozpatrzono najbardziej istotne, ze względu na konieczność implementacji, dwa elementy algorytmu:

- Genezowanie wartości zbioru parametrów diagnostycznych {y<sub>j</sub><sup>\*</sup>}:
  - a) za pomocą metody aproksymacji wartości parametru diagnostycznego  $y_j^*$  w przedziale czasu ( $t_1$ ,  $t_b$ ) wraz z promieniem błędu

aproksymacji "kanału błędowego" r<sub>a</sub> metodami (metoda średniokwadratowa, metoda trygonemetryczna),

- b) za pomocą interpolacji wartości parametru diagnostycznego y<sub>j</sub><sup>\*</sup> w przedziale czasu (t<sub>1</sub>, t<sub>b</sub>) wraz z promieniem błędu interpolacji "kanału błędowego" r<sub>i</sub> metodami (metoda funkcji sklejanych różnych stopni),
- c) wybór metody według minimalnej lub maksymalnej wartości promienia błędu aproksymacji lub interpolacji (błąd dopasowania).
- 2. Analiza przyczyny wystąpienia stanu  $s_i(T_{LU})$ :
  - a) prezentacja zbioru { $s_i$  ( $t_k$ ), i=1,..., 1; k=1,..., K}.
  - b) określenie punktu wspólnego "kanału błędowego" wyznaczonego przez promień błędu r<sup>\*</sup>= max (r<sub>a</sub>, r<sub>i</sub>) i wartość graniczną parametru diagnostycznego y<sub>j</sub> w chwili  $\Theta_{S} \in (\Theta_{1}, \Theta_{b})$ , co oznacza że przyczyną wystąpienia zlokalizowanego stanu s<sub>i</sub> było "chwilowe pojawienie" się tego stanu w czasie (t<sub>1</sub>, t<sub>b</sub>);
  - c) określenie większej liczby punktów wspólnych "kanału błędowego" wyznaczonego przez promień błędu r =max (r<sub>a</sub>, r<sub>i</sub>) i wartości granicznej parametru diagnostycznego y<sub>j</sub><sup>\*</sup> w chwilach t<sub>s</sub>  $\in$  (t<sub>1</sub>, t<sub>b</sub>) oznacza, że przyczyną wystąpienia zlokalizowanego stanu s<sub>i</sub> był "narastający rozwój" stanu s<sub>i</sub> w czasie (t<sub>1</sub>, t<sub>b</sub>);
  - d) w przypadku braku punktów wspólnych określenie minimalnej odległości "kanału błędowego" od wartości granicznej w chwili t<sub>s</sub>∈(t<sub>1</sub>, t<sub>b</sub>), co oznacza że prawdopodobną przyczyną wystąpienia zlokalizowanego stanu s<sub>i</sub> było "chwilowe niepełne pojawienie się" się tego stanu w czasie (t<sub>1</sub>, t<sub>b</sub>);
  - e) analiza tożsamości zbioru stanów {s<sub>i</sub> (t<sub>k</sub>), k=1, ..., K}i zlokalizowanego przez T<sub>LU</sub> stanu s<sub>i</sub> w celu określenia przyczyny jego wystąpienia w kontekście otrzymanych ewentualnych "punktów wspólnych" lub minimalnej odległości "zbliżeń".

Poniżej podano działanie programu komputerowego wspomagającego proces badania stanu maszyny w przeszłości:

1. Wybrać opcję "GENEZA STANU"

2. Wybrać nazwę "Grupy": np. Samochody STAR MAN 11422.

3. Wybrać "Opcję kumulacji obiektów grupy": "Dla obiektów grupy" lub "Dla grupy".

W celu zwiększenia wiarygodności uzyskiwanych wyników badania procedury genezowania należy wybrać wariant "Dla grupy", poddawane są wówczas analizie wszystkie obiekty w grupie maszyn po uprzedniej kumulacji zbioru wartości parametrów diagnostycznych {y<sup>\*</sup>} (wartość średnia) i zbioru stanów { $s_i$  ( $\Theta_k$ ), i=1, ..., I; k=1, ..., K}.

- A. W wariancie "Dla grupy":
- Wybrać "Metody genezowania", pojawia się w oknie interaktywnym zbiór metod: metody aproksymacyjne: średniokwadratowa i trygonometryczna, metody interpolacyjne: funkcji sklejanych, liniowa według układu:
  - a) "Kod" np.  $g_1, ..., g_j, ..., g_m$ ;
  - b) "Nazwa metody";
  - c) "Błąd dopasowania."
- z oknami interaktywnymi do wprowadzenia:
  - a) Parametr 1;
  - b) Parametr 2
- Wybrać "Metodę genezowania" w oknie informacyjnym "Interpretacja" pojawiają się ilości zbliżeń "kanału błędowego" do wartości granicznej parametru według układu:
  - a) "Kod";
  - b) "Nazwa parametru";
  - c) "Opis zbliżeń" ilość, termin, odległość od wartości granicznej;
- Wybrać "Wykres" pojawia się okno z wykresem interpretacji genezowania stanu.
- 4. Wybrać "Genezowane stany" pojawia się ono okno informacyjne z interpretacją umożliwiającą wyjaśnienie przyczyny, zlokalizowanego podczas oceny stanu, stanu  $s_i(T_{LU})$  według układu:
- a. "Czas pracy (przebieg)";
- b. "Stan maszyny";
- c. "Opis zbliżeń" odległość od wartości granicznej;
- d. "Współczynnik korelacji":  $r_i = r(W, y_i)$ ;
- e. "Wskaźnik ilości informacji": h<sub>i</sub>;
- f. "Waga wprowadzona": w<sub>2i</sub>
- B. W wariancie "Dla obiektów grupy":

1. Wybrać "Metody genezowania", pojawia się w oknie informacyjnym zbiór metod: metody aproksymacyjne: wielomianowe, średniokwadratowa i trygonometryczna, metody interpolacyjne: funkcji sklejanych z różnymi stopniami interpolacji – liniowa (1 rzędu), kwadratowa (2 rzędu), potęgowa trzeciego stopnia według układu:

- a) "Kod" np.  $g_1, ..., g_j, ..., g_m$ ;
- b) "Nazwa metody";
- c) "Błąd dopasowania."

z oknami interaktywnymi do wprowadzenia:

- a) Parametr 1;
- b) Parametr 2

C. W wariancie "Interpretacja":

1. Wybrać "Metodę genezowania" – w oknie informacyjnym "Interpretacja" pojawiają się ilości zbliżeń "kanału błędowego" do wartości granicznej parametru według układu:

- a) "Kod";
- b) "Nazwa parametru";
- c) "Opis zbliżeń" ilość, termin,
- d) Odległość od wartości granicznej;

2. Wybrać "Wykres" – pojawia się okno z wykresem interpretacji genezowania stanu.

3. Wybrać "Genezowane stany" – pojawia się ono okno informacyjne z interpretacją umożliwiającą wyjaśnienie przyczyny, zlokalizowanego podczas oceny stanu, stanu  $s_i(T_{LU})$  według układu:

- a) "Czas pracy";
- b) "Stan maszyny";
- c) "Opis zbliżeń" odległość od wartości granicznej;
- d) "Współczynnik korelacji":  $r_j = r(W, y_j);$
- e) "Wskaźnik ilości informacji": h<sub>j</sub>;
- f) "Waga wprowadzona":  $w_j$

### PODSUMOWANIE

Przedstawione powyżej rozważania, sformułowane w postaci algorytmów genezowania wartości parametrów diagnostycznych i analizy przyczyny wystąpienia stanu niezdatności maszyn odnoszą się do przedstawionego w opracowaniu schematu badania stanu maszyny w przeszłości.

Ze względu na zaproponowany niezbyt liczny zbiór rozwiązań dopuszczalnych (zbiór metod genezowania wartości parametrów diagnostycznych) nie można sformułować konkluzji, że opracowana metodyka ma charakter ostateczny. Jednak możliwość jej stosowania w przypadku szacowania przyczyny stanu maszyny może stanowić podstawę do dalszych prac w obszarze softwaru i hardwaru pokładowego systemu diagnostycznego maszyny.

# LITERATURA

- [1] Batko W.: *Metody syntezy diagnoz predykcyjnych w diagnostyce technicznej*, AGH, Kraków 1984.
- [2] Będkowski L.: *Elementy diagnostyki technicznej*, WAT, Warszawa 1991.
- [3] Box G., Jenkins G.: *Time series analysis, forecasting and control*, London 1970.
- [4] Cempel C.: Ewolucyjne modele symptomowe w diagnostyce maszyn, Materiały I Kongresu Diagnostyki Technicznej, Gdańsk 1996.
- [5] Prażewska M. J: Ocena nieuszkadzalności ESŁ na podstawie niepewnych danych. Przegląd Telekomunikacyjny nr 4/2002. Warszawa 2002.
- [6] Tylicki H.: Conception of the optimization of devices technical condition forecasting process. Machine Dynamics Problems, 9 (1994), Warszawa 1995.
- [7] Tylicki H.: Optymalizacja procesu prognozowania stanu technicznego pojazdów mechanicznych. Wydawnictwa Uczelniane ATR. Bydgoszcz 1998.
- [8] Tylicki H., Wilczarska J.: Genezowanie stanu maszyn. Diagnostyka 1(37)/2006.
- [9] Żółtowski B.: Podstawy diagnostyki maszyn. Wydawnictwa Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1997.

Pracę zrealizowano w ramach projektu badawczego KBN nr 4 T07B 033 26



hab. Dr inż. Henryk TYLICKI, prof. nadzw. ATR działalności naukowej W się problemami zajmuje diagnostyki technicznej, maszyn eksploatacji i optymalizacją systemów transportowych. Ma w swoim dorobku ponad 150 publikacji,

w tym 8 pozycji książkowych (własne i współautorskie), 80 publikacji naukowych, 112 publikacji naukowo-technicznych i konferencyjnych. Wypromował kilkudziesięciu absolwentów studiów magisterskich i inżynierskich oraz recenzuje prace naukowo-badawcze, promocyjne, a także dorobek naukowy.

# WYKRYWANIE RÓŻNYCH USZKODZEŃ KÓŁ PRZEKŁADNI ZĘBATYCH

#### Grzegorz WOJNAR, Bogusław ŁAZARZ

#### Politechnika Śląska Wydział Transportu ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice tel: (032) 603 41 93, e-mail: Grzegorz.Wojnar@polsl.pl

#### Streszczenie

Zakres pracy obejmuje badania doświadczalne i symulacyjne prowadzone w przypadku przekładni o różnych parametrach geometrycznych i odchyłkach wykonania kół zębatych, pracujących z różnymi prędkościami obrotowymi i przy różnych obciążeniach. Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz można stwierdzić, że zaawansowane metody przetwarzania sygnału prędkości drgań poprzecznych wałów, zmierzonego w kierunku działania siły międzyzębnej oraz wykorzystanie analiz jednocześnie w dziedzinach czasu i częstotliwości lub czasu i skali (CWT) umożliwiło efektywne wykrywanie różnych uszkodzeń kół zębatych takich jak: wykruszenie wierzchołka zęba zębnika lub koła, pęknięcie zęba zębnika lub koła u podstawy, częściowe wyłamanie zęba oraz zmęczeniowe wykruszenie warstwy wierzchniej współpracujących powierzchni roboczych zębów (pitting).

Słowa kluczowe: przekładnie zębate, uszkodzenie zęba, zmienna prędkość obrotowa, zmienne obciążenie, sygnał resztkowy, sygnał różnicowy.

# THE METHOD LOGGING OF RESIDUAL AND DIFFERENTIAL SIGNALS FOR GEAR WORKING WITH VARIABLES THE ROTATIONAL SPEEDS AND LOADS

#### Summary

This paper presents results of laboratory tests that, were aimed at detecting early stages of various faults in toothed wheels by measurement and analysis of transverse vibration speed of the transmission gear shafts. In experimental investigation, cracking of the root tooth, chipping of the tooth, and partial breakage or pitting of the tooth active surface were detected.

The laser vibrometer Ometron VH300+ was used for non-contact measurement of shaft transversal vibration speed. In the case of measuring gear shaft vibration velocity, the way of the signal generated by the defect of a gear wheel (or bearing) is shortened as well as the influence of composed transmittance of the bearing-gear housing system is eliminated.

WV time-frequency analysis and complex continuous wavelet transformations were used for detection. The authors introduced a measure of local tooth damage, which was proportional to the size of damage. An addition new index was created to measure pitting of the tooth surface.

The utility of the measure for detecting damage toothed wheel, which operates with different rotational, different loads, and different performance deviation, was investigated. The results of research presented in this paper confirmed that the defect's measure is very sensitive to the development of teeth faults.

Keywords: Diagnostics, Gear Faults, Wavelet Transform, Time-Frequency Analysis.

#### 1. WPROWADZENIE

Według danych zawartych w [10] około 60% awarii przekładni zębatych powodują uszkodzenia kół zębatych. W literaturze [5, 26, 30] wyróżnia się następujące ich rodzaje: wykruszenie wierzchołka zęba, pęknięcie zęba u podstawy, a w konsekwencji jego częściowe lub całkowite wyłamanie, pęknięcie zębatego, zmęczeniowe wykruszenia wieńca warstwy wierzchniej współpracujących powierzchni (pitting), roboczych zębów zatarcie współpracujących powierzchni i inne. Nowoczesne środki smarne dzieki zastosowaniu odpowiednich dodatków skutecznie zapobiegają zjawisku zatarcia, a koła zębate z oddzielnym wieńcem zębatym są rzadko stosowane w przekładniach przemysłowych. Dlatego przyjęto, iż celem jest opracowanie metod przydatnych do wykrywania uszkodzeń kół zębatych takich jak: wykruszenie wierzchołka zęba zębnika lub koła, pęknięcie u podstawy zęba, częściowe wyłamanie zęba oraz zmęczeniowe wykruszenie warstwy wierzchniej współpracujących powierzchni roboczych zębów (pitting).

Pomimo, iż na temat diagnozowania przekładni zębatych dużych mocy istnieje wiele opracowań, autorzy często wskazują na trudności w jednoznacznym wykrywaniu miejscowych uszkodzeń kół, ponieważ w początkowej fazie defekty te nie powodują zauważalnych zmian ogólnego poziomu drgań. Do najnowocześniejszych sposobów pomiarowych należy metoda Wibrometr bezkontaktowego pomiaru drgań. laserowy umożliwia m.in. pomiar prędkości drgań wirującego wału. W tym przypadku droga (do punktu pomiarowego), sygnału generowanego przez uszkodzenie koła zębatego lub łożyska ulega skróceniu. Tym samym eliminowany jest wpływ złożonej i zmiennej w czasie transmitancji układu łożysko-korpus przekładni i łatwiej można uzyskać z sygnału efektywne symptomy uszkodzenia.

# 2. ZAKRES PRACY

Uszkodzenia kół zębatych powodują lokalne niestacjonarności sygnału drganiowego, a do ich wykrywania są przydatne metody analizy umożliwiające obserwację sygnału jednocześnie w dziedzinach czasu i częstotliwości, ponieważ przy ich wykorzystaniu możliwe jest określenie czasu wystąpienia efektów wywołanych uszkodzeniem.

W ostatnich latach do rozwiązywania problemów technicznych coraz częściej wykorzystywane są również symulacje komputerowe, ponieważ pozwalają one na zaoszczędzenie czasu i środków finansowych potrzebnych na prowadzenie badań doświadczalnych. W celu przeprowadzenia badań symulacyjnych konieczne jest jednak opracowanie odpowiedniego modelu obiektu oraz przeprowadzenie jego identyfikacji.

Zakres pracy obejmuje:

- zidentyfikowanie w wykorzystywanym modelu dynamicznym: częstotliwości rezonansowych i tłumienia drgań poprzecznych wałów przekładni. ponieważ jest to szczególnie istotne w przypadku występowania lokalnych uszkodzeń kół zębatych,
- rozbudowanie modelu dynamicznego przekładni zębatej w układzie napędowym, tak aby możliwe było symulowanie różnych uszkodzeń kół zębatych,
- opracowanie metody uśredniania sygnałów drganiowych zapewniającej zachowanie pożądanej informacji diagnostycznej,
- wybór sygnału (procesu) zawierającego najwięcej informacji o interesującym nas uszkodzeniu koła zębatego,
- wykonanie selekcji przestrzennej sygnału drganiowego ukierunkowanej na określenie takiego punktu i kierunku pomiarowego, w którym rejestrowany sygnał drganiowy będzie najbardziej użyteczny do celów diagnostycznych,
- opracowanie efektywnej metody (lub metod) wykrywania uszkodzeń kół zębatych na podstawie badań doświadczalnych i symulacyjnych przekładni z zamodelowanymi lokalnymi uszkodzeniami tych elementów.

#### 3. STANOWISKA BADAWCZE I UKŁAD POMIAROWY

Badania doświadczalne prowadzono na dwóch stanowiskach pracujących w układzie mocy krążącej

(rys. 1). Stanowiska te pozwalają na pracę badanych kół przy różnych prędkościach obrotowych oraz obciążeniu regulowanym za pomocą wałków skrętnych, sprzęgła napinającego i dźwigni z obciążnikami. W skład każdego ze stanowisk wchodzą dwie przekładnie: badana i zamykająca, o jednakowych przełożeniach i rozstawie osi. Przekładnia zamykająca napędzana jest silnikiem elektrycznym o mocy 15 [kW]. Na rys. 2 przedstawiono położenie punktów pomiarowych na stanowisku nr 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska mocy krążącej:
1 – przekładnia zamykająca, 2 – przekładnia badana, 3 – sprzęgło napinające, 4 – czujnik położenia kątowego wałów 5 – jednostka logiczna, 6 – analizator sygnałów DSPT SigLab,
7 – komputer, 8 – przetwornik przyspieszeń drgań PCB Piezotronics model 353B15, 9 – vibrometr laserowy OMETRON VH300+, 10 – silnik napędzający



Rys. 2. Położenie punktów pomiarowych przekładni badanej : obudowa łożyska nr 3 - ob3, obudowa łożyska nr 4 - ob4, punkt nr 3 - k3, punkt nr 4 - k4, punkty pomiarowe ob1 i ob2 leżą podobnie jak punkty ob4 i ob3 ale symetrycznie po przeciwnej stronie przekładni,  $\alpha$  – kąt przyporu

Parametry geometryczne kół zębatych zamontowanych w badanych przekładniach przedstawiono w tablicy 1.

W trakcie badań przekładnia badana pracowała jako reduktor. Mierzono przyspieszenia i prędkości drgań wybranych punktów obudowy przekładni oraz prędkości drgań poprzecznych jej wałów. Rejestrowano również synchronicznie sygnały odniesienia zgodne z obrotami wałów.

Parametry koł zębatych	Stanowisko nr 1 (koła o	(koła o skośr	sko nr 2 zębach tych)
	zębach prostych)	komplet 1	komplet 2
Liczba zębów zębnika z <sub>1</sub>	16	19	19
Liczba zębów koła z <sub>2</sub>	24	30	30
Kąt pochylenia linii zęba $\beta$ [°]	0	15	15
Szerokość kół b [mm]	20	56	20
Moduł normalny mn [mm]	4,5	3,5	3,5
Współczynnik przesunięcia zarysu zębnika x1	0,864	0,5	0,5
Współczynnik przesunięcia zarysu koła x <sub>2</sub>	-0,5	0,295	0,295
Odległość osi [mm]	91,5	91,5	91,5

Tablica 1. Parametry geometryczne kół zębatych zamontowanych w badanych przekładniach

Pojedynczy pomiar trwał kilka sekund, jednakże w celu przeprowadzenia selekcji przestrzennej sygnału drganiowego pomiarów predkości drgań w wiekszości punktów pomiarowych (z wyłączeniem tych, w których z przyczyn konstrukcyjnych nie było to możliwe) dokonywano w kierunku działania siły międzyzębnej oraz pionowym i poziomym. Sygnał drganiowy oraz sygnał z układu synchronizacji uśredniania próbkowano częstotliwością 25600 Hz Z i zapisywano na dysku twardym komputera. W trakcie badań mających na celu wykrywanie uszkodzeń kół zębatych utrzymywano temperaturę oleju w przekładni na poziomie 45  $\pm 2^{\circ}$ C, jedynie podczas badań prowadzonych na stanowisku nr 2, gdy w przekładni badanej zamontowany był komplet kół nr 1 ze względu na wielkość przenoszonej mocy temperatura oleju podczas badań wynosiła  $55 \pm 2^{\circ}$ C.

Zakres badań obejmował pomiary w kilku różnych stadiach rozwoju uszkodzenia, przy różnych predkościach obrotowych i obciażeniach. Przeprowadzenie eksperymentów czvnnvch mających na celu zarejestrowanie sygnałów drganiowych w przypadku różnych stadiów rozwoju uszkodzenia wymagało wykonania po każdej serii pomiarowej demontażu i ponownego montażu przekładni. W ramach pracy przeprowadzono również eksperyment bierny, mający na celu sprawdzenie możliwości wykrywania zjawiska występującego powierzchniach pittingu na roboczych zębów. Podczas trwających ponad rok badań doświadczalnych wykonano kilkaset pomiarów drgań.

## 4. MODELOWANIE PRZEKŁADNI ZĘBATYCH DO CELÓW DIAGNOSTYCZNYCH

Ze względu na wysokie koszty, czasochłonność i pracochłonność badań doświadczalnych jako ich uzupełnienie i rozwinięcie przeprowadzono badania symulacyjne. W celu sprawdzenia możliwości wykrywania uszkodzeń kół zębatych w przypadku szerszego, nieobjętego badaniami doświadczalnymi, zakresu zmian parametrów geometrycznych kół, prędkości obrotowych, momentów obciążenia przekładni i dokładności wykonania kół zębatych wykorzystano model dynamiczny przekładni zębatej w układzie napędowym. Wykonano około tysiąca symulacji komputerowych, z których każda trwała średnio kilka godzin przy wykorzystaniu komputera klasy Pentium 4 z procesorem 2,4 GHz.

# 4.1. Model dynamiczny układu napędowego z przekładnią zębatą

W niniejszej pracy do celów diagnostycznych wykorzystano opracowany na Wydziale Transportu Politechniki Śląskiej i zrealizowany w środowisku Matlab-Simulink model dynamiczny przekładni zębatej w układzie napędowym (rys. 3) [38, 16, 20]. Model uwzględnia pracę: elektrycznego silnika napędowego, jednostopniowej walcowej przekładni zębatej, maszyny roboczej. Opis matematyczny modelu dynamicznego układu napędowego z przekładnią zębatą przedstawiono w [20].



Rys. 3. Model dynamiczny układu napędowego z przekładnia zębatą [20]

## 4.2. Identyfikacja modelu

Zastosowanie modelu układu napedowego z przekładnia zebata w diagnozowaniu lokalnych uszkodzeń, analizie dynamicznej lub projektowaniu wymaga przeprowadzenia identyfikacji parametrów tego modelu. W ramach prac [15, 20] dokonano identyfikacji współczynnika tarcia w zazębieniu. W pracy [20] określono wartości współczynnika tłumienia w zazębieniu poprzez porównanie wartości skutecznych przyspieszeń drgań skrętnych koła zmierzonych i uzyskanych poprzez symulację. Jednym z istotnych czynników warunkujących zgodność uzyskiwanych wyników z doświadczeniem jest zidentyfikowanie tłumienia węzłów łożyskowych. Przeprowadzono badania laboratoryjne i symulacyjne, których celem było dostrojenie

modelu układu napędowego z przekładnią zębatą zapewniające zgodność współczynników tłumienia drgań poprzecznych wałów przekładni, w obiekcie rzeczywistym i w modelu.

W tym celu wibrometrem mierzono prędkość drgań poprzecznych wałów przekładni zębatej pobudzanych impulsem siły działającym na wał w kierunku siły międzyzębnej. Wały przekładni na stanowisku nr 1 były podparte na łożyskach kulkowych zwykłych 6307. Przekładnia była obciążona statycznie momentem Mh=207 [Nm]. Wartości siły wymuszającej dobierano tak, aby maksymalne prędkości drgań były zbliżone do występujących podczas pracy przekładni. Podobne wymuszenie impulsowe jak podczas pomiarów na stanowisku laboratoryjnym zastosowano w modelu dynamicznym przekładni zebatej. W widmie predkości drgań poprzecznych wału dominowała częstotliwość 1226 Hz. Widmo, w którym również dominowała częstotliwość około 1226 Hz uzyskano drogą svgnału otrzymanego symulacji Z komputerowej. Świadczy to dużej zgodności częstotliwości drgań rezonansowych wału koła, wyznaczonych symulacyjnie i doświadczalnie. Dobrą zgodność uzyskano również w przypadku wału zębnika. Potwierdza to poprawność przyjętych w modelu mas elementów przekładni i sztywności łożysk. W widmie prędkości drgań występowały również inne częstotliwości, o niższej amplitudzie. W celu dostrojenia współczynnika tłumienia w łożyskach odfiltrowano z sygnału składowe o częstotliwościach poniżej 800 Hz i powyżej a następnie dokonano całkowania 1600 Hz, prędkości drgań. Lokalne maksima wartości bezwzglednej przemieszczenia wału aproksymowano krzywą wykładniczą. Przykładowe wyniki uzyskane na podstawie badań doświadczalnych przedstawiono na rvs. 4a. natomiast uzyskane z symulacji na rys. 4b.

Wartości wykładnika krzywej aproksymującej, uzyskiwane na podstawie wyników badań stanowiskowych oscylowały wokół wartości -616 a maksymalna różnica pomiędzy wykładnikami uzyskanymi na podstawie badań doświadczalnych i symulacyjnych nie przekraczała 2%. Potwierdza to poprawność dostrojenia tłumienia w węzłach łożyskowych. Para zębów obarczona duża wypadkową odchyłką podziałki przy wejściu w przypór generuje impulsy siły, dlatego zmierzono kinematyczne zębnika odchyłki oraz koła i wprowadzono je do modelu przekładni zębatej. Następnie wartości skuteczne prędkości drgań poprzecznych wałów zmierzone podczas pracy przekładni porównano z otrzymanymi w badaniach symulacyjnych uzyskując zadowalającą zgodność Poprawność doboru wyników. parametrów sztywności i tłumienia w węzłach łożyskowych przekładni zębatej sprawdzono symulując lokalne uszkodzenie bieżni zewnetrznej łożyska.





Modelowano je poprzez zmianę sztywności łożyska w trakcie przetaczania się kulki przez lokalnie uszkodzony odcinek bieżni. Długość uszkodzonego fragmentu bieżni zewnętrznej wynosiła 2 mm oraz przyjęto, że sztywność łożyska  $c_{loz}$  (Q<sub>1</sub>) zmniejsza się wtedy maksymalnie o 28%. Okres powtarzania się zmian sztywności wynika z zależności kinematycznych w łożysku [12, 14]. Symulowano prace przekładni obciażonej momentem  $M_h=207$  [Nm], a prędkość obrotowa wału koła wynosiła 1800 obr/min. Uszkodzenie to w momencie, gdy element toczny przetaczał się przez uszkodzony fragment bieżni powodowało chwilowy wzrost prędkości drgań wału (rys. 5b).



Rys. 5. Sygnały prędkości drgań poprzecznych wału koła uzyskane na podstawie: a) badań doświadczalnych b) symulacji, – zarejestrowane w przypadku lokalnego uszkodzenia łożyska

przeprowadzono Następnie badania doświadczalne. W przekładni badanej na stanowiska nr 1 (zamiennie) na wale zębnika lub koła montowano łożysko z zamodelowanym lokalnym uszkodzeniem bieżni zewnętrznej. Do pomiarów drgań wirujących wałów przekładni pracującej w takich samych warunkach jak podczas badań symulacyjnych wykorzystano również wibrometr laserowy. W przypadku braku uszkodzeń łożysk w sygnale drganiowym można było zaobserwować jedynie nieznaczne zaburzenia spowodowane błędami podziałki kolejnych par zebów wchodzących w przypór. Na rys. 5 przedstawiono przebiegi czasowe sygnału prędkości drgań poprzecznych wału koła z uszkodzonym łożyskiem zmierzone na stanowisku laboratoryjnym oraz uzyskane w badaniach symulacyjnych. W obu przypadkach można zaobserwować w przebiegach czasowych powtarzający się cyklicznie (zgodnie z okresem przejścia elementów tocznych przez uszkodzony fragment bieżni) wzrost amplitudy poprzecznych prędkości drgań wału. Przeprowadzono również analize czasowoczęstotliwościową zarejestrowanych sygnałów (rys. 6). Uszkodzenie bieżni zewnętrznej łożyska przekładni zębatej pobudzało wał do drgań poprzecznych W paśmie częstotliwości rezonansowej (~1200 Hz) oraz spowodowało lokalnych maksimów o okresie wystapienie powtarzania równym okresowi przetaczania się elementów tocznych łożyska przez uszkodzony fragment bieżni.



Rys. 6. Transformaty WV sygnału prędkości drgań poprzecznych wału koła uzyskane na podstawie: a) symulacji, b) badań doświadczalnych; – zarejestrowane w przypadku lokalnego uszkodzenia łożyska

Na podstawie przeprowadzonych badań można wykorzystanym stwierdzić, W modelu iŻ dynamicznym przekładni zębatej w układzie napędowym poprawnie zidentyfikowano częstotliwości rezonansowe i tłumienie drgań poprzecznych wałów przekładni. Przedstawione wyniki eksperymentów numerycznych i badań doświadczalnych wykazuja dużą zgodność jakościową (rys. 6), a także ilościową (rys. 4) potwierdzając w ten sposób poprawność dostrojenia modelu oraz jego przydatność do symulowania lokalnych uszkodzeń elementów przekładni.

## 5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ DOŚWIAD-CZALNYCH I SYMULACYJNYCH

#### 5.1. Wykorzystanie metody estymacji opóźnienia czasowego w procesie uśredniania sygnału drganiowego

W przemysłowych przekładniach zębatych ze względów konstrukcyjnych znacznik uśredniania najłatwiej jest umieścić na wale wyprowadzonym na zewnątrz przekładni. Oddalenie znacznika od diagnozowanego koła, drgania skrętne w układzie wałów przekładni i często zbyt wolno narastające zbocze sygnału synchronizującego powodują, że impuls synchronizujący występuje przy położeniach kątowych koła różniących się o niewielką wartość. Różnice te są szczególnie istotne w przypadku składowych sygnału o wysokich częstotliwościach oraz przy diagnozowaniu lokalnych uszkodzeń kół generujących impulsowe zaburzenia, których czas trwania jest porównywalny z odchyłką występowania impulsu synchronizującego.

Analizując nałożone na siebie uśredniane przebiegi czasowe prędkości drgań poprzecznych wału, gdy położenie impulsu synchronizujacego nie było korygowane wstępnie stwierdzono, że odchyłka położenia impulsu synchronizującego wynosiła  $\pm 2$  okresy próbkowania, czyli około  $\pm 1^{\circ}$  obrotu wału (rys. 7a). Celem zminimalizowania wpływu tej odchyłki na wyniki uśredniania przeprowadzono położenia obliczeniową korektę impulsu wykorzystując synchronizującego estymację opóźnienia czasowego pomiedzy kolejnymi zarejestrowanymi okresami uśrednianych przebiegów czasowych. Było to o tyle istotne, że czas trwania impulsu pochodzącego od uszkodzonego zęba przypadkach w niektórych wynosił około 0,12÷0,16·10<sup>-3</sup> [s], czyli 3÷4 okresów próbkowania przy zastosowanej częstotliwości próbkowania. Z tego względu impuls synchronizacji uśredniania powinien być bardzo dokładnie skorelowany z położeniem kątowym koła, gdyż wystąpienie odchyłek jego położenia może doprowadzić do z uśrednianego usuniecia sygnału informacji o pojawiającym się uszkodzeniu.

Przed zastosowaniem estymacji przesunięcia czasowego wybrano fragment przebiegu czasowego drgań równy okresowi uśredniania względem, którego określano przesunięcie czasowe. Był to

czasowego fragment przebiegu najlepiej Sprawdzano skorelowany pozostałymi. z metod estymacji przesunięcia przydatność czasowego przedstawionych w [32]. Stosując przedstawione poniżej metody należało zwrócić uwagę, aby dopuszczalne przesunięcie sygnałów nie było zbyt duże, a w szczególności musiało ono zawsze być mniejsze od liczby próbek przypadających na obrót wału o jedną podziałkę zazębienia, w przeciwnym przypadku mogło nastąpić całkowite rozsynchronizowanie sygnałów. Najpierw określono opóźnienie czasowe wykorzystując metodę bazującą na bikorelacji (TDE). W celu uzyskania najlepszych rezultatów do obliczania bikorelacji stosowano następujące liczby próbek: n<sub>samp</sub> = 256, 128, 64, 32, 16. Najlepsze wyniki uzyskano, gdy n<sub>samp</sub> = 32 próbki. W stosunku sytuacji. gdv położenie impulsu do synchronizującego nie było korygowane widoczna była poprawa jednakże wynik nie był zadowalający. W kolejnym kroku zastosowano metodę określania opóźnienia czasowego bazują na bispektrum (TDEB) [32]. Uzyskane wyniki były znacznie lepsze i były porównywalne z tymi, które uzyskano, po zastosowaniu metody wykorzystującej korelację wzajemną sygnałów -TDER (rys. 7b).



Rys. 7. Nałożenie uśrednianych przebiegów czasowych prędkości drgań poprzecznych wału zębnika (fragment sygnału od 15÷75 próbki):
a) położenie impulsu synchronizującego nie korygowane, b) położenie impulsu synchronizującego korygowane metodą TDER

W przypadku, gdy położenie impulsu synchronizującego nie było korygowane wartości współczynnika korelacji pomiędzy uśrednianymi przebiegami czasowymi a przebiegiem czasowym traktowanym jako odniesienie, w niektórych przypadkach były bardzo niskie. Po zastosowaniu metody estymacji opóźnienia czasowego TDER oscylowały one wokół wartości 0,9 i wyższych. W tym przypadku zauważalne były również różnice amplitudy w uzyskiwanych uśrednionych przebiegach sygnałów. Różnice w wartościach amplitud składowych rosnące wraz ze wzrostem częstotliwości są bardzo dobrze widoczne w widmach tych sygnałów przedstawionych na rys. 8.



# Rys. 8. Widmo sygnału uśrednionego przed i po zastosowaniu korekty położenia impulsu synchronizującego

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że w przypadku uśredniania sygnału drganiowego, aby uniknąć strat informacji diagnostycznych celowe stosowanie iest obliczeniowei korekcji położenia impulsu synchronizującego. Do jej wyznaczania w przypadku sygnału prędkości drgań poprzecznych wałów przekładni zębatej najlepsze okazały się metody estymacji opóźnienia czasowego bazujące na korelacji wzajemnej (TDER) i na bispektrum (TDEB). Metoda TDER okazała się wygodniejsza w zastosowaniu, ponieważ wymagała krótszego czasu obliczeń.

#### 5.2. Wykrywanie wykruszenia wierzchołka zęba

Badania mające na celu wykrywanie wykruszenia wierzchołka zęba zębnika prowadzono na stanowisku nr 1. Wykruszenie zęba zębnika modelowano w kolejnych skracając ząb etapach, o 1 mm (rys. 9). Skrócenie to spowodowało zmniejszenie liczby przyporu czołowej  $(\boldsymbol{\varepsilon}_a)$ w przypadku zazebienia uszkodzonego zeba. Nominalnie wynosiła ona 1.33. Podczas badań predkość obrotowa zebnika wvnosiła około 2700 obr/min. Przekładnia była obciążona momentem  $M_h=207$  Nm.



Rys. 9. Lokalne uszkodzenie zęba zębnika – wykruszenie wierzchołka zęba (1, 2, 3, 4 mm)

Istotnym problemem z punktu widzenia diagnostyki jest selekcja przestrzenna sygnału drganiowego. Od wyboru odpowiedniego punktu i kierunku pomiarowego, zależy bowiem prawdopodobieństwo wykrycia uszkodzenia. Do pomiarów wykorzystano piezoelektryczny przetwornik przyspieszeń drgań, którym mierzono tylko drgania obudowy łożyska w punktach k3 i k4 (rys. 2) oraz wibrometr laserowy, którym wykonywano pomiary prędkości drgań wirujących wałów oraz wybranych punktów obudowy (ob1, ob2, ob3, ob4) w kierunku działania siły międzyzębnej, a także poziomo i pionowo.

Przeprowadzono analizę sygnału ukierunkowaną na wykrywanie wykruszenia zęba zębnika. W tym zastosowano uśrednianie celu synchroniczne okresem obrotu zebnika, które pozwoliło usunać obrotem zebnika składowe niezwiązane Z i poprawiło stosunek sygnału do szumu. Celem zminimalizowania wpływu odchyłki położenia znacznika uśredniania, która wynosiła maksymalnie ±2 próbki przeprowadzono obliczeniowa korekte jego położenia wykorzystując estymację opóźnienia czasowego pomiędzy kolejnymi zarejestrowanymi rekordami, przedstawioną wcześniej. Na podstawie przebiegu czasowego uśrednionego sygnału prędkości drgań poprzecznych wału zębnika trudno jest stwierdzić czy nastąpiło wykruszenie zęba. W sygnale można było znaleźć, co najmniej kilka lokalnych maksimów, z których praktycznie każde mogłoby pochodzić od tego uszkodzenia. Zastosowano, więc pseudo transformatę Wignera Ville'a, która umożliwia czasowo-częstotliwościowy rozkład sygnału.

$$WV(t,f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^* \left(t - \frac{\tau}{2}\right) w(\tau) e^{-j2\pi/\tau} d\tau \quad (1)$$

gdzie:

 $x^{*}(t)$  – sygnał zespolony sprzężony z x(t),

*w(t)* – funkcja wagi podobna do okna czasowego stosowanego w krótko-czasowej transformacie Fouriera.

Przedstawiona metoda w przypadku analizy sygnału prędkości drgań wału zębnika mierzonych w kierunku działania siły międzyzębnej i uśrednionych okresem obrotu zębnika pozwala jednoznacznie wykryć wykruszenie zęba zębnika wynoszace 3 mm i 4 mm. Wykruszenia te można było również wykryć w oparciu o zaproponowana metodę w przypadku analizy sygnału prędkości drgań wału zębnika zmierzonego w kierunku pionowym natomiast wykrycie wykruszenia wynoszącego 3 mm nie było możliwe na podstawie zmierzonych drgań pozostałych punktów [37]. Wstępnie potwierdza to przyjętą tezę, że pomiar prędkości drgań poprzecznych wałów wibrometrem laserowym pozwala uniknąć zakłóceń w sygnale spowodowanych złożoną funkcją transmitancji i tym samym ułatwia wnioskowanie diagnostyczne. Ponieważ jednak można było wykryć "dopiero" wykruszenie zęba zębnika 3 mm poszukiwano innych metod analizy sygnału, które pozwoliłyby na wykrycie uszkodzeń we wcześniejszych stadiach rozwoju. Na podstawie literatury wybrano metodę analizy obwiedni sygnału, która jest oparta na transformacie Hilberta. Wykrycie uszkodzenia na podstawie obwiedni oraz jej rozkładu WV okazało się trudne. Zastosowano kurtozę  $K_i$  w oknie czasowym o odpowiednio dobranej szerokości przesuwanym wzdłuż osi czasu. W metodzie tej istotny jest odpowiedni dobór szerokości okna czasowego. Najlepsze wyniki uzyskano, gdy szerokość okna czasowego wynosiła 1,5 okresu zazębienia  $(T_z)$ . Wykrycie wykruszeń zęba zębnika o głębokości 1 lub 2 mm było w tym przypadku niemożliwe. Obserwując rozkład czasowo-częstotliwościowy WV uśrednionego sygnału prędkości drgań poprzecznych wału zębnika zauważono, że największa energia sygnału występuje w pasmach częstotliwości zazębienia  $f_z$  i jej harmonicznych. Składowe te maskuia niskoenergetyczne zaburzenie spowodowane uszkodzeniem [28]. Aby uwydatnić to zaburzenie wygenerowano zgodnie z algorytmem przedstawionym na rys. 10 sygnał różnicowy (rys. 11b) [31, 35, 21].



Rys. 10. Algorytm uzyskiwania sygnału różnicowego; f<sub>ol</sub> – częstotliwość obrotowa zębnika, f<sub>o2</sub> – częstotliwość obrotowa koła, f<sub>z</sub> – częstotliwość zazębienia



Rys. 11. Uśredniony okresem obrotu zębnika sygnał prędkości drgań wału zębnika zmierzony w kierunku działania siły międzyzębnej – wykruszenie zęba zębnika 2 mm (a); sygnał różnicowy (b) uzyskany zgodnie z algorytmem przedstawionym na rys. 10

W sygnale tym przedstawionym na rys. 11b nadal trudno było określić, który lokalny wzrost poziomu drgań mogłoby pochodzić od uszkodzenia. Zastosowano, więc analizę obwiedni sygnału różnicowego, ale zarówno na podstawie obwiedni jak i jej rozkładu czasowo-częstotliwościowego nie można było poprawnie zdiagnozować uszkodzenia. Wyniki były również dosyć trudne w interpretacji w przypadku zastosowania współczynnika kurtozy określonego w oknie czasowym przesuwanym wzdłuż osi czasu i obliczonego na podstawie sygnału różnicowego. Wykonano, więc analizę czasowo-częstotliwościową WV sygnału różnicowego. Podobnie jak w przypadku analizy obwiedni zastosowano parametr Choi-Williamsa = 0,0005. W rozkładzie WV (rys. 12) występował wzrost amplitudy paśmie 0÷4500 Hz W w zakresie kąta obrotu zębnika odpowiadającego współpracy uszkodzonego zęba zębnika. Wzrost ten pojawiał się również w przypadku innych wielkości wykruszenia zęba zębnika nawet 1 mm.



Rys. 12. Rozkład czasowo-częstotliwościowy WV sygnału różnicowego – pomiar prędkości drgań wału zębnika w kierunku działania siły międzyzębnej – wykruszenie zęba zębnika 2 mm

W celu łatwiejszej interpretacji uzyskanych wyników dokonano sumowania dyskretnych wartości rozkładu WV (wzór 1) zgodnie z zależnością:

$$S_{WV}(\phi) = \sum_{k_{WV}=A}^{B} WV(l_{WV}, k_{WV})$$
(2)

gdzie:

 $WV(l_{WV}, k_{WV}) = WV(t, f),$ 

- *l<sub>WV</sub>*, *k<sub>WV</sub>* dyskretne wartości odpowiednio czasu i częstotliwości,
- A, B dyskretne wartości odpowiadające odpowiednio częstotliwościom granicznym przedziału sumowania  $f_A, f_B$ .

Sumowania tego dokonywano w przedziale częstotliwości  $f_A \div f_B$   $(f_A = 0 \text{ Hz}, f_B = 4500 \text{ Hz} \approx 6.5 f_z)$ , w którym wartości rozkładu

WV dominowały W zakresie kata obrotu odpowiadającego współpracy uszkodzonego zęba. W zaproponowanej sumie rozkładu WV wyraźnie widoczne są lokalne maksima pochodzące od wykruszenia wierzchołka zęba zębnika, co w łatwy sposób pozwala wykryć to uszkodzenie. Podobna sytuacja występowała w przypadku sumy  $S_{WV}(\phi)$ wykonanej na podstawie pomiaru prędkości drgań poprzecznych wału zmierzonych w kierunku pionowym, jednakże oprócz lokalnych maksimów pochodzących od uszkodzenia występowały w niej także inne, o mniejszej amplitudzie, mogące stopniu utrudnić w pewnym wnioskowanie diagnostyczne. W przypadku  $S_{WV}(\phi)$  uzyskanej z sygnału przyspieszeń drgań punktów k3 i k4 wykruszenie zęba zębnika wynoszące 1 mm spowodowało znaczny wzrost  $S_{WV}(\phi)$  w zakresie odpowiadającego kata obrotu współpracy uszkodzonego zęba, ale wykrycie uszkodzenia 2 lub 3 mm już nie było możliwe. Spowodowane może to być złożoną i zmienną w czasie transmitancją układu łożysko-korpus przekładni oraz oddziaływaniem struktury rezonansowej obudowy przekładni. Wykrycie uszkodzeń na podstawie sum rozkładu  $S_{WV}(\phi)$  uzyskanych z sygnałów zmierzonych w pozostałych punktach pomiarowych ob1, ob2, ob3, ob4 w trzech kierunkach również było bardzo trudne lub niemożliwe [37].

Celem dalszych analiz było znalezienie miary, proporcjonalnej do wielkości wykruszenia. Zaproponowano następującą bezwymiarową miarę  $M_{wWV}$  określaną z zależności:

$$M_{wWV} = \frac{S_{WVu}}{\overline{S}_{WVzw0}},$$
 (3)

gdzie:

- $S_{WVu}$  najwyższa lokalna wartość maksymalna w  $S_{WV}(\phi)$ , i odpowiadający jej kąt obrotu wału  $\phi_{u}$ ,
- $\overline{S}_{WVzw0}$  wartość średnia  $z_D$  najwyższych lokalnych wartości maksymalnych  $S_{WV}(\phi)$ , w przedziale:

 $\phi \in \langle 0^{\circ}, \phi_u - 0.5\phi_z \rangle \cup (\phi_u + 0.5\phi_z, 360^{\circ})$  dla kół bez uszkodzeń (nowych),

- $\phi_z$  kąt obrotu koła zębatego odpowiadający podziałce zasadniczej,
- *z<sub>D</sub>* liczba zębów diagnozowanego koła zębatego.

Na rys. 13 przedstawiono wartości tej miary w funkcji skrócenia zęba zębnika. Zaproponowana miara sygnalizuje pojawienie się nawet nieznacznego wykruszenia wynoszącego 1 mm -wzrost  $M_{wWV}$  o około 70%. Podsumowując można stwierdzić, że zaproponowana miara jest wrażliwa na wczesne stadia wykruszenia. Zmniejszenie czołowej liczby przyporu w skutek wykruszenia wierzchołka zęba poniżej jedności powoduje zwiększenie dynamiki wzrostu proponowanej miary.



Rys. 13. Zmiany zaproponowanej miary wykruszenia zęba  $M_{wWV}$  bazującej na sumie  $S_{WV}(\phi)$  w funkcji skrócenia zęba zębnika - wyniki badań doświadczalnych

W celu przeanalizowania wpływu innych czynników na zmiany zaproponowanej miary przeprowadzono wiele serii symulacji komputerowych. Na wstępie porównano jednak wyniki otrzymane z modelu dynamicznego przekładni zębatej z tymi, które uzyskano z pomiarów na stanowisku badawczym. Ponieważ odchyłki kinematyczne na podziałce kół zębatych powoduja efekty dynamiczne zbliżone do wywoływanych wczesne stadium przez uszkodzenia [18] przeprowadzono symulacje przy różnych ich wartościach. W przypadku okresowej wystąpienia składowej odchyłki kinematycznej na podziałce zębnika  $f_l$ = -14 µm i koła  $f_2=10 \ \mu m$  oraz składowej losowej odchyłki kinematycznej na podziałce zarówno zębnika jak i koła  $s_{1max} = s_{2max} \pm 9,6 \,\mu\text{m}$  uzyskano we wszystkich stadiach rozwoju uszkodzenia zadowalajaca zgodność zarówno ilościową jak i jakościową [37]. Na rys. 14 i 15 porównano rozkłady WV sygnału różnicowego, uzyskanego z pomiarów i symulacji, gdy wykruszenie zęba zębnika wynosiło 3 mm.



Rys. 14. Rozkład czasowo-częstotliwościowy WV sygnału różnicowego prędkości drgań wału zębnika w kierunku działania siły międzyzębnej – wykruszenie zęba zębnika 3 mm – wynik badań doświadczalnych



Rys. 15. Rozkład czasowo-częstotliwościowy WV sygnału różnicowego prędkości drgań wału zębnika w kierunku działania siły międzyzębnej – wykruszenie zęba zębnika 3 mm – wynik badań symulacyjnych

Podkreślić również należy, że charakter zmian  $M_{wWV}$  uzyskanej z pomiarów i symulacji był identyczny, o czym świadczy wartość współczynnika korelacji na poziomie 0,98.

Kolejne symulacje posłużyły do przebadania wpływu wielkości odchyłek wykonania kół zebatych na zmiany miary wykruszenia zęba  $M_{wWV}$ , a tym samym na możliwość wykrywania wczesnych stadiów wykruszenia zęba zębnika. Wykruszenie wynoszace 4 mm powoduje znaczna nieciagłość zazębienia, która z kolei przekłada się na gwałtowny wzrost  $M_{wWV}$ , co jest korzystne, z punktu widzenia diagnostyki, ponieważ wzrost ten sygnalizuje wystapienie dużych sił dynamicznych a tym samym niebezpieczeństwo awarii przekładni. Dlatego proponowanej miary aproksymowano zmianv funkcją liniową w zakresie wykruszeń od 0 do 3 mm (gdy występował nieznaczny spadek czołowej liczby przyporu poniżej jedności). Na podstawie analizy wyników [37] okazało się, że współczynnik korelacji maleje wraz ze wzrostem odchyłek wykonania kół. Wykrycie wykruszenia wierzchołka zęba zębnika przy użyciu  $M_{wWV}$  było również możliwe w przypadku wystapienia dużych odchyłek wykonania kół 4,8-krotnie przekraczających wartość ugięcia statycznego pary zębów - wzrost wartości miary o 46%. Wyniki potwierdzają wnioski zawarte w pracy [18] gdzie stwierdzono, że zarówno lokalne uszkodzenia zębów kół, jak i odchyłki wykonania kół generują impulsowe zaburzenia sygnału drganiowego i wtedy wykrywanie lokalnych uszkodzeń kół zębatych jest utrudnione. Wzrost obciążenia przekładni powoduje większe ugięcie statyczne zębów a zatem maleją względne odchyłki wykonania kół zebatych odniesione do ugięcia statycznego pary zębów i z tego powodu większa jest dynamika wzrostu miary  $M_{wWV}$ . Przeprowadzono również [37] serię symulacji wykruszenia zęba zębnika przekładni, której czołowa liczba przyporu była większa i wynosiła  $\varepsilon_{\alpha}$  =1,47, a liczby zębów zębnika i koła

odpowiednio z<sub>1</sub>=19, z<sub>2</sub>=52. Również w tym przypadku uzyskane wyniki potwierdziły zasadność zaproponowanej metody stosowania do diagnozowania w/w uszkodzeń przekładni zębatej. Podczas pracy przekładni z obciążeniem jednostkowym 2,57 MPa wykruszenie zęba koła wynoszące 1 mm powodowało wzrost miary  $M_{wWV}$ o 209%, natomiast w przypadku obciążenia jednostkowego równego 3,84 MPa wzrost ten był mniejszy i wynosił 13%. W celu zweryfikowania przydatności zaproponowanej metody wykrywania wykruszenia zęba koła przeprowadzono badania doświadczalne na stanowisku nr 1. Zarówno przypadku, gdy obciążenie jednostkowe w przekładni wynosiło 3,84 MPa jak i 2,57 MPa wykruszenia zęba zębnika wynoszące 2 mm powodowało wystąpienie wyraźnego lokalnego maksimum w rozkładzie WV oraz jego sumie  $S_{WV}(\phi)$ . Świadczy to o użyteczności przedstawionej metody wykrywania wykruszenia zeba.

W odróżnieniu od transformaty Wignera Ville'a w transformacie falkowej stosowane są okna, które zwężają się przy analizie wysokich częstotliwości i ulegają rozszerzeniu przy analizie niskich częstotliwości. Dlatego sprawdzono również przydatność do wykrywania tego typu uszkodzeń ciągłej transformaty falkowej (CWT) [1, 3, 13, 27, 37] oraz ciągłej zespolonej transformaty falkowej (CCWT) [13], zdefiniowanych następująco:

$$C(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$
(4)

gdzie:

a - współczynnik skali,  $a \in \mathbb{R}^+$ -{0},

b - parametr przesunięcia w dziedzinie czasu  $b \in \mathbb{R}$ ,

 $\psi$  - funkcja analizująca (falka bazowa). W przypadku sygnałów dyskretnych x(n) gdy:

$$t = (n-1) \cdot \Delta t, \tag{5}$$

n=1,2,3,...,N; N jest liczbą próbek;  $\Delta t$  jest okresem próbkowania,  $a=2^{l}$ , b=k  $2^{l}$  natomiast C(a,b)=C(l,k).

Znanych jest wiele rodzajów falek bazowych [24]. Podjęto, więc próbę znalezienia funkcji bazowej najlepszej do wykrywania wykruszenia wierzchołka zęba. W celu łatwiejszej interpretacji uzyskanych wyników również dokonano sumowania wartości współczynników CWT zgodnie z zależnością:

$$S(\phi) = \sum_{l=A}^{B} C(l,k)$$
(6)

Sumowania tego dokonywano przedziale skali (A÷B), w którym wartości współczynników CWT dominowały w zakresie kąta obrotu odpowiadającego współpracy uszkodzonego zęba. Na rys. 16 przedstawiono sumy modułów współczynników CCWT sygnału różnicowego przy zastosowania falki cGaus 4 wyznaczone zgodnie z zależnością:

$$S(\phi) = \sum_{l=A}^{B} |C(l,k)|.$$
<sup>(7)</sup>



Rys. 16. Suma modułów współczynników CCWT w przypadku zastosowania falki cGaus 4; sygnał różnicowy; pomiar w kierunku działania siły międzyzębnej; A=1, B=25;

Wykrycie uszkodzenia zarówno w przypadku CWT jak i CCWT sygnału uśrednionego było trudne, co potwierdza potrzebę wykorzystania sygnału różnicowego.

Celem określenia przydatność różnych falek bazowych do wykrywania wykruszenia zęba zębnika zaproponowano wskaźnik przydatności ( $W_{PF}$ ) określany w następujący sposób:

• wyznaczono  $S'(\phi)$  z następującej zależności:

$$S'(\phi) = |S(\phi)| - |\overline{S(\phi)}|,$$
 (8)

gdzie:

 $\overline{|S(\phi)|}$  – wartość średnia  $|S(\phi)|$ w zakresie kąta obrotu wału zębnika 0÷360°,

- wyznaczono najwyższą lokalną wartość maksymalną  $S'_u$  funkcji  $S'(\phi)$  (pochodzącą od uszkodzenia zęba) i odpowiadający jej kąt obrotu wału  $\phi_u$ ,
- wyznaczono drugą co do wielkości lokalną wartość maksymalną S'<sub>nu</sub> w przedziale:  $\phi \in \langle 0^{\circ}, \phi_u - 0.5\phi_z \rangle \cup (\phi_u + 0.5\phi_z, 360^{\circ})$ , (nie pochodzącą od uszkodzenia), gdzie:

 $\phi_z$  – kąt obrotu koła zębatego odpowiadający podziałce zasadniczej,

 jako kryterium decydujące o wyborze falki bazowej przyjęto W<sub>PF</sub> określany z zależności:

$$W_{PF} = \frac{S'_u}{S'_{nu}} \,. \tag{9}$$

Wartości przyjętego wskaźnika przydatności falki  $W_{PF}$  określono na podstawie sygnału różnicowego prędkości drgań poprzecznych wału zębnika w kierunku działania siły międzyzębnej, w przypadku, gdy wykruszenie zęba wynosiło 2 mm. Na podstawie uzyskanych wyników [37] można stwierdzić, że wyższe wartości wskaźnika  $W_{PF}$  uzyskuje się w przypadku zastosowania CCWT do analizy sygnału różnicowego niż stosując CWT. Zaproponowana metoda pozwoliła na wytypowanie z pośród 48 falek bazowych grupy szczególnie przydatnych do diagnozowania wykruszenia zęba. Są to: cGaus 2; cGaus 4; oraz Shannon 2 3,0.

Celem dalszych analiz było znalezienie miary, proporcjonalnej do wielkości wykruszenia. Zaproponowano następującą miarę  $M_w$  określaną z zależności:

$$M_{w} = \frac{S'_{u}}{S'_{w0}} , \qquad (10)$$

gdzie:

- $S'_u$  najwyższa lokalna wartość maksymalna w  $S'(\phi)$  i odpowiadający jej kąt obrotu wału  $\phi_u$ ,
- $\overline{S}'_{zw0}$  wartość średnia z  $z_D$  najwyższych lokalnych wartości maksymalnych  $S'(\phi)$ w przedziale:
  - $\phi \in \langle 0^{\circ}, \phi_u 0.5\phi_z \rangle \cup (\phi_u + 0.5\phi_z, 360^{\circ})$  dla kół bez uszkodzeń (nowych).

Przyjęta miara określana na podstawie badań doświadczalnych umożliwia wykrycie nawet nieznacznego wykruszenia zęba zębnika wynoszącego 1 mm – w przypadku falki cGaus 4 jest to wzrost  $M_w$  o około 30%, a w przypadku falki Shannon 2 3,0 wzrost  $M_w$  o około 60%.

Na rys. 17 przedstawiono zmiany  $M_w$  bazującej CCWT i falce Gaus 4 w przypadku różnych obciążeń przekładni, różnych prędkości obrotowych oraz różnych odchyłek wykonania kół (odch. 1 - 1,6 ugięcia statycznego pary zębów (Q=2,57 MPa); odch. 2 - 3,2 ugięcia statycznego pary zębów (Q=2,57 MPa)). Podobny przebieg zmian wykazywała  $M_w$  w przypadku zastosowania falek Gaus 2 oraz Shannon 2 3,0.



Rys. 17. Zmiany miary wykruszenia zęba  $M_w$ w funkcji skrócenia zęba zębnika w przypadku zastosowania CCWT i falki Gaus4 oraz różnych obciążeń przekładni, różnych prędkości obrotowych, różnych odchyłek wykonania kół

Podsumowując można stwierdzić, że zaawansowane przetwarzanie sygnału prędkości drgań poprzecznych wałów, zmierzonego w kierunku działania siły międzyzębnej oraz wykorzystanie analiz jednocześnie W dziedzinach czasu i częstotliwości lub czasu i skali (CWT) umożliwiło efektywne wykrywanie wykruszenia wierzchołka zęba zarówno zębnika jak i koła. Na tej podstawie możliwe było stworzenie miary proporcjonalnej do wielkości wykruszenia zęba i pozwalającej na ocenę jego głębokości. Symulacje komputerowe pracy przekładni zębatej z uszkodzonymi elementami, wvkonane użyciu rozbudowanego przy i zidentyfikowanego jej modelu dynamicznego, umożliwiły zweryfikowanie tej miary w przypadku występowania wykruszeń wierzchołka zęba podczas pracy przekładni: o różnych parametrach kół zębatych, przy różnych geometrycznych predkościach obrotowych. obciażeniach oraz odchyłkach wykonania kół.

#### 5.3. Wykrywanie pęknięcia u podstawy zęba

Na temat wykrywania pęknięcia zęba metodami drganiowymi istnieje obszerna literatura [4, 6, 7, 9, 11, 18, 29, 31, 33, 35, 36, 41]. W analizie tego uszkodzenia wykorzystuje się fakt, iż na skutek powstania pęknięcia zęba u podstawy następuje zmniejszenie jego sztywności. Zgodnie z [29] wystąpieniu mniejszej sztywności zazębienia towarzyszy przyrost obciążeń kolejnej pary zębów wchodzących w przypór.

Na podstawie badań własnych autora [18] można również stwierdzić, iż w przypadku przekładni pozbawionej odchyłek wykonawczych wykrycie bardzo małego spadku sztywności zazębienia spowodowanego pęknięciem u podstawy zęba jest stosunkowo łatwe. Przekładnia rzeczywista jest jednak zawsze obarczona odchyłkami wykonania zazębienia, które mogą wywoływać powstanie impulsów siły wpływających na zmiany sygnału drganiowego, zbliżone do tych powodowanych przez pęknięcie zęba we wczesnej fazie.

W pierwszej kolejności analizom poddawano sygnały prędkości drgań poprzecznych wału (uszkodzonego koła zębatego), które uzyskano z symulacji komputerowych. Obliczono, zaproponowaną miarę  $M_{wWV}$ , bazującą na odpowiednio utworzonym sygnale różnicowym i jego pseudo transformacie Wignera Ville'a (WV). Podobnie jak poprzednio stosowano parametr Choi-Williamsa = 0,0005. Symulowano prace przekładni pracującej na stanowisku nr 1 z pękniętym u podstawy zębem koła. Częstotliwość obrotowa wału zębnika fol wynosiła około 45 Hz, a obciążenie jednostkowe 2,57 MPa. Zarówno w przypadku przekładni bez odchyłek wykonania i z odchyłkami wynoszącymi maksymalnie 1,6 ugięcia statycznego pary zębów (dla Q=2,57 MPa) uzyskano wysoką zgodność zmian miary  $M_{wWV}$ , w stosunku do zmian wzrostu ugięcia statycznego pary zębów  $\Delta W_{sn}$  (pod koniec przyporu jednoparowego) wywołanego pęknięciem u podstawy zęba (rys. 18). Wartość  $M_{wWV}$ , przedstawiona na rys. 18 w przypadku przekładni z zerowymi odchyłkami wykonania została podzielona przez 200 w celu uzyskania większej czytelności wykresu.



Rys. 18. Wzrost ugięcia statycznego pary zębów wywołanego pęknięciem u podstawy zęba oraz zmiany miary MwWV w przypadku różnych odchyłek wykonania kół

Kwadrat współczynnika korelacji między miarą  $M_{wWV}$ , a wzrostem ugięcia statycznego pary zębów  $\Delta W_{sn}$  w obu przypadkach osiągał wysokie wartości (0,97). Oznacza to, że zaproponowana miara oddaje charakter procesów zachodzących na skutek zmniejszenia sztywności zazębienia spowodowanego pęknięciem zmęczeniowym. W pracy [11] jako źródło informacji diagnostycznej o pęknięciu zęba koła przyjęto sygnał przyspieszeń drgań wału uzyskany z symulacji komputerowej. Symulowano pracę przekładni zamontowanej na stanowisku nr 1. Częstotliwość obrotowa wału zębnika wynosiła 45 Hz a obciążenie jednostkowe 2,57 MPa. W celu wykrycia (na podstawie sygnału drganiowego) spadku sztywności zazębienia wywołanego pęknięciem zęba stosowano: wartość skuteczną (RMS), wartość szczytowa (peak), maksimum, minimum, średnia arytmetyczna średnia geometryczną, średnią harmoniczną, odchylenie standardowe obciążone i nieobciążone, wariancję obciążoną i nieobciążoną, kwadryle pierwszy, drugi (mediana) i trzeci, odchylenie ćwiartkowe, pozycyjny współczynnik zmienności, odchylenie przeciętne, współczynnik zmienności obciążony i nieobciążony, momenty centralne rzędu 3÷10, współczynnik skupienia (kurtozę), współczynnik skupienia standaryzowany (kurtozę standaryzowaną), współczynnik asymetrii, współczynnik asymetrii standaryzowany, współczvnnik kształtu. współczynniki impulsowości, luzu, szczytu, dyskryminantę FM0, dyskryminantę X4 (FM4,NA4,NB4), dyskryminantę X6 (M6A), dyskryminantę X8 (M8A), dyskryminante X10 (M10A), energię sygnału, bilans energetyczny oraz sumę częstotliwości zazębienia. Poszczególne miary były wyznaczane na podstawie sygnałów przyspieszeń drgań zebnika w przypadku sygnału sygnału filtrowanego. różnicowego, nie resztkowego, sygnału w paśmie częstotliwości

0÷6kHz oraz sygnału w paśmie częstotliwości  $\frac{1}{2} f_z \div \frac{3}{4} f_z$ . Za najbardziej efektywne z przebadanych miar autorzy [11] uznali między innymi kurtozę uzyskaną na podstawie sygnału resztkowego, dyskryminantę *FM4* oraz współczynnik szczytu.

Porównując wyniki przedstawione na rys. 18 z przedstawionymi w [11] można było zauważyć, iż w przypadku przekładni z zerowymi odchyłkami wykonania kół charakter zmian zaproponowanej miary  $M_{wWV}$  oraz kurtozy i dyskryminanty NA4 był zbliżony i wnioskowanie diagnostyczne na ich podstawie jest stosunkowo łatwe. W przypadku wystapienia sumarycznych odchyłek wykonania kół zebatych wynoszących 1,6 ugięcia statycznego pary zębów (Q=2,57 MPa) na podstawie zmian kurtozy i dyskryminanty FM4 można było jednoznacznie wykryć zmniejszenie sztywności zazebienia wynoszace dopiero około 60% natomiast na podstawie zaproponowanej miary  $M_{wWV}$  możliwe jest wykrycie dużo mniejszego spadku sztywności za zebienia wynoszącego 30% (wzrost  $M_{wWV}$ o 50%).

W celu zweryfikowania zaproponowanej metody wykrywania uszkodzeń kół zębatych przeprowadzono na stanowisku nr 1 badania przekładni z podciętym zęba koła (rys. 19) symulującym pęknięcie u podstawy zęba na całej szerokości koła.





Na podstawie wniosków uzyskanych z badań mających na celu wykrywanie wykruszenia zęba w tym przypadku dokonywano pomiarów prędkości drgań poprzecznych wirujących wałów przekładni w kierunku działania siły międzyzębnej oraz pionowym. w kierunku Wykrycie pęknięcia wynoszącego 1 mm na podstawie rozkładu czasowoczęstotliwościowego WV sygnału różnicowego było trudne, ponieważ wystepowały w nim także inne lokalne maksima nie pochodzace od pęknięcia zęba koła. Na rys. 20 przedstawiono rozkład WV wykonany na podstawie sygnału różnicowego w przypadku podcięcia zęba u podstawy wynoszącego 2,9 mm. Widoczny jest wzrost amplitud składowych częstotliwości w zakresie kąta obrotu wału odpowiadającego współpracy uszkodzonego zęba. Można zauważyć również modulację częstotliwości zazębienia i obrotowych koła -2: $f_z$ +3: $f_{o2}$ ≈1518 Hz.



Rys. 20. Rozkład czasowo-częstotliwościowy WV sygnału różnicowego; pomiar w kierunku działania siły miedzyzębnej; – podcięcie zęba 2,9 mm, Q=3,84 Mpa

W pracy [29] symulowano zmęczeniowe pękniecie u podstawy zęba, ale uwzględniano jedynie losowe odchyłki podziałki zasadniczej natomiast nie uwzględniano jej składowej okresowej wywołanej np. odchyłką promienia okręgu zasadniczego. Na rys. 21 przedstawiono wpływ znaków odchyłek okresowych (f<sub>znak</sub>) na zaproponowana miarę  $M_{wWV}$  w przypadku symulacji pęknięcia u podstawy zęba koła. Zastosowano odchyłki następujące wvkonania kół:  $f_1 = f_{znak1} \cdot 14 \ \mu\text{m}, f_2 = f_{znak2} \cdot 10 \ \mu\text{m}, s_{1max} = s_{2max} = \pm 9,6 \ \mu\text{m}.$ 



Rys. 21. Wpływ znaków okresowych odchyłek wykonania kół zębatych na miarę  $M_{wWV}$ ; pomiar w kierunku działania siły międzyzębnej; Q=2,57 MPa;  $f_{ol}\approx45$  Hz

Okazało się, że na możliwość wykrywania pęknięcia u podstawy zęba wpływ mają nie tylko odchyłki losowe podziałki, ale również odchyłki okresowe, a nawet ich znaki. Na rys. 22a przedstawiono wpływ częstotliwości obrotowej  $M_{wWV}$ zebnika zmiany spowodowane na symulowanym pęknięciem u podstawy zęba koła w przypadku najbardziej niekorzystnego układu znaków okresowych odchyłek wykonania kół:  $s_{1max} = s_{2max} = \pm 4.8 \ \mu m.$  $f_2 = +5 \, \mu m$  $f_1 = -7 \,\mu m$ Natomiast na rysunku 22b przedstawiono wpływ obciażenia jednostkowego przekładni na zmiany w przypadku przekładni  $M_{wWV}$ pracy z częstotliwością obrotową zębnika fol~45 Hz i odchyłek wykonania kół o tych samych znakach, ale wartościach dwukrotnie większych.

Przeprowadzone badania wykazały przydatność miary  $M_{wWV}$  również do wykrywania pęknięcia

podstawy zęba oraz pozwoliły określić wpływ poszczególnych czynników na możliwość wykrywania tego uszkodzenia.



Rys. 22. Wpływ częstotliwości obrotowej zębnika na miarę  $M_{wWV}$  uzyskaną na podstawie sygnału różnicowego prędkości drgań wału koła - Q=2,57 MPa (a), wpływ obciążenia jednostkowego przekładni na miarę MwWV (b)

Najwcześniej można wykryć pęknięcie podstawy zęba w przypadku przekładni pracujących przy wyższych obciążeniach jednostkowych wykonanych z małymi odchyłkami losowymi podziałki oraz odpowiednim układem znaków odchyłek okresowych [37]. Wnioski te potwierdzono również w przypadku symulacji pracy innych przekładni, których czołowa liczba przyporu była wyższa, a liczby zębów zębnika i koła były względem siebie liczbami pierwszymi.

Do wykrywania pęknięcia zęba u podstawy zastosowano także miarę  $M_w$  bazującą na ciągłej zespolonej transformacie falkowej. W przypadku wykrywania pęknięcia zęba koła okazało się, że należy nieznacznie zawęzić (w stosunku do stosowanego podczas wykrywania wykruszenia wierzchołka zębnika) przedział skali, w którym zgodnie z zależnością 7 dokonywano sumowania modułów współczynników CCWT. Przedziały te wynosiły odpowiednio: Gaus 2 - 1+17; Gaus 4 -1÷20; Shannon 2 3,0 - 15÷53. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, iż miara  $M_{w}$ jest najbardziej czuła na zmniejszenie sztywności (spowodowane peknieciem zeba) w przypadku zastosowania falki Shannon 2 3.0.

Obie zaproponowane miary ( $M_w$  i  $M_{wWV}$ ) prowadzą do zbliżonych wniosków diagnostycznych jednakże miara  $M_{wWV}$  jest nieco bardziej wrażliwa na wczesne stadia rozwoju pęknięcia zęba u podstawy.

#### 5.4. Wykrywanie częściowego wyłamania zęba kół o zazębieniu skośnym

Pęknięcie u podstawy zęba prowadzi do jego wyłamania. W przypadku przekładni o zębach skośnych bardzo często występuje częściowe wyłamanie zęba. Celem sprawdzenia przydatności zastosowanych metod do wykrywania tego typu uszkodzenia przeprowadzono badania doświadczalne i symulacyjne. Obiektem badań empirycznych była przekładnia badana stanowiska nr 2, w której zamontowany był komplet kół nr 1. Zamodelowano częściowe wyłamanie zęba zębnika (rys. 23).



Rys. 23. Uszkodzenie zęba zębnika

Do wykrywania tego uszkodzenia zastosowano metody przetwarzania sygnału zaproponowane wcześniej bazujące na sygnale różnicowym i transformacie falkowej oraz sygnale różnicowym i rozkładzie *WV*. Efekty spowodowane uszkodzeniem są najlepiej widoczne w postaci wzrostu, wartości sumy  $S_{WV}(\phi)$  w zakresie kąta obrotu wału 200÷225° zarówno w przypadku pracy przekładni z częstotliwością obrotową wału zębnika wynoszącą 46,71 Hz jak i  $f_{ol}$ =24,67 Hz (rys. 24).





Do analizy sygnału różnicowego stosowano także trzy falki zespolone Gaus 2, Gaus 4, Shannon 2 3,0, ponieważ pozwalały one wykryć najwcześniej uszkodzenia kół zębatych opisane w poprzednich rozdziałach. Okazało sie jednak, przypadku, w celu wykrycia że tvm w uszkodzenia należało nieco skorygować przedział współczynników (A÷B) skali w którym dokonywano sumowania współczynników CCWT. Efekty spowodowane uszkodzeniem zębnika najłatwiej można było zaobserwować w sumie współczynników CCWT stosując falkę bazową Shannon 2 3,0 gdy A=5, B=42. W przypadku falek bazowych Gaus 2 i Gaus 4 stosowano A=1, B=10. Dalsze badania prowadzono wykorzystując

zidentyfikowany model dynamiczny przekładni zębatej w układzie napędowym. Przeprowadzono symulacje częściowego wyłamania zęba zębnika o zazębieniu skośnym, w przypadku zastosowania w przekładni kompletu kół nr 1. Szerokość zazębienia wynosiła 56 mm, symulowano częściowe wyłamanie zęba wynoszące 15,5, 28 i 43,5 mm. Na rysunku 25 przedstawiono wpływ obciażenia natomiast na rys. 26 przedstawiono wpływ częstotliwości obrotowej wału na miarę  $M_w$  bazującą na WV i CCWT z wykorzystaniem wymienionych wyżej trzech falek bazowych w przypadku występowania następujących odchyłek wykonania kół zębatych:  $f_1=9 \,\mu\text{m}, f_2=6 \,\mu\text{m}, s_{1max}=s_{2max}=\pm 9,6 \,\mu\text{m}.$ obciążeniach jednostkowych wyższych Przv przekładni większa była dynamika wzrostu miary spowodowana częściowym wyłamaniem zeba. Gdy symulowane wyłamanie zęba wynosiło 28 mm większy był względny wzrost miary bazującej na rozkładzie WV w przypadku niższej prędkości obrotowej zębnika (rys. 25a) ale w przypadku większego wyłamania zęba wynoszącego 43,5 mm procentowy wzrost tej miary na skutek uszkodzenia podobnie jak miary bazującej na CCWT był większy w przypadku wyższej prędkości obrotowej zębnika.



Rys. 25. Wpływ obciążenia jednostkowego przekładni na miarę M<sub>w</sub> uzyskaną na podstawie: a) rozkładu WV, b) CCWT i falki Shannon 2 3,0



Rys. 26. Wpływ częstotliwości obrotowej zębnika na miarę M<sub>w</sub> uzyskaną na podstawie: a) rozkładu WV, b) CCWT i falki Shannon 2 3,0

W celu analizy zachodzących zjawisk najpierw rozważano przekładnię, której odchyłki wykonania są zerowe i nie ma wyłamania zęba. W sytuacji przedstawionej na rysunku 27a w przyporze były aż trzy pary zębów, ponieważ poskokowa liczba przyporu  $\varepsilon_{\beta}$ =1,318; czołowa liczba przyporu  $\varepsilon_{\alpha}$ =1,33 a całkowita liczba przyporu  $\varepsilon_{c}$ =2,648.

Jeżeli wystąpiło wyłamanie wynoszące 15,5 mm (pozostałą cześć zęba zaznaczono kolorem czerwonym) to tuż po wejściu w przypór uszkodzonego zęba (rys. 27b) pomimo wystąpienia uszkodzenia obciążenie przenoszą jeszcze trzy pary zębów. Nawet, gdy wyłamanie zęba wynosiło 28 mm praktycznie wyjściu z przyporu nieuszkodzonego zęba nr 1 (rys. 27b) towarzyszyło wejście w przypór uszkodzonego zęba, zatem obciążenie w tej sytuacji przenoszone jest przez minimum dwie pary zębów (zaznaczono to niebieskim kółkiem), ponieważ  $\varepsilon_{\beta} = 0,659, \varepsilon_{\alpha} = 1,33, \varepsilon_{c} = 1,989.$ 



Rys. 27. Położenie linii zęba na płaszczyźnie przyporu kół o zębach śrubowych a) brak uszkodzeń kół, b) częściowe wyłamanie zęba

Dlatego w tym przypadku wykrycie włamania zęba było możliwe tylko, gdy stosowano wysokie obciążenie jednostkowe przekładni (rys. 25). Wyłamanie zęba powyżej 28 mm powoduje spadek  $\varepsilon_c$  poniżej wartości 2 i wtedy uszkodzenie to jest już łatwiejsze do wykrycia.

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz można stwierdzić, że przy użyciu zaproponowanej miary możliwe jest wykrycie metodami drganiowymi cześciowego wyłamania zęba także w przypadku zazębienia skośnego o wysokiej całkowitej liczbie przyporu. Wykrycie tego typu uszkodzenia zęba jest łatwiejsze w przypadku występowania wyższych obciążeń jednostkowych przekładni, które są obecnie powszechnie stosowane w przekładniach zębatych minimalizację mas ze względu wirujących i dostępność wysokiej jakości materiałów konstrukcyjnych.

# 5.5. Wykrywanie pittingu na powierzchniach roboczych zębów

Obiektem badań była przekładnia zębata stanowiska nr 2, w której zamontowany był komplet kół nr 2. Częstotliwość obrotowa wału zębnika wynosiła około 47 Hz natomiast moment obciążenia przekładni podczas rejestrowania prędkości drgań wałów w kierunku siły międzyzębnej wynosił  $M_h$ =309 Nm.

Pojawienie się jamek pittingowych na powierzchniach roboczych zębów powoduje zmniejszenie rzeczywistej powierzchni styku zebów zaburzenia pracy przekładni, oraz w a w konsekwencji wyłamanie zęba. Z tego powodu ważne jest wykrywanie początkowych stadiów zjawiska pittingu. Proces rozwoju uszkodzeń kół wywołuje wzrost zjawisk nieliniowych oraz efektów niestacjonarnych, które trudno wykrywa się za pomocą klasycznej analizy Fouriera. Z tego względu podobnie jak w poprzednich rozdziałach do analizy zastosowano sygnałów metody czasowo-Z dotychczasowych czestotliwościowe. badań wvnika. że charakterystyczne cechy sygnału diagnostycznego można wyodrębnić na podstawie jego rozwiniecia dwuliniowego w postaci rozkładu energii na płaszczyźnie czasowo-częstotliwościowej.

Sygnały zarejestrowane w kilku seriach pomiarowych podczas narastania procesów zużyciowych analizowano wykorzystując transformacje pseudo Wignera-Ville'a (WV)w paśmie od 0 do  $0.9f_z$ . Ilościowe i jakościowe zmiany rozkładów WV wskazywały na wzrost niestacjonarnych zaburzeń sygnałów drganiowych wywołanych rozwijającym się pittingiem. Wzrost ten jest jeszcze bardziej widoczny w przebiegach czasowych zmian sum dyskretnych wartości amplitud rozkładu WV wyznaczanych w przedziale częstotliwości od 0 do  $0.9 f_z$  i przedstawionych na rysunku 28.



Rys. 28. Zmiany sum dyskretnych wartości amplitud rozkładu WV wyznaczanych w przedziale częstotliwości od 0 do 0,9 f<sub>z</sub>; seria 1 - koła bez uszkodzeń; seria 3 – zaawansowany pitting na powierzchniach roboczych zębów

Do analizy zarejestrowanych sygnałów zastosowano ciągłą transformatę falkową (CWT) i falkę Morleta oraz ciągłą zespoloną transformatę falkową (CCWT) i falki: Morlet 1 1,0; Morlet 1 1,5; Gaus 2; Gaus 4; Shannon 2 3,0. Na rys. 29a przedstawiono w funkcji obrotu wału koła wyniki analizy CWT z zastosowaniem falki Morleta, w przypadku przekładni nieuszkodzonej. Wraz z rozwojem pittingu wyraźnie rosną wartości współczynników rozkładu CWT w przedziale 150÷350 współczynników skali (rys. 29b).



Rys. 29. Wyniki analizy CWT: a) pierwsza seria pomiarowa (koła bez uszkodzeń); b) w trzeciej serii pomiarowej

W niniejszej pracy jako miarę przyjęto sumę modułów wartości współczynników  $C(l,k,\psi)$ obliczaną z zależności 11 w określonym powyżej przedziale współczynników skali i w okresie jednego obrotu wału koła.

$$SCWTp = \sum_{l=A}^{B} \sum_{k=l}^{K_{pr}} |C(l,k,\psi)|$$
(11)

gdzie:

A=150, B=350,  $K_{pr}=$  liczba okresów próbkowania przypadających na obrót wału.

Zaproponowaną miarę obliczono również na podstawie ciągłej zespolonej transformaty falkowej (CCWT) w przypadku zastosowania różnych falek bazowych, których moduły sumowano w przedziale A÷B przedstawionym w tablicy 2.

Tablica 2. Przedział współczynników skali (A÷B), w którym sumowano |C| w przypadku zastosowania CCWT do wykrywania pittingu

J J I				
Nazwa falki bazowej:	A	в	Oznaczenie przyjętej miary	
Morlet 1 1,0	150	350	SCCWT <sub>p</sub> _M10	
Morlet 1 1,5	280	450	SCCWT <sub>p</sub> _M15	
Gaus 2	50	250	SCCWT <sub>p</sub> _G2	
Gaus 4	80	220	SCCWT <sub>p</sub> _G4	
Shannon 2 3,0	300	512	SCCWT <sub>p</sub> _Sh	

Ponadto dokonano sumowania dyskretnych wartości amplitud rozkładu WV w przedziale częstotliwości od 0 do 0,9  $f_z$  i w okresie obrotu koła  $T_{o2} = 0,033$  [s]. Zmiany wartości tak otrzymanej sumy oznaczonej jako  $SWV_p$  są czułe na rozwój pittingu powierzchni roboczych zębów kół.

Określono również wartości następujących dyskryminant bezwymiarowych takich jak: *FM4*, *NA4*, [10, 22, 31], a w także *M6A*, *M8A*, które zostały zaproponowane w pracy [23] a są szczególnie zalecane do wykrywania uszkodzeń powierzchni elementów przekładni zębatych [23, 25, 34].

Obliczono je z sygnałów resztkowych i różnicowych w przedziale częstotliwości od 0 do 5 kHz.

Zestawienie wartości dyskryminant bezwymiarowych oraz zaproponowanych wyżej wskaźników zużycia pittingowego przedstawiono na rys. 30.



Rys. 30. Zestawienie wartości dyskryminant bezwymiarowych oraz zaproponowanych wskaźników zużycia pittingowego

Na podstawie analizy wyników badań stwierdzono, że największą dynamiką wzrostu wartości w miarę narastania zużycia pittingowego charakteryzują się zaproponowane wskaźniki bazujące na ciągłej zespolonej transformacie falkowej i falkach Morleta i Gaus4 oraz na ciągłej transformacie falkowej i falce Morleta, a także na pseudo rozkładzie WV w paśmie od 0 do 0,9  $f_z$ . Wskaźniki te są bardzo czułe na rozwój uszkodzeń powierzchni roboczych kół zębatych.

#### 6. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz [39] można sformułować następujące wnioski:

- Do wykrywania wczesnych stadiów różnych uszkodzeń kół zębatych takich jak: pęknięcie u podstawy zęba oraz częściowe wykruszenie i wyłamanie zęba oraz pitting użyteczny jest sygnał prędkości drgań poprzecznych wałów zmierzony w kierunku działania siły międzyzębnej.
- Opracowana metoda uśredniania sygnałów drganiowych polegająca na obliczeniowej korekcie położenia impulsu synchronizującego zapewnia zachowanie pożądanej informacji diagnostycznej.

- Użycie rozbudowanego zidentyfikowanego modelu dynamicznego przekładni zębatej w układzie napędowym do symulacji uszkodzeń jej elementów umożliwia pozyskanie wiarygodnych relacji diagnostycznych służących do poszerzenia bazy wiedzy.
- Zastosowanie miar bazujących na sygnale różnicowym i ciągłej zespolonej transformacie falkowej - M<sub>w</sub> lub sygnale różnicowym i pseudo rozkładzie Wignera Ville'a - M<sub>wWV</sub>, umożliwia efektywne wykrywanie różnych lokalnych uszkodzeń kół zębatych.
- Zmniejszenie wartości odchyłek wykonania kół zębatych powoduje, iż wartości proponowanych miar zaczynają wzrastać przy mniejszym stopniu zaawansowania uszkodzenia, a dynamika tego wzrostu jest większa.
- Zaproponowana miara SCCWTp charakteryzująca rozwój pittingu będąca sumą modułów wartości współczynników CWT wyznaczana w wybranym przedziale współczynników skali i w okresie obrotu wału, jest wrażliwa na rozwój uszkodzeń pittingowych.

Obecnie w przekładniach zębatych ze względu na minimalizację mas wirujących i dostepność wysokiej jakości materiałów konstrukcyjnych stosuje się wyższe obciążenia jednostkowe kół. W procesie wytwarzania kół zębatych uzyskuje się również mniejsze wartości odchyłek ich wykonania. powodów przedstawione Ζ tych sposoby wykrywania uszkodzeń kół zębatych wydają się mieć istotne znaczenie w diagnostyce przekładni zębatych.

## LITERATURA

- Batko W., Mikulski A.: Zastosowanie metod falkowych w systemach monitoringu wibroakustycznego łożyskowania urządzenia wyciągowego. Diagnostyka vol. 26, 2002, s. 7÷12.
- [2] Cempel Cz.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. PWN, Warszawa, 1989.
- [3] Dalpiaz G., Rivola A., Rubini R.: Dynamic Modeling of Gear System for Condition Monitoring and Diagnostics. Kongres Diagnostyki Technicznej, Gdańsk, 1996, (2), s. 185÷192.
- [4] Dalpiaz G., Rivola A., Rubini R.: Gear Fault Monitoring – Comparison of Vibration Analysis Techniques. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Acoustical and Vibratory surveillance and Diagnostic Techniques, 13-15/10/1998, Senlis, France, s. 623÷637.
- [5] Dąbrowski Z., Radkowski S., Wilk A.: Dynamika przekładni zębatych – Badania i symulacja w projektowaniu eksploatacyjnie zorientowanym. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu Warszawa – Katowice – Radom 2000.
- [6] Decker H. J.: Effects on Diagnostic Parameter After Removing Additional Synchronous Gear Meshes. NASA/TM – 2003 – 212312 ARL- TR – 2933; 2003 r.

- [7] Decker H. J.: Gear Crack Detection Using Tooth Analysis. NASA/TM – 2002 – 211491 ARL- TR – 2681; 2002 r.
- [8] Grabill P., Berry J., Grant L., Porter J.: Automated Helicopter Vibration Diagnostics for the US Army and National Guard. 57th Annual Forum of the American Helicopter Society, Washington, DC, May 9÷11, 2001.
- [9] Howard J., Jia S., Wang J.: The Dynamic Modeling of a Spur Gear in Mesh Including Friction and a Crack. Mechanical Systems and Signal Processing, 15(5), 2001, s. 831÷853.
- [10] James Li C., Limmer J. D.: Model Based Condition Index for Tracking Gear Wear and Fatigue Damage, Wear, vol. 241 (1), 2000, s. 26÷32.
- [11] Łazarz B., Madej H., Czech P.: Miary statystyczne jako dane wejściowe dla sztucznych sieci neuronowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej – s. Transport z. 48, Gliwice 2003 r., s. 113÷120.
- [12] Łazarz B., Wojnar G.: Bezkontaktowe pomiary laserowe drgań w diagnostyce wibroakustycznej. XI Sympozjum Naukowe "Nowe technologie i materiały w metalurgii i inżynierii materiałowej", Katowice, 16.05.2003
- [13] Łazarz B., Wojnar G.: Detection of Early Stages of Pinion Tooth Chipping in Transmission Gear. Machine Dynamics Problems 2003,vol. 27, No 3, s. 23÷34.
- [14] Łazarz B., Wojnar G.: Diagnozowanie lokalnych uszkodzeń lożysk tocznych w przekładni zębatej. Materiały XXX Jubileuszowego Ogólnopolskiego Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka 03.03 ÷ 08.03.2003 r.
- [15] Łazarz B., Wojnar G.: Identyfikacja strat mocy w przekładni zębatej walcowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej – s. Transport z. 43, Gliwice 2001 r., s. 143÷152.
- [16] Łazarz B., Wojnar G.: Model dynamiczny układu napędowego z przekładnią zębatą. XVII Ogólnopolska Konferencja PRZEKŁADNIE ZĘBATE, Węgierska Górka 09.10 ÷ 11.10.2000 r., s. 101÷108.
- [17] Łazarz B., Wojnar G.: Modelowanie lokalnych uszkodzeń lożysk tocznych w przekładni zębatej do celów diagnostycznych. Materiały V Krajowej Konferencji "Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów" DIAG' 2003, 13÷17.10.2003.
- [18] Łazarz B., Wojnar G.: Modelowanie przekładni zębatych w układzie napędowym do celów diagnostycznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej – s. Transport z. 44, Gliwice 2002 r., s. 127÷134.
- [19] Łazarz B., Wojnar G.: Uśrednianie sygnału drganiowego przekładni zębatej z wykorzystaniem różnych metod estymacji opóźnienia czasowego. Materiały XXXI Ogólnopolskiego Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka 01.03 ÷ 06.03.2004 r.

- [20] Łazarz B.: Zidentyfikowany model dynamiczny przekładni zębatej w układzie napędowym jako podstawa projektowania. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu, K-ce-Radom 2001.
- [21] Madej H., Czech P., Konieczny Ł.: Wykorzystanie dyskryminant bezwymiarowych w diagnostyce przekładni zębatych. Diagnostyka, vol. 28, 2003, s. 17÷22.
- [22] Madej H., Czech P., Konieczny Ł.: Zastosowanie dyskryminant bezwymiarowych w diagnostyce przekładni zębatych. XXX Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka 2003.
- [23] Martin H. R.: Statistical Moment Analysis as a Means of Surface Damage Detection. Proceedings of 7<sup>th</sup> International Modal Analysis conferences, Society for Experimental Mechanics, Schenectady, N. Y., 1989.
- [24] Misiti M., Misiti Y., Oppenheim G., Poggi J. M.: Wavelet Toolbox for Use with Matlab. Version 2, Copyright 2000 by The Math Works, Inc.
- [25] Mosher M., Pryor A. H., Huff E. M.: Evaluation of Standard Gear Metrics in Helicopter Flight Operation. 56th Mechanical Failure Prevention Technology Conference, Virginia Beach USA 2002.
- [26] Müller L.: *Przekładnie zębate obliczenia* wytrzymałościowe. WNT, Warszawa 1972.
- [27] Paya B. A., Esat I. I., Badi M. N. M.: Artificial Neural Network Based Fault Diagnostics of Rotating Machinery Using Wavelet Transforms as a Preprocessor. Mechanical Systems and Signal Processing. 11,1997, s. 751÷765.
- [28] Radkowski S.: Low-Energy Components of Vibroacustics Signal as the Basis for Diagnosis of Defect Formation. Machine Dynamics Problems vol. 12, 1995.
- [29] Radkowski S.: Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych, Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu W-wa- Radom 2002.
- [30] Staszewski W. J., Tomlinson G. R. Local Tooth Fault Detection in Gearboxes Using a Moving Window. MSSP 1997, 11(3), s. 331÷350.
- [31] Stewart R. M.: Some Useful Data Analysis Techniques For Gearbox Diagnostics. Report MHM/R/10/77, Machine Health Monitoring Group, Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton 1977.
- [32] Swami A., Mendel J. M., Nikias Ch. L.: *Higher-Order Spectral Analysis Toolbox*. Copyright by The Math Works, Inc, wydanie trzecie 1998.
- [33] Tomaszewski J., Osiński J.: Współczynnik energetyczny w diagnostyce przekładni zębatych. Kongres Diagnostyki Technicznej, Gdańsk, 1996, (3), s. 301÷307.
- [34] Wilk A., Łazarz B., Madej H., Wojnar G.: Analiza zmian wibroakustycznych symptomów diagnostycznych w procesach zużyciowych kół zębatych. Materiały XXX Jubileuszowego

Ogólnopolskiego Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka, 2003.

- [35] Wilk A., Łazarz B., Madej H., Wojnar G.: Metody wczesnego wykrywania lokalnych uszkodzeń kół zębatych. XXIX Ogólnopolskie Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka04.03 ÷ 09.03.2002 r., s. 345÷354.
- [36] Wilk A., Łazarz B., Madej H.: Metody wczesnego wykrywania uszkodzeń w przekładniach zębatych. Przegląd Mechaniczny, nr 3, 2002, s. 14÷18.
- [37] Wilk A., Łazarz B., Madej H.: The Application of Wavelet Analysis in the Diagnosis of Toothed Wheels Damages, Proceed. INTERNOISE '99, USA, s. 933÷938.
- [38] Wojnar G.: Model dynamiczny układu napędowego złożonego z silnika asynchronicznego, przekładni zębatej oraz maszyny roboczej. Praca magisterska. Politechnika Śląska. Katowice 2000.
- [39] Wojnar G.: Wykrywanie uszkodzeń kół zęba-tych wybranymi metodami przetwarzania sygnałów drganiowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska 2004 r.
- [40] Zakrajsek, J. J.; Handschuh, R. F.; and Decker, H. J.: Application of Fault Detection Techniques to Spiral Bevel Gear Fatigue Data. Proceedings of the 48th Meeting of the Mechanical Failures Prevention Group. Office of Naval Research, Arlington, VA., 1994, s. 93÷104.
- [41] Zawisza M.: Wykorzystanie informacji zawartych w sygnale wibroakustycznym do oceny prawdopodobieństwa wystąpienia awarii w przekładni zębatej. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska 2003.



Dr inż. Grzegorz WOJNAR obecnie jest adiunktem na Wydziale Transportu Politechniki Śląskiej. Specjalizuje się w zakresie modelowania procesów dynamicznych, projektowania maszyn oraz metod przetwarzania sygnałów.



Dr hab. inż. Bogusław ŁAZARZ jest profesorem nzw. w Katedrze Budowy Pojazdów Samochodowych Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej. Specjalizuje się w zakresie diagnostyki wibroakustycznej przekładni projektowania układów przeniesienia napędu z przekładnią zębatą oraz

metod przetwarzania sygnałów. Członek Sekcji Podstaw Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn PAN.

Część wyników prezentowanych w pracy uzyskano w ramach realizacji grantu numer 5T07B02425

# SKANER BEZPIECZEŃSTWA JAKO NARZĘDZIE DIAGNOSTYCZNE

Dariusz LASKOWSKI, Ireneusz KRYSOWATY, Paweł NIEDZIEJKO

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Telekomunikacji 00-908 Warszawa, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, tel.: (+48)(22) 683 73 53, fax: (+48)(22) 683 90 38, email: dlaskowski / ikrysowaty / pniedziejko @wset.edu.pl

#### Streszczenie

i utrzvmanie zadanego poziomu Identvfikacia stanu bezpieczeństwa systemu teleinformatycznego (ang. network) jest jednym z najważniejszych elementem polityki bezpieczeństwa (ang. security policy). Wymaga ono od osób odpowiedzialnych za zapewnienie bezpieczeństwa oprócz stosowania narzędzi ochrony (tj. zapory ogniowe, systemy wykrywania włamań i antywirusowe oraz systemy kontroli treści) również nieustannego nadzorowania i analizowania zjawisk zachodzących w systemie. W celu uzyskania wiarygodnych informacji diagnostycznych wykorzystuje się dedykowane oprogramowanie (skanery bezpieczeństwa) czasu rzeczywistego. Ułatwia ono wykrycie potencjalnych luk w zabezpieczeniach systemu oraz zawiera mechanizmy ich naprawy. Uwzględniając ważność i aktualność oraz wieloaspektowość problemu bezpieczeństwa, dokonano przeglądu darmowych narzędzi (ang. Open Source) stosowanych do technicznego audytu bezpieczeństwa systemu.

Słowa kluczowe: system teleinformatyczny, bezpieczeństwo, diagnostyka komputerowa, narzędzia diagnostyczne.

#### SECURITY SCANNERS AS DIAGNOSTIC TOOL

#### Summary

Identification and maintenance established network security level is one of the most important security policy elements. It is requires from people responsible for security assurance apart using security tools (e.g. firewalls, intrusion detection and antivirus systems and content control systems) also continuous monitoring and analyzing phenomena occurring in the system. Dedicated real-time software (security scanners) is developed to get reliable diagnostic information. That software facilitates potential gaps in the system's protection as well as concerns repair mechanisms. Review of the open source tools was made taking into consideration importance and topicality as well as multiaspect of the security problem. Open source tools are used for technical security audit.

Keywords: network, security, computer diagnostic, diagnostic tool.

#### WSTĘP

Skanery bezpieczeństwa, nazywane również programami audytu bezpieczeństwa, ze względu na posiadane właściwości wykorzystywane są zarówno przez dostawcę usług sieciowych (oficera bezpieczeństwa lub administratora systemu) jak i przez nieupoważnione osoby<sup>1</sup>. Te dwa podzbiory osób mają na celu pozyskanie informacji, o występujących w systemie teleinformatycznym (*STI*) lukach, dla odmiennych celów.

Problem wykorzystania narzędzi bezpieczeństwa jest złożony, dlatego też obecnie oferowane są różnego rodzaju oprogramowania rozwijane przez destruktorów. Kolejnym etapem w procesie ewolucji skanerów bezpieczeństwa jest ciągłe adoptowanie ich do potrzeb osób odpowiedzialnych za bezpieczeństwo sieciowe. Istnieją również sporadyczne przypadki wystąpienia procesu odwrotnego, czyli skanery napisane pod kątem zapewnienia bezpieczeństwa *STI*, ze względu na swoją funkcjonalność i prostotę są używane przez włamywaczy komputerowych. Praktycznie skanery bezpieczeństwa możemy podzielić z uwzględnieniem wielu kryteriów, jednym z nich mogą być koszty:

- narzędzia komercyjne są drogie i dostępne dla nielicznej grupy użytkowników (banki, instytucje rządowe),
- narzędzia dostępne na zasadach Open Source posiadają przyjazny dla użytkownika interfejs graficzny umożliwiający i można uzyskać bezpłatnie.

Wykorzystanie pojedynczych narzędzi audytu sposób bezpieczeństwa przypadkowy w i nieprzemyślany nie daje gwarancji uzyskania wiarygodnej informacji w postaci raportu o lukach w zabezpieczeniach i możliwościach włamania. Skuteczność działań polityki bezpieczeństwa występuje przy zastosowaniu testów penetracyjnych na podstawie, których odwzorowuje się w dość jednoznaczny sposób typowe postępowanie

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Rozumiane jako destruktor, włamywacz komputerowy, hacker, cracker.

destruktorów<sup>2</sup>. Najbardziej uogólniony schemat realizacji działania hacker'ów zakłada istnienie następujących etapów:

- przygotowanie ataku: rozpoznanie, identyfikacja podatności, przygotowanie odpowiednich narzędzi,
- atak właściwy: wykorzystanie zidentyfikowanych podatności, uzyskanie dostępu do zasobów, ich kradzież, modyfikacja lub zniszczenie, ewentualne pozostawienie ukrytego wejścia,
- zatarcie śladów nieuprawnionej działalności.

Najistotniejsze znaczenie ma etap przygotowania ataku, czyli rozpoznania badanego (atakowanego) systemu oraz samo przygotowanie (wybór) odpowiednich narzędzi dających duże prawdopodobieństwo powodzenia ataku.

## 1. SKANERY SIECIOWE I SYSTEMOWE

Dla administratora systemu najgroźniejsze są włamania odnajdywane i rozpoznawane z dużym późnieniem, w których występuje kradzież danych. Dla licznego grona organizacji (ubezpieczeniowych, finansowych, itp.) o wiele bardziej korzystne jest utracenie danych, możliwych w pewnym stopniu do odzyskania z kopii bezpieczeństwa, niż możliwość ich wykorzystania przez konkurencję. Dlatego bezpieczeństwo *STI* od strony sieci jest niezwykle istotnym problemem. Przez punkty dostępu do *STI* (a zwłaszcza lokalną sieć komputerową) można do atakowanego systemu dostać się wykorzystując trzy podstawowe techniki:

- poprzez podsłuch (ang. *sniffer*),
- poprzez użycie skanera (ang. scanning),
- przy pomocy podszywania (ang. spoofing).

Z obserwacji praktycznych zjawisk sieciowych, pierwszym popularnym i groźnym działaniem jest uruchamianie skanera automatycznie wyszukującego luki w systemie. Programy tego typu dzieli się je na dwie kategorie:

- skanery systemowe badają stację lokalną (ang. host), poszukując luk w wynikających z przeoczeń, drobnych błędów w administracji, konfiguracji, przykładem skanera dla Linux'a jest Computer Oracle and Password System,
- skanery sieciowe testuje stację lokalną przez łącza sieciowe w zakresie dostępności usług i portów, poszukując potencjalnych luk do przeprowadzenia ataku, przykładem skanera jest *Internet Security Scanner*.

Skaner wysyła zapytania do portów serwera i zapisuje odpowiedź od niego otrzymaną. Gromadzi on cenne informacje na temat wybranego serwera. Wymagania systemowe skanerów to:

- duży rozmiar pamięci operacyjnej RAM,
- posiadanie odpowiednich bibliotek oraz usług przez platformę systemową,
- połączenie z zasobami sieci.

Przed skanerem nie da się ukryć zasobów systemowych w procesie diagnozowania, ponieważ skaner ujawnia większość słabych punktów systemu, wspomaga proces utrzymania i przywracania stanu zdatności przez kontrolę bezpieczeństwa oraz jest ważnym narzędziem służącym zabezpieczeniu sieci.

Do obserwacja funkcjonowania skanerów służą następujące programami:

- *courtney* to skrypt napisany w Perl'u, który w połączeniu z *tcpdump* wykrywa procesy skanowania realizowane przez *SATAN'a* i *SAINT'a*,
- *IcmpInfo* wykrywa podejrzane działania (skanowanie, bombardowanie, itp.) z wykorzystaniem ICMP,
- scan-detector wykrywa skanowanie TCP/ UDP,
- *portSentry* zaawansowane narzędzie rozpoznające atak i próbę jego zablokowania.

Wypracowanie skutecznej metody ochrony przed szkodliwymi skutkami oddziaływania destruktora jest realizowane poprzez dokładną analizę zastosowanego narzędzia. Dlatego też administratorzy *STI* z reguły rozpoczynają badania efektywności postawionych zapór przez stosowanie tych samych narzędzi, które używane są przez hackerów.

Legalność skanerów sieciowych to temat dyskusyjny. Niektórzy uważają, że przeczesywanie systemu to naruszenie prywatności. Inni stoją na stanowisku, że uruchamiając serwer w Internecie wyraża się przynajmniej domniemaną zgodę na skanowanie.

W końcu adres sieciowy można porównać do numeru telefonicznego, a ten każdy ma prawo wybrać. Przepisy prawne nie regulują jeszcze tej kwestii, więc według prawa programy skanujące nie są nielegalne. Jednak dla administratorów sieci każde wykorzystanie takich aplikacji przez osoby z zewnątrz jest działaniem nielegalnym.

Przykładowym narzędziem analizy stopnia zabezpieczenia sieci jest hacker "z referencjami". Znane są organizacje zatrudniające takich ludzi i skłonne ponosić duże nakłady finansowe za obronę sieci przed atakami innych hacker'ów. Posiadający odpowiedni zasób wiadomości hacker wie, co jest aktualnie "na topie", jak to wykorzystać i jak się przed tym bronić. Problem polega jedynie na tym jak odróżnić hackera "z referencjami" od przestępcy.

Chyba najbardziej popularnym i jednocześnie najsławniejszym skanerem jest *SATAN*, uznawany przez znacząca większość organizacji do analizy bezpieczeństwa systemu, na podstawie opracowań *National Computer Security Institute*.

# 1.1. Skaner SATAN

Security Administrator's Tool for Analyzing Networks (SATAN) autorstwa Dan Farmer i Weitse Venema po raz pierwszy ukazał się 5 kwietnia 1995 roku i jest dostępny w ogólnoświatowych zasobach sieciowych. SATAN to pierwszy skaner portów

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Celem destruktorów jest włamanie się do systemu i jego zdestabilizowanie lub też kradzież albo modyfikacja informacji.

TCP/IP umożliwiający złożone testowanie *STI* za pomocą prostych procedur w systemie operacyjnym UNIX i Windows i inne platformy systemowe.

Składa się on z kilku modułów skanujących, wykrywających luki w zabezpieczeniach zdalnych stacji roboczych, poprzez badanie m.in.:

- kontrolę dostępu do serwera,
- dostęp do zdalnych powłok,
- dostęp do usług (np. usługi FTP),
- eksportowane systemy plików NFS,
- hasła NIS,
- luki sendmaila i protokołu TFTP.

*SATAN* zyskał dużą popularność dzięki przejrzystości i ścisłości raportów wyświetlanych z wykorzystaniem możliwości Perla i zwykłej przeglądarki interpretującej język HTML'a. Kategorie danych wyjściowych raportowanych to:

- vulnerabilities zawiera spis wrażliwych punktów sieci lub stacji roboczej i miejsc ich występowania (np. serwer, terminal, itp.),
- host information zawiera informacje o: lokalizacji serwerów w sieci, każdym komputerze opisanym przez program, podsieciach
- i domenach itp.,
- trust pomaga w poznaniu relacji ufności pomiędzy systemami, bada te relacje za pomocą komputerów obsługujących zdalne logowanie, udostępniających systemy plików itp.

Należy podkreślić, iż skanery to nie tylko wyszukiwacze luk, ale przede wszystkim nieocenione narzędzie programowe przypominające o konieczności ich ciągłego wyszukiwania i usuwania. Przykładami innych skanerów są: Security Administrator's Integrated Network Tool (SAINT), Internet Security Scanner (ISS), Nessus, nmap, CGI scanner v1.0, itd.

## 1.2. Skaner SAINT

Security Administrator's Integrated Network Tool jest rozszerzeniem i udoskonaleniem programu SATAN. Program testuje wszelkie rodzaje usług oferowanych w stacjach sieciowych stanowiących potencjalną lukę w bezpieczeństwie, począwszy od serwerów WWW, FTP, e-mail poprzez usługi DNS, SMB i wiele innych.

Producent udostępnia program bez konieczności uiszczania opłat licencyjnych, nie ponosi jednak żadnej odpowiedzialności za błędne lub nieuczciwe jego wykorzystywanie. Celem projektantów pakietu SAINT było wykonanie narzędzia grupującego wiele procedur testujących stopień zabezpieczenia systemu. Ułatwiono dostęp do najnowszych informacji o błędach w oprogramowaniu, mogących zwiększyć ryzyko włamania do systemu. SAINT działa w graficznym środowisku użytkownika Windows. Interfejs programu Х stanowi przeglądarka stron WWW (np. Netscape), poprzez którą obsługuje się go i otrzymuje wyniki funkcjonowania.

#### 1.3. Skaner NMAP

The Network Mapper jest kolejnym skanerem portów udostępniany w narzędzie Open Source, służy zarówno do skanowania portów w rozległych STI, jak i pojedynczych stacji roboczych opartych o systemy Unix'owe i Windows'owe. Skaner znajduje zastosowanie dla różnych protokołów sieciowych (m.in. UDP, TCP, ICMP). Głównym zadaniem programu jest wykrywanie oferowanych usług, np. FTP, POP3 oraz określanie numerów portów, na których działają (Rys. 1). Cechą decydującą o wyjątkowej przydatności nmap'a jest możliwość wyboru jednej z wielu technik skanowania łącznie z ukrywającymi fakt skanowania (tzw. stealth).

Programu używa się między innymi do identyfikowania rodzaju i wersji systemu operacyjnego zainstalowanego na danym systemie sprzętowym (ang. *TCP/IP fingerprinting*) Program automatycznie również sprawdza, czy komputery znajdujące się w danej podsieci są uruchomione (ang. *ping*). Ważną funkcją narzędzia jest określanie rodzaju ściany ogniowej zainstalowanej w systemie.

🖃 🛛 Nmap Front End v1.6 🔗 🗉 🗖					
File Output Help					
Host(s): xanadu vectra playground Scan. Exit					
Scan Options:	ptions: General Options:				
	Don't Resolve		🔄 Fragmen	tation	
SYN Stealth	🔟 Fast Scan		🔄 Get Ident	d Info	
	Range of Ports:	↓ ICMP Ping	Resolve	All	
🕹 FIN Stealth		🕹 Don't Ping	🗖 OS Dete	ction	
🗢 Bounce Scan:	Use Decoy(s):	🔄 Input File:	Send on	Device:	
	antionline.com				
Output from: nmap -s	S - O - Dantionline.co	om xanadu vectra	playground	ES	
Port State	Protocol Serv.	ice	·/•		
21 open	top dayt. top ftp	lme			
22 open 23 open	top ssh top teln	et			
37 open 79 open	top time				
111 open	top sunn	PC			
513 open	top auth	ņ			
514 open	514 open tcp shell				
TCP Sequence Pred	iction: Class=ran Difficult	dom positive ir u=14943 (Worthu	ncrements 4 challenge	, I	
Remote operating	system guess: Ope	nBSD 2.2 - 2.3	,		
Interesting ports on playground.yuma.net (192.168.0.1): Port State Protocol Service					

Rys. 1. Graficzny interfejs skanera nmap

Dzięki różnorodności technik skanowania (od *TCP Connect* do *Stealth*) ustala się reguły przyjmowania i/lub odrzucaniau przychodzących pakietów.

#### 1.4. Skaner NETSCANTOOLS

NetScanTools jest narzędziem służącym do skanowania w systemie Windows. Jest to produkt komercyjny, jednak ze strony producenta można pobrać 30-dniową standardową wersję próbną. Skaner ten jest wygodna graficzna nakładka (Rys. 2) wielu dostepnych za darmo narzedzi dla obsługiwanych z wiersza poleceń, takich jak ping, traceroute, finger oraz whois i fwhois. Program wykorzystuje także kilka starszych usług, takich jak echo, daytime, quote i chargen, do których dostęp jest blokowany w większości systemów dołączonych do Internetu. Dodatkowo zaimplementowano wiele z narzędzi / podprogramów takich jak TimeSync, Database Tests, WinSock Info, NetBios Info oraz Ident Server. NetScanTools posiada dużą funkcjonalność przez wygodny i zintegrowany pakiet narzędzi do zdobywania istotnych informacji sieciowych oraz przeprowadzania skanowania sieci. Do najbardziej przydatnych narzędzi należy:

62

- NetScanner skanowanie wskazanego przedziału adresów i odszukiwanie działających sieci i stacji roboczych,
- Port Scanner właściwe skanowanie portów wraz z "łapaniem nagłówków" (ang. banner grabbing),
- TCP Term bezpośrednie łączenie się ze wskazanym portem na wskazanym zdalnym systemie i komunikowanie się z nasłuchującą na tym porcie usługą.

Example: www.nwpsw	com or 12	7.0.0.1)	•	List View	C Classic View	AutoPing	
www.nwpsw.com			<u></u>	Ping	Stop	Setup	ns
leady.			X	Resolve IP a	ddresses to host i	names	
IP	Bytes	Insec	TTL	Type	Status		
207.137.171.253	12	4657	246	type 0			
207.137.171.253	12	6009	246	type 0			
207.137.171.253	12	2454	246	type O			
207.137.171.253	12	211	246	type 0			
207.137.171.253	12	210	246	type O			
207.137.171.253	12	200	246	type O			
•	no posicio						•

Rys. 2. Graficzny interfejs skanera NetScanTools

## 1.5. Skaner SUPERSCAN

SuperScan jest kolejnym graficznym narzędziem skanującym funkcjonującym także w systemie Windows. W przeciwieństwie do programu NetScanTools, jest to darmowe narzędzie Open Source, umożliwiające skanowanie portów UDP i TCP oraz zdobywanie dodatkowych informacji pozwalający na identyfikację diagnozowanego systemu. Zwiększona funkcjonalność ograniczyła jednak możliwości stosowania programu SuperScan do nowszych systemów operacyjnych Windows<sup>3</sup>.

Wygląd interfejsu użytkownika aktualnej wersji programu *SuperScan* posiada zakładki oddzielających funkcje oraz ekrany przeznaczone do konfiguracji (Rys. 3).

H	stname Lookup	Config	urat
10.0.0.2	-2006 L	ookup	
Resolved [Unknown]	Me	Interfaces	a sei
IP         Timec           Staf [10.0.2         -:         Prig           Stop [10.0.2         -:         400           Prev C         NextC         1.254         [2000           IF' Ignore IP zero         For Jone IP 255         Reac         [4000           Extract from file         >         [4000         [4000	Scan type           □         Resolve hostnames           □         Only scan responsive pings           □         Show host responses           □         Ping only           □         Every port in list           □         All selected ports in list           □         All set ports from 1           □         All all ports from 1	Scanning 10.0.2 Scanning 10.0.2 Resolving	St
Speed Max ■ 25 Simple Ma ■ 110 Post Offic ■ 100 Post Offic ■ 39 NETBIOS	Tranifer Protocol - Version 3 A: com PDP MD aemon 3.5.2 ready (MD/ Session Service	XEMON-F2000122	ve ho 1 3 Save apse

Rys. 3. Graficzny interfejs skanera SuperScan

SuperScan używa się do skanowania portów, pozyskiwania ogólnych informacji o sieci (np. nazw stacji roboczych, danych o trasowaniu) oraz szczegółowych informacji o zdalnych komputerach z systemem Windows (z danymi o użytkownikach, grupach i usługach włącznie).

#### 1.6. Skaner IPEYE SKANER

*IPEye* jest skanerem portów uruchamianym z wiersza poleceń systemów Windows 2000/XP. Program udostępnia takie same tryby ukrytego skanowania TCP jak *nmap* (ze skanowaniem *SYN*, *FIN*, *Xmas tree* oraz *null*). *IPEye* jest darmowy i posiada małe wymagania sprzętowe. Wadą narzędzia jest możliwość uruchamiania tylko w systemach Windows.

Opcje programu *IPEye* (Rys. 4) są podobne do możliwości innych skanerów omówionych powyżej. Można w nim wydłużyć czas skanowania oraz zmodyfikować źródłowy adres IP i numer portu (chociaż nie są obsługiwane bardziej wyszukane opcje podszywania się pod inny adres).

ipEye GUI v1.0				
Target IP (not hostname)           [205:217.157.62           - Scan Parts	Scan Type G SYN C FIN C NULL C Xmas	Optional Parame     Source IP     Source Port     Delay     Default Delay; 7	ters 127.0.0.1 12345 500 ms.	Start ipEye Location About Quit
<pre>tpsye 1.2 - (c) 2000-2001, Ar</pre>	ne vidstrom ( .nu/toolbox/i	(arne.v1dstro <del>m</del> t peye/	htsecurity.nu	) 1
				±

Rys. 4. Graficzny interfejs skanera IPEyeScanner

#### 2. SKANERY SŁABYCH PUNKTÓW

W ogólności, skaner słabych punktów składa się z modułu skanującego i katalogu. Katalog zawiera listę najczęściej spotykanych plików, plików znanych z wrażliwości na atak oraz listy często spotykanych luk w zabezpieczeniach dla wielu współczesnych serwerów i host'ów. Skaner słabych punktów obsługuje odczytywanie katalogu słabych

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> SuperScan nie działa w systemach Windows 95 i 98.

punktów, wysyłanie żądań do badanego systemu oraz interpretowanie otrzymywanych odpowiedzi celem określenia, czy badany system jest podatny na atak. Zadaniem tych narzędzi jest zwykle wykrywanie słabych punktów, które mogą być łatwo usunięte przez poprawienie konfiguracji komputera, zainstalowanie uaktualnień i wyczyszczenie odpowiednich katalogów.

# 2.1. Skaner NIKTO

Program *Nikto* jest skanerem funkcjonującym na podstawie języka Perl, dzięki czemu działa w systemach Unix, Windows oraz Mac OS X. Narzędzie wykorzystuje standardowe biblioteki Perla zawarte w jego domyślnej instalacji. Narzędzie wymaga także biblioteki *LibWhisker*. Już od pierwszej wersji program oferował obsługę *Secure Sockets Layer*, serwerów pośredniczących (ang. *proxy*) oraz funkcję skanowania portów.

Moduł skanujący wykrywa potencjalne słabe punkty serwerów WWW i wyświetla dane wyjściowe wyjaśniające, dlaczego znalezione luki w systemie zabezpieczeń mogą stanowić zagrożenie.

Program wyposażono w wiele opcji w większości przypadków opcje te poszerzają funkcjonalność narzędzia do tego stopnia, że wykracza ona poza możliwości typowe dla programów skanujących.

## 2.2. Skaner STEALTH

*Stealth* jest narzędziem do skanowania słabych punktów wykorzystującym graficzny interfejs użytkownika systemu Windows. Zaleta programu *Stealth* leży w liczbie przeprowadzanych testów i w łatwości aktualizowania jego bazy danych. Testy dotyczą rozmaitych elementów: od adresów URL łamiących zabezpieczenia urządzeń z wbudowanymi serwerami WWW po ostatnio odkryte luki w serwerach IIS.

Narzędzie *Stealth* próbuje uprościć proces wykrywania słabych punktów, udostępniając narzędzie pomocnicze, *Stealth Exploit Development Tool* - program z graficznym interfejsem użytkownika,

w którym należy podać wartość dla każdego możliwego pola wykorzystywanego podczas konstruowania testu słabych punktów.

Kolejną ciekawą techniką wykorzystywaną przez *Stealth* jest test przepełnienia bufora. Tego typu atak można przeprowadzić przeciwko dowolnemu adresowi URL udostępnianemu przez aplikację WWW, dla którego definiuje się listę parametrów.

Większość testów przeprowadzanych przez narzędzie *Stealth* opiera się na zwrotnych kodach HTTP generowanych przez skanowany serwer. Takie rozwiązanie jest korzystne, gdy sprawdza się, czy na serwerze istnieją źle zabezpieczone skrypty, jednak nie zawsze daje wiarygodną odpowiedź na pytanie, czy dany skrypt rzeczywiście jest podatny na atak.

#### 2.3. Skaner NESSUS

*NESSUS* to narzędzie dostępne na platformie Unix na zasadach *Open Source*. Działanie *Nessus'a* opiera się na architekturze klient-serwer (Rys. 5), a program składa się z dwóch części:

- systemu (ang. *nessusd*) będąca serwerem, może zostać zainstalowana na systemie zdalnym, wykonuje ona większą część zadań wysyłanych do niej przez klienta,
- klienta z tego poziomu wydaje się polecenia i łączy się z serwerem za pomocą protokołu TCP/IP. Klient może być uruchamiany na tej samej maszynie lub na innej, zlokalizowanej w obrębie sieci (lub tez poza nią). Korzystanie z serwera wymaga autoryzacji przy użyciu systemu jednorazowych haseł i kluczy.

Wraz z narzędziem dostarczany jest bardzo zaawansowany graficzny interfejs użytkownika, znacznie ułatwiający pracę. W praktyce najczęściej wykorzystuje się do testów narzędzie *NessusWX* klienta *Nessus'a* w wersji dla MS Windows. Powodem jego wyboru, w przeciwieństwie do klienta uniks'owego, jest jego lepsza organizacja i ergonomia użycia.

*Nessus* umożliwia szczegółowe określanie pojedynczego rodzaju wykonywanego testu lub wybranie całej grupy testów (np. *Denial of Service*) lub tylko niektórych, istotnych dla badanego systemu.



Rys. 5. Konsola programu Nessus

*Nessus* może współpracować z trzema zalecanymi programami znacznie zwiększającymi funkcjonalność testów (*nmap, Hydra, nikto*).

#### 3. PROGRAMY SNIFFINGU

*Sniffer* to program przełączający kartę sieciową w tryb bezwładny i nasłuchujący pracę w sieci. Przy jego pomocy możemy wywołać: przełączenie interfejsu w tryb bezładny, nasłuchiwanie, zapisywanie i wyświetlanie nasłuchiwanego ruchu TCP. Najpopularniejsze programy to: *TCPDUMP I WINDUMP, ETHEREAL, DSNIFF, ETTERCAP*, itp.

Niebezpieczeństwo dla systemu ze strony sniffer'ów jest bardzo duże, gdyż można tą drogą przechwycić hasła. A jak wiadomo dostanie się do systemu nawet jako zwykły użytkownik to połowa sukcesu dla włamywacza. Ataki przeprowadzane przy użyciu tego rodzaju programów to najgroźniejsze i najbardziej niebezpieczne ataki na system i poufne informacje.

Wykrycie *sniffer'a* nie jest łatwe, ponieważ najczęściej nie zostawiają one żadnych śladów działają na komputerze atakującego i tylko przyjmują pakiety - żadnych danych podczas prowadzenia nasłuchu nie wpuszczają do sieci (chyba, że komputer zostanie zapytany).

Sprawdzenia, czy dana karta pracuje w trybie bezładnym można dokonać posługując się poleceniem *ifconfig*. Aby sprawdzić wszystkie karty pod względem trybu pracy można też posłużyć się poleceniem *ifstatus*. W przypadku ustawionego interfejsu w tryb bezładny otrzymamy stosowny komunikat. Poważną wada tego rozwiązania jest konieczność sprawdzania ustawienia każdej stacji roboczej.

Dobrym rozwiązaniem jest użycie programu Network Promiscuous Detector (NEPED). NEPED skanuje sieć w poszukiwaniu interfejsów znajdujących się w trybie promiscous. W tym celu NEPED wykorzystuje błąd w implementacji arp. W jądrach linux'owych powyżej 2.0.36 naprawiono już ten błąd.

Najlepszą ochroną przed *sniffer'ami* jest zastosowanie szyfrowania zarówno transmisji *loginu* i hasła jak i samych danych.

# 3.1. Sniffer'y TCPDUMP i WINDUMP

Program *tcpdump* jest *sniffer'em* pakietów dla systemu Unix, uruchamianym w wierszu poleceń. *WinDump* jest odpowiednikiem *tcpdump* dla systemów Windows i ma niemal taką samą funkcjonalność jak *tcpdump*. *Tcpdump* został napisany ściśle pod kątem monitorowania sieci, analizowania i testowania ruchu sieciowego oraz przechwytywania pakietów.

Tcpdump jest popularnym analizatorem protokołów sieciowych wymagającym kernel'a z opcja Berkelev Packet Filter i urządzenia z dostęp do /dev/bpf. Właściwe funkcjonowanie wymaga interfejsu zdefiniowania zbierania pakietów i miejsca ich składowania. Zaletą tcpdump jest możliwość konstruowania warunków logicznych sprawdzający określoną właściwość pakietu. Jeśli wynik sprawdzenia wzorca to logiczna prawda pakiet zostaje zarejestrowany.

Podstawowy typ skanowania *tcpdump* to wysłanie pustego pakietu UDP (*udp* 0) na port i oczekiwanie na odpowiedź w postaci komunikatu ICMP.

*Tcpdump* i *WinDump* to właściwie bardziej analizatory pakietów sieciowych niż *sniffer'y*. Ich możliwości filtrowania pakietów są znacznie większe niż wielu innych dostępnych narzędzi, ale mechanizm przechwytywania danych z pakietów nie jest najłatwiejszy w użyciu. Programy pozwalają uzyskać wiele interesujących niskopoziomowych informacji o pakietach przechodzących przez sieć i mogą pomóc zdiagnozować wszelkiego rodzaju słabe punkty a także przechwycić informacje wrażliwe.

Oba narzędzia, *tcpdump* i *WinDump*, używają biblioteki *pcap*, zestawu procedur służących do przechwytywania pakietów. Procedury biblioteki *pcap* udostępniają interfejs i zestaw funkcji umożliwiających filtrowanie pakietów na poziomie systemu operacyjnego oraz demontowanie pakietów IP na dane surowe.

Analiza wyników dostarczanych przez tcpdump jest bardzo trudna, dlatego też rzadko się z niego korzysta. Jednakże tcpdump stał się standardem (zarówno wśród sniffer'ów, jak i sieciowych systemów detekcji intruzów). Oparta jest na nim większość narzędzi analizy sieciowej posiadających interfejs graficzny. Format zapisu pakietów za pomoca *tcpdumpa* jest rozpoznawany przez wiele narzędzi. Co więcej, filtry z jakich korzysta ten pakiet, zostały także zaakceptowane przez innych twórców. Efektem funkcjonowania pakietu jest kompatybilność narzędzi wielu sieciowych z tcpdumpem.

# **3.2.** ETHEREAL

Ethereal to graficzny interfejs do odczytywania plików z wynikami przechwytywania pakietów, tworzonych przez kilka różnych sniffer'ów pakietów, z tcpdump i WinDump włącznie. Potrafi samodzielnie i W czasie rzeczywistym przechwytywać pakiety, przy użyciu narzędzia tethereal i biblioteki pcap. Wykorzystując Ethereal na stworzonych wcześniej plikach z przechwyconymi danymi, można przeglądać szczegóły przechwyconej sesji, łącznie z danymi pakietów.

Ethereal jest dostępny za darmo dla systemów Windows, Unix i niektórych systemów dla komputerów Macintosh. operacyjnych Możliwości Ethereala są duże, gdyż program rozpoznaje w zasadzie wszystkie popularne formaty zapisu pakietów. Program umożliwia analizę strumienia TCP, co jest bardzo pomocne podczas dekodowania sesji TELNET, SMTP, FTP czy HTTP. Pakiet ułatwia także zbieranie i analizowanie statystyk ruchu.

C Ethereal: Capture Options					
Capture					
Interface: \Device\Packet_{0A794CCA-EDEF-4E					
」Limit each packet to 68 → bytes					
🗖 Capture packets in promisc	🗖 Capture packets in promiscuous mode				
Filter:					
Capture file(s)					
File:					
Use ring buffer Number of	files 2				
Display options					
Update list of packets in rea	l time				
■ Automatic scrolling in live ca	apture				
Capture limits	_				
I Stop capture after 1	packet(s) captured				
⊒ Stop capture after 1	→ kilobyte(s) captured				
_ Stop capture after 1	$\rightarrow$ second(s)				
Name resolution					
Enable MAC name resolution					
_ Enable network name resolution					
⊒ Enable transport name reso	lution				
	OK Cancel				

Rys. 6.Okno parametrów przechwytywania

*Ethereal* składa się z kilku wbudowanych narzędzi, zainstalowanych domyślnie w systemach Unix i Windows:

- Tethereal wersja programu Ethereal pozbawiona graficznego interfejsu, wykorzystywana w systemach bez środowiska X Windows lub w Win32,
- Editcap pozwala na modyfikację plików zawierających przechwycone pakiety. Niestety możliwości edycji są bardzo ograniczone. Można wybrać liczbę pakietów, jakie mają się znaleźć w pliku wynikowym, zmodyfikować czas ich przechwycenia,
- Mergacap umożliwia konsolidację plików zawierających przechwycone pakiety w jeden plik, pakiety są włączane do pliku wynikowego chronologicznie,
- *Text2pcap* wczytuje dane w formacie szesnastkowym, zapisanym jako znaki ASCII, i konwertuje je do formatu *lipcap*, umożliwia ponadto uzupełnienie danych o brakujące nagłówki, np. IP czy UDP.

## 3.3. DSNIFF

*Dsniff* jest zestawem darmowych narzędzi, które zostały oryginalnie stworzone dla celów testowania sieci i możliwości jej infiltracji:

- Arpspoof umożliwia podsłuchiwanie przełączanej sieci przez podrabianie odpowiedzi ARP dla docelowej stacji roboczej,
- Dnsspoof działa podobnie do arpspoof. Pozwala podrobić odpowiedzi DNS dla serwera DNS znajdującego się w sieci lokalnej,
- Dsniff jest zaawansowanym sniffer'em haseł używanym, gdy chcemy uzyskać tylko nazwy użytkowników i hasła,
- Macof zasypuje lokalną sieć losowymi, wymyślonymi adresami MAC (atak typu *Flood*) w nadziei, że spowoduje awarię przełącznika i zacznie on działać jako koncentrator, dając

programowi *dsniff* większe szansę w środowisku sieciowym wykorzystującym przełączniki,

- Mailsnarf składa z powrotem podsłuchane wiadomości poczty elektronicznej z protokołów SMTP i POP,
- Sshmitm jest jednym z bardziej złośliwych narzędzi dostępnych w zestawie dsniff. sshmitm (SSH Man in the Middle) może podsłuchiwać ruch SSH przekierowywany do komputera intruza. Obsługuje tylko SSH w wersji 1,
- *Tcpkill* próbuje przerwać trwające połączenie TCP przez sfałszowanie pakietu resetującego i wstrzyknięcie go do prawdziwego połączenia,
- *Tcpnice* pozwala spowolniać połączenia. Wykorzystuje te same opcje, co *tcpkill*,
- Urlsnarf działa tak samo jak wszystkie inne programy do przechwytywania w tym zestawie narzędzi, z wyjątkiem tego, że działa dla sieciowych adresów URL,
- Webmitm wykonuje dla HTTPS (ruch WWW z szyfrowaniem SSL) to samo, co sshmitm dla SSH,
- Webspy z pakietu dsniff umożliwia podsłuchiwanie ruchu WWW pochodzącego ze wskazanego komputera. Za każdym razem, kiedy komputer skieruje się do nowego adresu URL, webspy załaduje ten sam URLw przeglądarce intruza.

#### 3.4. ETTERCAP

Program *Ettercap* działa w systemach Linux, BSD, Solaris 2.x, większości odmian Windows (Rys. 7) i Mac OS X. *Ettercap* tworzenie własnych modułów dodatkowych. Te moduły mogą służyć do rozszerzenia możliwości *ettercap*.

Uruchomienie *ettercap* bez żadnych opcji, powoduje zainicjowanie skanowania *ARP* badanej sieci LAN i wyświetlenie tabeli wszystkich komputerów znalezionych w sieci LAN. Podsłuchiwanie z wykorzystaniem *ARP* jest wizytówką programu *ettercap*. Ten tryb wymaga wybrania przynajmniej źródła albo celu.

48 hos	te in this LAN (192	168.0.3	a : 255,255,255 a)
1>	192,168,8,76	1)	192.168.0.76
2>	192.168.0.22	2>	192.168.0.22
	192.168.0.205		192.168.0.205
	192.168.0.123	4>	192.168.0.123
5>	192.168.0.89		192.168.0.89
6>	192.168.0.235	6>	192.168.0.235
	192.168.0.194		192.168.0.194
8>	192.168.0.90	8>	192.168.0.90
. 9>	192.168.0.199	. 9 >	192.168.0.199
102	192.168.0.183	10>	192.168.0.183
11>	192.168.0.98	112	192.168.0.98
122	192.168.0.191	122	192.168.0.191
132	192.168.0.135	132	192.168.0.135
142	192.168.0.214	142	192.168.0.214
152	192.168.0.191	152	172.158.0.171
162	192.168.0.232	162	192.168.0.232
162	172.168.0.98	163	172.168.0.46
16/	172.100.0.10	182	174.106.0.10
177	192.168.0.128	197	192.168.0.128
202	172.158.0.170	207	172.158.0.170
217	102 100 0 103	222	192 168 0 68
222	102 160 0 10	221	192 169 0 19
237	192 168 0 222	245	199 168 0 999
255	192 168 0 210	255	192 168 0 210
265	192.168.0.63	265	192.168.0.63
207	192 168 0 21	225	192 168 0 21
	112-100-0-51		172-109-0-21

Rys. 7. Konsola programu EtherCap

Umożliwia on przechwytywanie ruchu, nawet w sieci opartej na przełącznikach. *Ettercap* podrobi pakiety *ARP* docelowego komputera w taki sposób,

że każde żądanie *ARP* dla adresu IP wybranego celu otrzyma w odpowiedzi adres MAC komputera podsłuchującego, co pozwoli na przechwycenie ruchu przez *sniffer* zanim *ettercap* przekaże go dalej. Procedura zatruwania ARP wykorzystywana przez *ettercap* może niekiedy spowodować zakłócenia w działaniu sieci LAN. Ze względu na swoją naturę, tryb podsłuchiwania z wykorzystaniem ARP w programie *ettercap* wykorzystuje atak typu "*manin-the-middle*" podobny do tego, jaki *sshmitm* z narzędzi pakietu *dsniff*.

# WNIOSKI

Z analizy zjawisk zachodzących w systemach teleinformatycznych wynika konieczność zapewnienia wymaganego poziomu bezpieczeństwa, poprzez realizacje procesu diagnozowania, zarówno dla danych przechowywanych jak i znajdujących się obiegu przed nieupoważnionymi osobami. w uwzględniając aktualność i ważność tego problemu, na rynku teleinformatycznym, oferowanych jest wiele rozwiązań programowych i sprzętowych do badania bezpieczeństwa w systemach tego rodzaju. Dlatego też w artykule tym wymieniono i dokonano charakterystyki powszechnie wykorzystywanych darmowych narzędzi wyszukujących najmniej bezpieczne miejsca.

Jak wynika z analizy oferowanych rozwiązań, do badania bezpieczeństwa, istnieje obecnie duża grupa narzędzi, zarówno sprzętowych jak i programowych, pozwalających na wieloaspektowe diagnozowanie sieciowe. Są to głównie narzędzia pozwalające analizować zjawiska zachodzące sieci i badanie odporności na różnego rodzaju ataki.

Z powyższego wynika, że za pomocą dowolnego z przedstawionej grupy stosowanych w praktyce narzedzi (Tabela 1), konieczność podkreślenia jak nie mało wiedzy i umiejętności potrzeba posiadać, żeby spowodować nieodwracalne szkody w zakresie utraty poufności, integralności, dostępności przechowywanej, przetwarzanej informacji współczesnych systemach przesyłanej we i teleinformatycznych.

Tabela 1.

Zestaw wybranych narzędzi do zdobywania informacji o systemach TI

Narzędzie	Zastosowanie	Strona www
Ethereal	Analizowanie pakietów	http://www.ethereal.com
Tcpdump	Analizowanie pakietów (Linux)	http://www.tcpdump.org/
Windump	Analizowanie pakietów (Windows)	http://www.winpcap.org/ windump/
Nmap	Wszechstronne skanowanie sieci	http://www.insecure.org/ nmap/
Dsniff	Testowanie sieci - zestaw narzędzi	http://naughty.monkey.or g/~dugsong/dsniff/
Ngrep	Filtrowanie zawartości pakietów	http://ngrep.sourceforge. net/

Nikto	Skanowanie podatności serwerów WWW	http://www.cirt.net/code/ nikto.shtml
Amap	Rozpoznawanie usług	http://www.thc.org/thc- amap
POf	Pasywne narzędzie do fingerprintingu	
Cheops-ng	Tworzenie mapy sieci	http://cheops- ng.sourceforge.net/
Firewalk	Tester firewalli	http://www.packetfactor y.net/firewalk/
Sing	Generowanie pakietów ICMP	http://www.sourceforge. net/projects/sing
Hping2	Generowanie pakietów	http://www.hping.org/
Fragroute	Testowanie zachowania firewalli, systemów IDS i stosu TCP/1P	http://www.monkey.org/ ~dugsong/fragroute/
Nessus	Skanowanie podatności	http://www.nessus.org/
WebServer FP	Rozpoznawanie serwerów WWW	http://www.computec.ch/ request.php7457
N-Stealth	Skanowanie podatności serwerów WWW	http://www.nstalker.com /nstealth/
Nemesis	Generator pakietów	http://nemesis.sourceforg e.neV
Kismet	Skanowanie sieci WiFi	http://www.kismetwirele ss.net/
NetStumbl er	Wykrywanie sieci WiFi	http://www.netstumbler. com/
AirCrack	Testowanie sieci WiFi - zestaw narzędzi	http://freshmeat.net/proje cts/aircrack/

Ciągły i nieustanny rozwój nowych metod i narzędzi ataku oraz fakt ich ogólnej dostępności w zasobach sieci Internet powodują, że znacznie wzrasta ryzyko potencjalnego zagrożenia.

## LITERATURA

- [1] Shema M. & Bradley C. Johnson: Anti-Hacker TOOL KIT, Edvcja polska, Helion, 2004.
- [2] Fadia A., *Etyczny hacking: Nieoficjalny przewodnik*, Mikom, 2003.
- [3] Klevinsky T. J., Laliberte S., etc.: *Testy* bezpieczeństwa danych, Helion, 2003.
- [4] Erickson J., *Hackin: Sztuka penetracji*; Helion 2004.
- [5] Liderman K.: Podręcznik administratora bezpieczeństwa teleinformatycznego; MIKOM, 2003.
- [6] Tanger J., Lane P. T., Danielyan E.: *Hack Proofing Linux*; HELION, 2003.
- [7] Praca zbiorowa: *Hack Proofing Network;* HELION, 2003.
- [8] Witryny internetowe poświęcone poszczególnym narzędziom (tabela 1).



inż. Ireneusz Mgr **KRYSOWATY** pracownik Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej i absolwent "Elektronika kierunku i telekomunikacja". Jego obszar zainteresowań obejmuje biometrię oraz bezpieczeństwo systemów IT.

Aktualnie uczestniczy w pracy badawczej dotyczącej sieciowych systemów ochrony w oparciu o TCP/IP.



Dr inż. Dariusz LASKOWSKI w 1997 roku ukończył Wydział Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej, gdzie obecnie pracuje w Instytucie Telekomunikacji na stanowisku naukowo asystenta dydaktycznego. Członek

Polish Safety and Reliability Association, stopień doktora nauk technicznych otrzymał w dyscyplinie telekomunikacja o specjalność sieci teleinformatyczne. Autor wielu publikacji krajowych i zagranicznych, współwykonawca sześciu prac naukowo-badawczych oraz osiemnastu autorskich opracowań Programu Zapewnienia Niezawodności urządzeń i systemów łączności.



Mgr inż. Paweł NIEDZIEJKO, pracownik Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej i absolwent "Elektronika kierunku i telekomunikacja". Prowadzi wykłady i szkolenia z zakresu bezpieczeństwa systemów IT, telekomunikacji światłowodowej.

zarządzania bezpieczeństwem. Jego zainteresowania skupiają się biometrycznym uwierzytelnianiu i podpisie cyfrowym w infrastrukturze klucza publicznego. Obecnie prowadzi pracę badawczą dotyczącą sieciowych systemów ochrony w oparciu o TCP/IP.

# GENEZOWANIE ZDARZEŃ EKSPLOATACYJNYCH

Jerzy LEWITOWICZ Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, 01-494 Warszawa 46, ul. Księcia Bolesława 6, skr. Poczt. 96.

Streszczenie

W pracy przedstawiono problemy teorii i praktyki oraz przesłanki kształtujące rozwój eksploatacji i diagnostyki statków powietrznych, a także przykładowe rozważania, służące do lepszego zrozumienia interdyscyplinarnego podejścia naukowego do eksploatacji widzianej jako, łącznie, utrzymanie i użytkowanie statków powietrznych. Pokazano również praktyczne przykłady diagnostyki, a w niej genezowanie stanu.

Słowa kluczowe: eksploatacja, diagnostyka, statek powietrzny, lotnictwo.

GENESIS OF HAPPENING MAINTENANCE AND OPERATION (EXPLOATATION)

#### Summary

Within the work there are discussed the state and premises for the better understanding maintenance, operation and diagnostics of aircraft considered jointly as exploitation of aircraft. Some proposals of definitions and system-of-systems analysis are explained demonstrating the interdisciplinary approach to the problem including the diagnostics and genesis.

Keywords: exploitation, diagnostics, aircraft, aviation.

# 1. WPROWADZENIE

Zaobserwować można dwa wyróżniające się źródła przesłanek, które rzutują na stan współczesny i oczekiwany rozwój eksploatacji w tym diagnostyki statków powietrznych. Jednym statków powietrznych z nich jest rozwój przejawiający się, miedzy innymi, w zaawansowanej awionice oraz automatyce, opracowywaniu i wprowadzaniu nowych W materiałów na wysoko obciążone elementy struktur (np. w płatowcu samolotu A 380 już 20% struktury nośnej wykonuje się z kompozytów polimerowych o zbrojeniu z włókien weglowych). Drugim jest wzrost liczby operacji i uczestniczących w nich statków powietrznych.

Eksploatacja statków powietrznych w ujęciu zdarzeń eksploatacyjnych stała się nieodłączna życia współczesnych społeczeństw. cześcia Wszechobecny rozwój lotnictwa przeznaczonego do wykonywania zadań zarówno cywilnych jak i wojskowych, niejednokrotnie silnie ze sobą powiązanych, spowodował, że obszar działań nazywany eksploatacją poszerza się szybko i znacząco, obejmując nowe, bardziej złożone zakresy, które dają się zgrupować w dwóch podstawowych zbiorach: utrzymywanie zdatności oraz użytkowanie statków powietrznych. W tym ostatnim zbiorze wielką rolę odgrywa diagnostyka.

#### 2. GENEZOWANIE JAKO SKŁADOWA CZĘŚĆ DIAGNOSTYKI

Zagadnienie generowania stanu technicznego lub systemu np. antropotechnicznego nie ma jeszcze bardzo dobrze opracowanych metod, notacji podobnie jak prognozowanie na co zwrócili uwagę autorzy pracy [2].

Diagnostyce przypisuje się następujące obszary naukowe w rozważaniach posługując się parametrem zmiennym, ciągle jednostajnie narastającym, jakim może być parametr czasu [4, 6, 7]:

**Genezowanie** to jedna z trzech gałęzi **diagnostyki** obok: kontroli stanu i prognozowania. Genezowanie dotyczy takich niepożądanych zdarzeń eksploatacyjnych, jak: niesprawność, uszkodzenie, awaria, katastrofa. W rozważaniach cofa się do czasu  $t_g = t_0 -\Delta t_g$  (gdzie;  $\Delta t_g$  jest przedziałem genezowania).

Kontrola stanu przygotowuje diagnozę (stanu), odpowiada na pytanie: Jaki jest stan (sprawny nie sprawny, zdatny nie zdatny itp.) w momencie  $t_0$ .

**Prognozowanie** wypracowujące **prognozę** (stanu) odpowiada na pytanie: **Jak** długo będzie trwał stan sprawny, zdatny itp. w przyszłości w momencie  $t_p = t_0 -\Delta t_p$  (gdzie;  $\Delta t_p$  jest przedziałem prognozowania).

Genezowanie wypracowuje genezę zaistniałego niepożądanego zdarzenia eksploatacyjnego starając się odpowiedzieć nie na jedno a na dwa pytania: 1° **Jak** to się stało? – opis przebiegu zdarzenia i 2° **Dlaczego** tak się stało? – opis przyczyny zaistniałego zdarzenia.

Do problemu genezowania istnieją dwa podejścia:

- 1. Eksploratywne, polegające na gromadzeniu wiedzy w istotnych dziedzinach, na podstawie której dokonuje się analizę przyczynowo skutkowej zdarzeń nieporządanych.
- Normatywne, polegające na zidentyfikowaniu zadań z przeszłości i wskaźników opisujących zadania. Ta metoda jest szczególnie użyteczna do genezowania systemów antropotechnicznych (lotniczych) odnośnie badań bezpieczeństwa lotów.

Zarówno przy podejściu eksploratywnym, jak i normatywnym lub możliwym mieszanym stosuje się różne metody i techniki wnioskowania.

Genezowanie odgrywa podstawową role w badaniach wypadków i awarii lotniczych [5, 9], a także niesprawności i uszkodzeń zespołów i części statków powietrznych czyli zdarzeń niepożądanych. Odgrywa także dużą rolę w badaniu stanu bezpieczeństwa systemów, a w lotnictwie stanu bezpieczeństwa lotów. Wyniki takich badań są podstawą opracowania przedsięwzięć profilaktycznych [3].

Zdarzenie niepożądane jest to zdarzenie, którego zajście w rozpatrywanym fragmencie człowiek – statek powietrzny – otoczenie (C-SP-O) wywołuje w efekcie zagrożenie dla chronionych dóbr.

# 3. GENEZOWANIE WYPADKU LOTNICZEGO

Genezowanie wypadku lotniczego ma w wyniku doprowadzić do jednoznacznego lub najprawdopodobniejszego wskazania przyczyny zaistniałej sytuacji, ma też wskazać ciąg zdarzeń przyczynowo – skutkowych lub równoległych (albo mieszanych), które w konsekwencji doprowadziły do katastrofy lub awarii lotniczej. Zadania powyższe rozwiązuje się poprzez genezowanie stanu technicznego sprzętu lotniczego i działania systemów, podsystemów i ludzi uczestniczących procesie realizacji zadania lotniczego w w przedziale czasu, w którym miał miejsce wypadek. Wypracowany wynik końcowy w postaci orzeczenia ma służyć wskazaniu rzeczywistej (bezpośredniej i podstawowej głównej) przyczyny zdarzenia oraz opracowania metod, narzędzi i procedur profilaktycznych dających maksimum gwarancji zapobieżeniu podobnym zdarzeniom w przyszłości.

Genezowanie wypadków lotniczych można przeprowadzić jedną z następujących metod:

- drzewa uszkodzeń [1];
- Monte Carlo [1];

- modelowania matematycznego np. metodą probabilistyczną [8];
- intuicyjno analityczna.

Realizacja zadań w procesie genezowanie wymaga szeregu działań wspomagających realizowanych według zasad działań systemowych i odpowiedniej algorytmizacji dla sekwencji zdarzeń eksploatacyjnych [4, 7]. Do najważniejszych z nich zalicza się:

- 1. Przestrzeganie zasad prowadzenia analiz przyczynowo – skutkowych.
- 2. Odpowiednia organizacja prowadzenia badań.
- 3. Stosowanie właściwych procedur analitycznych.
- Dokładne zbadanie danych z pokładowych rejestratorów i urządzeń obiektywnej kontroli lotu.
- 5. Opracowanie danych medycznych.
- 6. Wykonanie dokumentacji fotograficznej i faktograficznej.
- 7. Użycie narzędzia badawczego, jakim jest metoda wspomagania decyzyjnego.

W poszczególny fazach genezowania zdarzenia nieporządnego – wypadku lotniczego należy wykorzystać następujące materiały:

- Charakterystyki uszkodzeń metalu i materiałów nie metalicznych; kompozytów, tworzyw sztucznych itp.;
- Instrukcje, dokumentację i instrukcje sprzętu lotniczego;
- Właściwości i własności materiałów użytych w wykonaniu konkretnego (badanego) statku powietrznego;
- probabilistyczne wskaźniki bezpieczeństwa lotów.

Metody wspomagania decyzyjnego obejmują pewne zasady i sposoby posługiwania się nimi w celu osiągnięcia zakładanego wyniku, bądź dojścia do wyniku najlepiej udokumentowanego. Zasady te, to zalecenia, wytyczne i wskazówki, prawidłowości i reguły określające najracjonalniejsze sposoby działania w celu osiągnięcia wyniku – opracowane teoretycznie i zweryfikowane praktycznie [5].

Zasady i reguły wykorzystywane w badaniach wypadków lotniczych, obejmują związki między dwoma pojęciami lub większą ich liczbą i umożliwiają:

- przewidywanie skutków zdarzeń;
- wyjaśnienie zdarzeń (określanie skutków na podstawie przyczyn);
- Kontrolowanie przebiegu zdarzeń i wpływanie na ich przebieg (poprzez ustanowienie warunków, w jakich te zdarzenia występują);
- rozwiązywanie problemów profilaktyki.



Rys. 1. Graf procesu możliwych sytuacji w locie statku powietrznego (opis w tekście)

## 4. PRAWDOPODOBIEŃSTWO BEZPIECZNEGO LOTU

Badanie – genezowanie wypadku lotniczego wymaga czasami obliczenia prawdopodobieństw zrealizowania bezpiecznego lotu. Obliczenia takiego prawdopodobieństwa można dokonać analizując graf możliwych sytuacji w locie statku powietrznego (rys. 1). Graf przedstawia proces lotu z przejściem jednego stanu w następny (kółka). Dla dalszych rozważań przyjęto następujące oznaczenia: ACZ i ACZ – stan pojawienia się lub braku czynnika zakłócającego lot; BP i  $\overline{BP}$  - stan odparowania przez załogę czynnika zakłócającego lot, AP i AP – możliwy pomyślny stan końcowy bezpiecznego lotu i niepomyślny. Prawdopodobieństwo bezpiecznego lotu  $P_{BLo}$  zależy od rozwoju możliwych sytuacji.

- 1. Nie pojawia się żaden czynnik powodujący zagrożenie lotu (stan ACZ). Prawdopodobieństwo  $P_{BL}$  jest funkcją czasu  $P_{BL}(t)$  i  $P_{BL} = P_{ACZi}$  (gdzie i możliwy *i*-ty czynnik zakłócający lot). Wówczas:  $P_{BLo} = P(ACZ)$ .
- 2. Pojawia się *i*-ty czynnik zakłócający (stan  $\overline{ACZ}$ ) z prawdopodobieństwem  $q_{ACZi}$ . Pilot stan ten może poprawić (stan BP) lub nie (stan  $\overline{BP}$ ). Prawdopodobieństwo bezpiecznego lotu ma wartość:

$$P_{BLo}\left(\overline{ACZ_i}, BP\right) = q_{\overline{ACZ_i}} p\left(BP / \overline{ACZ_i}\right)$$
 (1)

Jeżeli sytuacja rozwinie się dalej niekorzystnie 3. i doprowadza to do stanu wypadku lotniczego (oznaczenia AP). Pilot może swoim działaniem nie dopuścić do stanu katastroficznego (stan AP). Stanom tym przypisuje się odpowiednie prawdopodobieństwo cząstkowe:  $q(AP_i/BP)$  i  $p(AP_i/\overline{BP})$ . Prawdopodobieństwo  $P_{Bloi}$ w tym przypadku ma postać (dla *i*-tego czynnika zakłócającego):

$$P_{BLo_i} = 1 - Q_{BLo} \tag{2}$$

$$Q_{BLo_i} = q \, \frac{1}{ACZ_i} q \left( \overline{AP} / \overline{ACZ_i} \right) q \left( \overline{AP}_i / \overline{BP} \right) \, (3)$$

$$P_{BLo_i} = p \frac{1}{ACZ_i} + \left(1 - p_{ACZ_i}\right) p\left(\overline{BP} / \overline{ACZ_i}\right)$$
(4)

I dla wszystkich możliwych czynników zakłócających lot (i = [1, N]) prawdopodobieństwo bezpiecznego lotu wyrazi się następująco:

$$P_{BLo}(t) = \prod_{i=1}^{N} \begin{cases} p_{ACZ_i}(t) + \\ [1 - p_{ACZ_i}(t)] p_i(BP / ACZ_i) \end{cases}$$
(5)

W wyrażeniu (5) zapisano prawdopodobieństwa z zaznaczeniem, że mogą one być (i rzeczywiście są) funkcjami czasu.

Jeżeli zawęzi się przyczynę wypadku lotniczego do możliwych do zaistnienia uszkodzeń i niesprawności w liczbie M, którym załoga (pilot) może przeciwdziałać (skorygować, odparować) lub nie może, o prawdopodobieństwach cząstkowych  $p_{ui}$ , to prawdopodobieństwo bezpiecznego lotu można zapisać następująco:

$$P_{TBLo}(t) = \prod_{j=1}^{M} \begin{cases} p_{u_j}(t) + \\ \left[1 - p_{u_j}(t)\right] p_j \left(BP / \overline{USZ}_i\right) \end{cases}$$
(6)

gdzie:  $p_j(BP/USZ_j)$  – jest cząstkowym prawdopodobieństwem przeciwdziałania (skorygowania) po wystąpieniu *j*-tego uszkodzenia lub niesprawności.

W praktyce zespół możliwych głównych (decydujących) niekorzystnych czynników

inicjujących zdarzenia niepożądane można zgrupować w pięć podstawowych grup, którym można przypisać odpowiednie prawdopodobieństwa niezawodności (*P*) i zawodności (*Q*). Wyróżnia się następujące grupy:

- 1. Charakterystyki lotne, aerodynamiczne (stateczność, wytrzymałość, flatter, itp.) statku powietrznego (SP)
- $P_A$  prawdopodobieństwo utrzymania charakterystyk lotnych, aerodynamicznych w odpowiednich, dopuszczalnych granicach;
- $Q_A$  prawdopodobieństwo przeciwstawne  $(Q_A = 1 P_A).$
- 2. Charakterystyka niezawodnościowa SP
- $P_R$  prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy SP;
- $Q_R$  prawdopodobieństwo stanu awaryjnego SP.
- Charakterystyki bezawaryjnej pracy otoczenia organizacyjnego (naziemnej obsługi, kierowania lotami, zakładów remontowych) przy braku błędów załogi

 $P_N$  – prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy otoczenia organizacyjnego. Prawdopodobieństwo to w praktyce posiada składowe prawdopodobieństwa:  $P_{NO}$  – naziemnej obsługi, remontów, napraw, jako wynik bezbłędnych lub błędnych działań;  $P_{NS}$  – naziemnych systemów zabezpieczenia (ubezpieczenia) lotów;

- $Q_N$  prawdopodobieństwo awarii wymienionych wyżej składowych.
- 4. Charakterystyki pilotażowe członków załogi (pilota), wyrażające się bezbłędnym pilotowaniem i użytkowaniem<sup>1</sup> SP
- $P_P$  prawdopodobieństwo bezbłędnego działania (czynności) załogi;
- $Q_P$  prawdopodobieństwo błędów załogi.
- 5. Charakterystyki przyrodniczometeorologiczne, tzw. zewnętrzne (burza, grad, ptaki, itp.)
- $P_Z$  prawdopodobieństwo korzystnych warunków zewnętrznych;
- $Q_z$  prawdopodobieństwo niekorzystnych warunków zewnętrznych.

Prawdopodobieństwo bezpiecznego lotu  $P_{Blo}$  można zapisać następująco:

$$P_{BLo} = P_A P_R P_R P_P P_Z \tag{7}$$

gdzie:

$$P_{A} = \prod_{s=1}^{S} \left[ P_{A_{s}} + Q_{A_{s}} P_{s} \left( KR / AW \right) \right]$$
(8)

$$P_{R} = \prod_{i=1}^{I} \left[ P_{R_{i}} + Q_{R_{i}} P_{i} (KR / AW) \right]$$
(9)

$$P_{N} = \prod_{j=1}^{J} \left[ P_{N_{j}} + Q_{N_{j}} P_{j} (KR / AW) \right]$$
(10)

$$P_{P} = \prod_{k=1}^{K} \left[ P_{P_{k}} + Q_{P_{k}} P_{k} (KR / BL) \right]$$
(11)

$$P_{Z} = \prod_{l=1}^{L} \left[ P_{Z_{l}} + Q_{Z_{l}} P_{l} (KR / AW) \right]$$
(12)

- P<sub>s</sub>(KR/AW), P<sub>i</sub>(KR/AW), P<sub>j</sub>(KR/AW), P<sub>l</sub>(KR/AW)– prawdopodobieństwa warunkowe korygowania (KR – parowania, przeciwdziałania) przez załogę s-tego zaburzenia charakterystyk aerodynamiczno-lotnych i wytrzymałościowych SP, *i*-tej awarii niezawodnościowej SP, *j*-tej awarii środków naziemnych, *l*-tego wpływu niekorzystnych warunków zewnętrznych doprowadzających do awarii (AW);
- *P<sub>k</sub>(KR/BŁ)* prawdopodobieństwa warunkowe korygowania przez załogę *k*-tego błędu.

Jeżeli poszczególnym przejściom z jednego stanu do innego stanu (rys. 1) przypisze się odpowiednie intensywności przejść ( $\lambda_i$ ,  $\mu_i$ ) dla różnych *i*-tych czynników zakłócających, to można ułożyć na  $P_{Blo}$  odpowiednie równania różniczkowe.

## **5. PODSUMOWANIE**

Badanie – genezowanie wypadków lotniczych wykonane według przedstawionych zasad pozwoliło wykrycie przyczyn ich zaistnienia między innymi w następujących przypadkach:

- Niewłaściwe lądowanie samolotu A-320 na Okęciu w 1993 r. Katastrofa w wyniku poślizgu.
- 2. Twarde lądowanie samolotu *B-767* na Okęciu w 1993 r. Awaria i uszkodzenie kadłuba.
- 3. Katastrofa samolotu DC-10 w USA 1989 r.
- 4. Katastrofa samolotu Il-62 na Okęciu w 1980 r.

W pierwszym przypadku wykryto konieczność zmodyfikowania oprogramowania komputera pokładowego. W drugim stwierdzono fakt możliwych większych obciążeń eksploatacyjnych płatowca konstrukcji niż to zakładano W trzecim obliczeniach projektowych. w przypadku po raz pierwszy pilot dokonał lądowania sterując samolotem za pomocą zmiany ciągu silników (rys. 2). A w czwartym wykazano wady konstrukcyjno - technologiczne co w połączeniu z zaistniałą w 1986 r. drugą katastrofą takiego samego samolotu doprowadziło do wycofania tych samolotów z eksploatacji w PLL LOT.

Na podstawie analizy wielu katastrof i awarii statków powietrznych (tabela 1) stwierdza się, że w łańcuchu przyczynowo – skutkowym przyczyną główną (podstawową) doprowadzającą do wypadku lotniczego jest czynnik ludzki (człowiek).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Niepoprawnie używa się terminu "eksploatowanie" SP. Z wiedzy zawartej w zestawie książek "*Podstawy eksploatacji* statków powietrznych", t. 1, t. 2 [4, 5]; termin "eksploatowanie" zawiera "użytkowanie" SP przez pilota.


Rys. 2. Katastrofa samolotu DC-10

A – sylwetka samolotu DC-10; B – symulacja rozpadającego się silnika; C – dolot samolotu do lotniska sterowany zmianą ciągu pozostałych dwóch silników; D – symulacja rozpadania się samolotu w wyniku tzw. twardego lądowania; E – tylna część samolotu po katastrofie; F – symulacja uszkodzonych instalacji hydraulicznych; G – odnalezione części dysku wentylatora; H – miejsce inicjacji pęknięcia zmęczeniowego

Genezowanie w konsekwencji poprzez analizę odpowiednich wskaźników (tabela 2) umożliwia

- identyfikację zmian bezpieczeństwa systemu technicznego i antropotechnicznego;
- dostrzegać nie pożądane tendencje zmian stanu bezpieczeństwa;
- operatywne zapobieganie nie pożądanym zmianom stanu bezpieczeństwa i modyfikację systemu przez profilaktykę;
- planowanie zmian technicznych i organizacyjnych, modyfikację systemu z punktu widzenia bezpieczeństwa.

Genezowanie stanu systemu poprzez badanie wypadków lotniczych doprowadza do opracowania odpowiednich przedsięwzięć profilaktycznych. Działania profilaktyczne generują do rozważań dwa następujące problemy, które powinny być rozwiązywane z wynikiem pozytywnym:

- Czy ogół działań profilaktycznych podejmowanych pod kątem maksymalnego poziomu bezpieczeństwa doprowadza do obniżenia negatywnych a podwyższenia pozytywnych wskaźników bezpieczeństwa?
- 2. Czy ogół działań profilaktycznych podejmowanych pod kątem maksymalnego poziomu bezpieczeństwa doprowadza do zmniejszenia dyspersji przyczyn powodujące stany zagrożenia bezpieczeństwa?

		_					1		1							
Tabela 1 niki i eksploatacji	Uwagi	8	Rys. 3.5 i 3.6 <sup>г51</sup>	[c] w	Rys. 1.21 w [4]		Rys. 3.51 w [5]			Rys. 3.50 w [5]	Samolot wy- Iadoweł dzieki	sterowaniu	ciagiem sil-	ników.	Rys. 3.49 w [5]	
strof i awarii zależnych od czynnika tech	Opis przyczyny podstawowej i czynnika sprawczego	2	Techniczna – wadliwy system łączności z kierownikiem ruchu lot-	Inczego. Eksploatacyjna – wynikająca z presji na człowieka-pilota w zakresie ekonomicznych skutków opóźnień w locie	Produkcyjna. Niedoskonały proces produkcyjny: wykonania (inicjacja	karku zmęczeniowego) i brak kontroli jakości w technologii produkcji. Czynnik sprawczy: technolog-człowiek.	Remontowa – zmiana technologii remontu przez człowieka-tech-	nologa.	Eksploatacyjna – niewłaściwa	diagnostyka w pracach okresowych przez człowieka-diagnostę.	Produkcyjna. Niedoskonały proces	człowieka-technologa.	Eksploatacyjna. Niewykrycie	pęknięcia w czasie prac diagno-	stycznych przez człowieka-	uagirostę.
dstawowych niektórych katas	Przyczyna bezpośrednia	9	Techniczno-eksplo- atacyjna. Błąd pilota vr M brów, nodiał	ALIVI, KUUY PUUJA decyzję o starcie, mimo że nie otrzymał wyraźnej zgody na start	Techniczna. Rozerwanie dysku turbiny w wyniku	zmęczeniowego pęk- nięcia wału silnika.	Techniczna. Rozerwanie się przegrody	cišnieniowej (rozher- metyzowanie samolotu) w wyniku pęknięcia zmęczeniowego.	Techniczna. Pęknięcie	zmęczeniowe wzdłuż nitów poszycie kadłuba.	Techniczna. Roz-	wentylatora w wyniku	pęknięcia	zmęczeniowego, którego	inicjację rozpoczęło	produkcji.
przyczyn bezpośrednich i poc	Charakterystyka sytuacji wypadku	Ś	Startujący samolot <i>B-747</i> linii KLM uderza w znaj- duitovy eie na pasie star-	uljący און און איז	Uszkodzenie sterów kierunku i wysokości.		Oderwanie się tylnej części samolotu, steru kierunku i	wysokości.	Oderwanie się części	górnej kadłuba samolotu.	Uszkodzenia systemów bydraulioznych przez	rozpadające się części	dysku wentylatora	wyeliminowały możliwość	wykorzystania sterów	SallOlotu.
Zestawienie	Kategoria czynnika: T – techniczna; E-eksploatacyjna	4	T/E		L		T			Τ	F	-				
	Rok	3	1977		1980		1985			1988	1080	1001				
	Opis katastrofy (K) lub awarii (A)	2	(K) Zderzenie dwóch comolotów twm	Teneryfie. Tallou typu Teneryfie.	(K) Upadek samolotu <i>II-62</i>	Kopernik.	(K) Zderzenie samolotu $B-747$	linii <i>JAL</i> z górą w Japonii.	(K) Lądowanie	samolotu <i>B-737</i> na Hawajach.	(K) Lądowanie	z uszkodzonym	systemem	sterowania.		
	Lp.	1	1.		5.		ω.		4.		5.					

74

# DIAGNOSTYKA'3 (39)/2006 LEWITOWICZ, Genezowanie zdarzeń eksploatacyjnych

viek, któr na sar oiorników ostaci telew nie pr. zeciążenia zanstalował	. <u>2 2 4</u>	w <sup>z</sup> er no <sup>y</sup> w	w moloc noloc vizorć zelicz sie w sie któ któ	y p noloci energ energ seiczy siec w siec w siec v siec log.	y po molocie energii /izorów zeliczył sieci w sieci który log.	w molocie energii /izorów zeliczył sieci w sieci jakości który log. na.	w mou y po u nolocie s energii F izorów g zeliczył H sieci z w sieci 1 który z log. na.	w mucu nolocie se energii pi izzorów g zeliczył p sieci z sieci z jakości P który z który z eczenie n eczenie n uktora p	v milou ru molocie sa energii pa izzorów gd zeliczył po zeliczył po zeliczył po zeliczył po do do do do do do do do do do do do do	v mucu rund v po urat nolocie sam energii pass izorów gdy zeliczył pojs sieci naty w sieci naty dok dok który zgir który zgir log. na. Pilc eczenie na é eczenie na é eczenie na é tycł tycł	v murator molocie samo energii pasaz izorów gdyb zeliczył pojaw sieci natyc hądow jakości Pilot który zginą tychn eczenie na ew ej kra- rozwi uktora pożar uktora pożar tychn	v mucu tructu v molocie samolo energii pasaže izzorów gdyby seliczył pojawi sieci znamio w sieci natych jakości Pilot s który zginął log. Pilot n eczenie na ewi ej kra- rozwir uktora pożaru tychmi tychmi	<ul> <li>w micu vintou vintou nalocie samolo energii pasažel jizorów gdyby zeliczył pojawi sieci znamic w sieci natychu jakości Pilot sz który zginął.</li> <li>lądowa dokony zginął.</li> <li>log.</li> <li>Pilot ni ewe ej kra- rozwin uktora pożaru uktora pożaru tychmi tychmi tychmi tychmi</li> </ul>	v mucu ratow molocie samolc energii pasaže rizorów gdyby zeliczył pojawi sieci natych jakości Pilot s który zginął. Jakości Pilot s ej kra- rozwin eczenie na ewe ej kra- rozwin uktora pożaru t. Nie samolc owania Lądow
iu odl (w p <sup>u</sup> ) prz i nie z	<ul> <li>iu na sa odbiorników</li> <li>(w postaci telev</li> <li>i) nie pi przeciążenia</li> <li>i nie zainstalowa</li> </ul>	u na samo odbiorników er (w postaci telewiz ) nie przel przeciążenia i nie zainstalował w Brak kontroli ja	<ul> <li>iu na samoloc odbiorników energ (w postaci telewizorć ) nie przelicz przeciążenia sie inie zainstalował w sie</li> <li>a. Brak kontroli jakoć produkcyjnym, któ człowiek-technolog.</li> </ul>	<ul> <li>iu na samoloci odbiorników energ (w postaci telewizoróń</li> <li>nie przeliczy przeciążenia siec i nie zainstalował w siec</li> <li>a Brak kontroli jakośc produkcyjnym, któr</li> </ul>	<ul> <li>iu na samolocie odbiorników energii (w postaci telewizorów</li> <li>nie przeliczył przeciążenia sieci nie zainstalował w sieci</li> <li>a Brak kontroli jakości produkcyjnym, który</li> <li>człowiek-technolog.</li> </ul>	<ul> <li>iu na samolocie odbiorników energii</li> <li>(w postaci telewizorów</li> <li>) nie przeliczył przeciążenia sieci nie zainstalował w sieci produkcyjnym, który</li> <li>człowiek-technolog.</li> <li>ino-technologiczna.</li> </ul>	<ul> <li>iu na samolocie s odbiorników energii</li> <li>i odbiorników energii</li> <li>mie przeliczył</li> <li>przeciążenia sieci</li> <li>przeciążenia sieci</li> <li>i Brak kontroli jakości</li> <li>produkcyjnym, który</li> <li>człowiek-technolog.</li> <li>osi koła na ostrej kra-</li> </ul>	<ul> <li>iu na samolocie se odbiorników energii p (w postaci telewizorów g/ ) nie przeliczył p przeciążenia sieci zi la d d d d</li> <li>Brak kontroli jakości P produkcyjnym, który z produkcyjnym, który z człowiek-technolog.</li> </ul>	<ul> <li>iu na samolocie sa odbiorników energii pa (w postaci telewizorów gd ) nie przeliczył pc przeciążenia sieci na przeciążenia sieci na dd dd brak kontroli jakości Pi produkcyjnym, który zg człowiek-technolog.</li> <li>23). Błąd konstruktora pc osi koła na ostrej kra- ro osi koła na ostrej kra- ro sa i technologa. Nie sa metody diaonozowania 1 s</li> </ul>	<ul> <li>iu na samolocie san odbiorników energii pas (w postaci telewizorów gdy)</li> <li>inie przeliczył poj przeciążenia sieci nat lądd dok</li> <li>in Brak kontroli jakości Pile produkcyjnym, który zgi człowiek-technolog.</li> <li>ino-technologiczna.</li> <li>pile ino-technologiczna.</li> <li>in technologa. Nie sar metody diagnozowania Lą</li> </ul>	<ul> <li>iu na samolocie san odbiorników energii pas (w postaci telewizorów gdy)</li> <li>inie przeliczył poj przeciążenia sieci nat ląd dok</li> <li>i.zr</li> <li>i.zr</li> <li>i.dok</li> <li>i.zr</li> &lt;</ul>	<ul> <li>iu na samolocie san odbiorników energii pas (w postaci telewizorów gdy ) nie przeliczył poj przeciążenia sieci nat nak kontroli jakości Pila produkcyjnym, który zgi człowiek-technolog.</li> <li>53). Błąd konstruktora poż a i technologiczna. Nie san metody diagnozowania Ląt znego osi kół.</li> </ul>	<ul> <li>iu na samolocie san odbiorników energii pas (w postaci telewizorów gdy)</li> <li>nie przeliczył poj przeciążenia sieci nat ląd dok</li> <li>Brak kontroli jakości Pili produkcyjnym, który zgi człowiek-technolog.</li> <li>S3). Błąd konstruktora</li> <li>S3). Błąd konstruktora</li> <li>poś a i technologa. Nie metody diagnozowania Lą</li> </ul>	<ul> <li>iu na samolocie san odbiorników energii pas (w postaci telewizorów gdy)</li> <li>nie przeliczył poj przeciążenia sieci nat ląd dok</li> <li>Brak kontroli jakości Pili produkcyjnym, który zgi człowiek-technolog.</li> <li>Dilane zabezpieczane na osi koła na ostrej kra- netody diagnozowania Ląt znego osi kół.</li> </ul>
dodatkowych odł elektrycznej (w p pokładowych) możliwości pr elektrycznej i nie z	dodatkowych odbiorniko elektrycznej (w postaci 1 pokładowych) nie możliwości przeciąże elektrycznej i nie zainstalu bezpiecznika.	dodatkowych odbiorniko elektrycznej (w postaci 1 pokładowych) nie możliwości przeciąże elektrycznej i nie zainstalo bezpiecznika. <b>Produkcyjna</b> . Brak kon	dodatkowych odbiorniko elektrycznej (w postaci 1 pokładowych) nie możliwości przeciążej elektrycznej i nie zainstalo bezpiecznika. Produkcyjna. Brak kon w procesie produkcyji przygotował człowiek-tec	dodatkowych odbiorniko elektrycznej (w postaci 1 pokładowych) nie możliwości przeciążel elektrycznej i nie zainstał bezpiecznika. <b>Produkcyjna</b> . Brak kon w procesie produkcyji przygotował <b>człowiek-tec</b>	dodatkowych odbiorniko elektrycznej (w postaci 1 pokładowych) nie możliwości przeciążel elektrycznej i nie zainstak bezpiecznika. Produkcyjna. Brak koni w procesie produkcyji przygotował człowiek-tec Konstrukcyjno-technolo	dodatkowych odbiorniko elektrycznej (w postaci t pokładowych) nie możliwości przeciążej elektrycznej i nie zainstalo bezpiecznika. <b>Produkcyjna</b> . Brak koni w procesie produkcyj przygotował <b>człowiek-tec</b> Konstrukcyjno-technolo Nieodpowiednie zał	dodatkowych odbiorniko elektrycznej (w postaci t pokładowych) nie możliwości przeciążej elektrycznej i nie zainstalo bezpiecznika. <b>Produkcyjna</b> . Brak koni w procesie produkcyjr przygotował <b>człowiek-te</b> <b>Konstrukcyjno-technolo</b> Nieodpowiednie zał powierzchni osi koła na	dodatkowych odbiorniko elektrycznej (w postaci t pokładowych) nie możliwości przeciążel elektrycznej i nie zainstał bezpiecznika. <b>Produkcyjna</b> . Brak koni w procesie produkcyjr przygotował <b>człowiek-tec</b> przygotował <b>człowiek-tec</b> Nieodpowiednie zał powierzchni osi koła na wędzi (rys. 3.53). Błąd ko	dodatkowych odbiorniko elektrycznej (w postaci 1 pokładowych) nie możliwości przeciążel elektrycznej i nie zainstalk bezpiecznika. <b>Produkcyjna</b> . Brak koni w procesie produkcyji przygotował <b>człowiek-tec</b> Monstrukcyjno-technolo Nieodpowiednie zat powierzchni osi koła na wędzi (rys. 3.53). Błąd ko owracowano metody dia	dodatkowych odbiorniko elektrycznej (w postaci t pokładowych) nie możliwości przeciążej elektrycznej i nie zainstalo bezpiecznika. <b>Produkcyjna</b> . Brak koni w procesie produkcyji przygotował <b>człowiek-tec</b> przygotował <b>człowiek-tec</b> Nieodpowiednie zał powierzchni osi koła na wędzi (rys. 3.53). Błąd <b>k</b> - <b>człowieka i techn</b> opracowano metody dia stanu technicznego osi kó	dodatkowych odbiorniko elektrycznej (w postaci t pokładowych) nie możliwości przeciążel elektrycznej i nie zainstał bezpiecznika. <b>Produkcyjna</b> . Brak koni w procesie produkcyjr przygotował <b>człowiek-tec</b> <b>Produkcyjno-technolo</b> Nieodpowiednie zat powierzchni osi koła na wędzi (rys. 3.53). Błąd ko netodpowiednie zat powierzchni osi koła na wędzi (rys. 3.53). Błąd ko stanu technicznego osi kó	dodatkowych odbiorniko elektrycznej (w postaci 1 pokładowych) nie możliwości przeciążel elektrycznej i nie zainstalk bezpiecznika. Produkcyjna. Brak kont w procesie produkcyji przygotował człowiek-tec przygotował człowiek-tec Nieodpowiednie zał powierzchni osi koła na wędzi (rys. 3.53). Błąd ko opracowano metody dia stanu technicznego osi kó	dodatkowych odbiorniko elektrycznej (w postaci 1 pokładowych) nie możliwości przeciążel elektrycznej i nie zainstalk bezpiecznika. <b>Produkcyjna</b> . Brak kont w procesie produkcyji przygotował <b>człowiek-tec</b> Monstrukcyjno-technolo Nieodpowiednie zał powierzchni osi koła na wędzi (rys. 3.53). Błąd ko - człowieka i techno opracowano metody dia stanu technicznego osi kó	dodatkowych odbiorniko elektrycznej (w postaci 1 pokładowych) nie możliwości przeciążen elektrycznej i nie zainstalk bezpiecznika. <b>Produkcyjna</b> . Brak kont w procesie produkcyji przygotował <b>człowiek-tec</b> Nieodpowiednie zał powierzchni osi koła na wędzi (rys. 3.53). Błąd <b>k</b> - <b>człowieka i techn</b> opracowano metody dia stanu technicznego osi kó
wopalnych elektryc amolotu. pokłado możliwc elektryc	wopalnych elektryc amolotu. pokłado możliwc elektryc bezpiec	wopalnych elektryc amolotu. pokłado możliwc elektryc bezpieci Pęknięcie <b>Produk</b>	iwopalnych elektryc amolotu. pokłado możliwc elektryc bezpieci Pęknięcie <b>Produk</b> trzpienia w pro skrzydła przygot	wopalnych elektryc amolotu. pokłado możliwc elektryc bezpiec Pęknięcie <b>Produk</b> trzpienia w prod skrzydła przygoti adłubie.	iwopalnych elektryc amolotu. pokłado możliwc elektryc bezpiec: Pęknięcie Produk trzpienia w prod skrzydła przygoti adłubie. Konstri	iwopalnych elektryc amolotu. pokłado możliwc elektryc bezpiec: Pęknięcie <b>Produk</b> trzpienia w prod skrzydła przygoti adłubie. <u>Konstr</u> jednego z Nieodpc	iwopalnych elektryc amolotu. pokłado możliwc elektryc bezpieci pezpieci trzpienia w prod skrzydła przygot adłubie. <u>Konstr</u> i jednego z Nieodpć	iwopalnych elektryc amolotu. pokłado pokłado nozliwc elektryc bezpiec: bezpieci bezp	iwopalnych elektryc amolotu. pokłado możliwc elektryc bezpiec: bezpieci bez	iwopalnych elektryc amolotu. pokłado możliwc elektryc bezpieci pezpiecie Produk trzpienia w prod skrzydła przygot adłubie. Nieodpć odwozia w powierz pęknięcia wędzi (i go osi koła, - czło	iwopalnych elektryc amolotu. pokłado możliwc elektryc bezpiec: Produk trzpienia w prod skrzydła przygoti adłubie. <u>Konstri</u> jednego z Nieodpć odwozia w powierz pęknięcia wędzi (1 powierz wędzi (1) powierz wędzi	iwopalnych elektryc amolotu. pokłado możliwc elektryc bezpiec: peknięcie Produk trzpienia w prod skrzydła przygoti adłubie. <u>Konstri</u> jednego z Nieodpć odwozia w powierz pęknięcia w ewierz pęknięcia - czło	iwopalnych elektryc amolotu. pokłado możliwc elektryc bezpiecz bez	iwopalnych elektryc amolotu. pokłado możliwc elektryc bezpiecz bez
materiatow tatw w strukturze sat	matchatow tauw w strukturze sat	Techniczna.	materitatow tatw w strukturze san <b>Techniczna</b> . zmęczeniowe mocującego	w strukturze san w strukturze san <b>Techniczna</b> . zmęczeniowe mocującego szybowca w ka	materitatow tauw w strukturze san <b>Techniczna</b> . zmęczeniowe mocującego szybowca w ka <b>Techniczna</b> .	w strukturze sai w strukturze sai <b>Techniczna</b> . zmęczeniowe mocującego szybowca w ka <b>Techniczna</b> .	w strukturze san w strukturze san <b>Techniczna</b> . zmęczeniowe mocującego szybowca w ka Uszkodzenie j kół lewego po	w strukturze sau w strukturze sau Techniczna. zmęczeniowe mocującego szybowca w ka Uszkodzenie j kół lewego po wyniku	w strukturze san w strukturze san <b>Techniczna</b> . zmęczeniowe mocującego szybowca w ka, Uszkodzenie j kół lewego po wyniku zmęczenioweg(	<ul> <li>matchiatow tauw w strukturze san w strukturze san</li> <li>Techniczna.</li> <li>zmęczeniowe mocującego mocującego szybowca w kał</li> <li>Uszkodzenie j kół lewego po wyniku</li> <li>zmęczenioweg( powstałe w rozwinięcia si</li> </ul>	w strukturze sau w strukturze sau <b>Techniczna.</b> zmęczeniowe mocującego szybowca w ka Uszkodzenie j kół lewego po wyniku zmęczenioweg( powstałe w rozwinięcia si chemicznej,	w strukturze sau w strukturze sau <b>Techniczna.</b> zmęczeniowe mocującego szybowca w ka Uszkodzenie j kół lewego po wyniku zmęczenioweg( powstałe w rozwinięcia si chemicznej, czynnikiem spr	w strukturze san w strukturze san <b>Techniczna</b> . zmęczeniowe mocującego szybowca w ka. Uszkodzenie j kół lewego po wyniku zmęczenioweg powstałe w rozwinięcia si chemicznej, czynnikiem spr	w strukturze san w strukturze san Techniczna. zmęczeniowe mocującego szybowca w ka Uszkodzenie j kół lewego po wyniku zmęczenioweg( powstałe w rozwinięcia si chemicznej, czynnikiem spr była
		W locie nad miastem na-	W locie nad miastem na- stępuje urwanie skrzydła, co powoduje upadek	W locie nad miastem na- stępuje urwanie skrzydła, co powoduje upadek szybowca.	W locie nad miastem na- stępuje urwanie skrzydła, co powoduje upadek szybowca. W czasie startu zauważono	W locie nad miastem na- stępuje urwanie skrzydła, co powoduje upadek szybowca. W czasie startu zauważono palące się podwozie.	W locie nad miastem na- stępuje urwanie skrzydła, co powoduje upadek szybowca. W czasie startu zauważono palące się podwozie.	W locie nad miastem na- stępuje urwanie skrzydła, co powoduje upadek szybowca. W czasie startu zauważono palące się podwozie.	W locie nad miastem na- stępuje urwanie skrzydła, co powoduje upadek szybowca. W czasie startu zauważono palące się podwozie.	W locie nad miastem na- stępuje urwanie skrzydła, co powoduje upadek szybowca. W czasie startu zauważono palące się podwozie.	W locie nad miastem na- stępuje urwanie skrzydła, co powoduje upadek szybowca. W czasie startu zauważono palące się podwozie.	W locie nad miastem na- stępuje urwanie skrzydła, co powoduje upadek szybowca. W czasie startu zauważono palące się podwozie.	W locie nad miastem na- stępuje urwanie skrzydła, co powoduje upadek szybowca. W czasie startu zauważono palące się podwozie.	W locie nad miastem na- stępuje urwanie skrzydła, co powoduje upadek szybowca. W czasie startu zauważono palące się podwozie.
		E	93 E	E 50	E E	93 T T T T 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	E E	93 T T T 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	93 T T T T T T T T T T T T T T T T T T T	E E E	93 T T T T	6 6 6	6 6 6	E E
		srzenie z	lerzenie z szybowca 1995 <i>StdSZD-</i>	derzenie z szybowca 1995 <i>StdSZD-</i> w	lerzenie z szybowca 1995 <i>StdSZD-</i> w twie. Awaryjne	lerzenie z szybowca 1995 <i>StdSZD-</i> w w wie. Awaryjne 1997	derzenie z szybowca 1995 <i>StdSZD-</i> w twie. Awaryjne 1997 dune 1997	derzenie z szybowca 1995 <i>StdSZD-</i> w awie. Awaryjne 1995 tu <i>B-767</i> LOT w	derzenie z szybowca 1995 <i>StdSZD-</i> w awie. Awaryjne 1997 anie 1997 tDT w bdu.	Zderzenie z a szybowca 1995 r StdSZD- w zawie. Awaryjne 1997 anie 1997 otu B-767 LOT w koku.	Zderzenie z a szybowca 1992 <i>r Std SZD-</i> w zawie. Awaryjne 1992 otu <i>B-767</i> totu <i>B-767</i> totu v koku.	Zderzenie z a szybowca 1993 <i>r StdSZD-</i> w zawie. Awaryjne 1995 otu <i>B-767</i> LOT w coku.	Zderzenie z a szybowca 1992 <i>r StdSZD-</i> w zawie. Awaryjne 1997, lotu <i>B-767</i> LOT w koku.	Zderzenie z a szybowca 1992 <i>w StdSZD-</i> w zawie. Awaryjne 1997. LOT w koku.
		SIZ	lerzc szy Std.	derze szy <i>Std.</i> wwie	lerze szy <i>Std.</i> Aw	lerze Std. Awie nie	lerze szy Std. Aw tu	derze szy <i>Std.</i> Aw tu tu LO	derze szy Sta. Aw Aw amie tu LO oku.	Zderze <sup>1</sup> Sta. <sup>2</sup> Sta. <sup>3</sup> Sta.	Zderze a szy r <i>Std.</i> Aw Aw amie otu LO LO toku.	Zderze a szy a szy Aw Aw anie otu LO LO coku.	Zderze a szy r <i>Std.</i> Aw vanie lotu LO' koku.	Zderze ią szy <i>w Std.</i> Aw vanie lotu LO' koku.

DIAGNOSTYKA'3 (39)/2006 LEWITOWICZ, Genezowanie zdarzeń eksploatacyjnych

\_\_\_\_

-	2	3	4	v	9	2	8
9.	(K) Zderzenie z ziemią samolotu <i>TS-11 Iskra</i> .	1998	Т	Niekontrolowany – samoistny lot samolotu.	<b>Techniczna</b> . Roz- łączenie się układu sterowania lotkami.	Remontowa – niewłaściwa kontrola jakości montażu. Braki w technologii, za która odpowiada człowiek- technolog.	Rys. 3.52 w [5]
10.	(K) Upadek w morze samolotu <i>MD-83</i> .	2001	Т	Uszkodzenie mechanizmu sterowania samolotem.	<b>Techniczna.</b> Uszkodzenie: zatarcie i rozczłonkowanie mechanizmów sterów wysokości i kierunku.	Eksploatacyjna, polegająca na odstąpieniu od norm konserwacji mechanizmu śrubowego sterowania sterem wysokości. Czynnik sprawczy; człowiek – dyrekcja przewoźnika.	Rys. 3.15 w [5]
11	(K) Upadek na ziemię śmigłowca <i>Mi-8</i> pod Warszawą.	2003	T	Wyłączenie się dwóch sil- ników prawie jednocześnie spowodowało utratę możli- wości lotu i upadek śmigłowca.	<b>Techniczna</b> . Wada systemu automatyki włączania zespołu przeciwoblodzeniowego w sytuacji powstania obładzania śmigłowca.	Konstrukcyjna. Nieodpowiednie umieszczenie przez <b>człowieka-</b> konstruktora czujników obładzania śmigłowca. Zainstalowano ręczne włączanie przez pilota systemu przeciwobłodzeniowego w przypadku nie zadziałania automatyki śmigłowca (rys. 3.65 w [5]	Wina po stronie konstruktora, który nie przewidział ergonomicznych możliwości pilota. Pilot skupiając swoją uwagę na pilota skupiając swoją uwagę na procesie lądo- wania w trud- nych warunkach nie jest w stanie obserwować innych zjawisk – wskaźników temperatury, obrotów, itp.
12.	<ul> <li>(A) Wstrzymany start samolotu</li> <li><i>Tu-154</i> na lotnisku w</li> <li>Kabulu.</li> </ul>	2005	Т	Kontrola ruchu lotniczego zauważyła w startującym samolocie uszkodzone koła. Start udało się wstrzymać.	<b>Techniczna</b> . Uszkodzone opony w trzech kołach podwozia głównego samolotu.	Eksploatacyjna. Uszkodzenie opon spowodował kątownik w dziurze w płycie pasa startowego. Czynnik sprawczy: człowiek utrzymujący stan pasa startowego.	

# Tabela 2

Probabilistyczne wskaźniki bezpieczeńs	stwa
--	------

Lp.	Określenie	Wskaźnik Dla populacij	Oszacowanie statystyczne
1	2	3	4
1	Prawdopodobieństwo czasu lotu do wystąpienia przesłanki do zdarzenia niepożądanego	Prawdopodobieństwo zdarzenia, że w przedziale czasu $P(T \ge t) = L(t) = \int_{t}^{\infty} f(\tau) d\tau$ $T - \text{zmienna losowa określająca czas}$ przebywania SP w stanie zdatności bez przesłanki	Dla ustalonej chwili <i>t</i> : $L(t) = \frac{n(t)}{n}, \text{ w którym:}$ $n(t) - \text{liczba SP, których w przedziale}$ $czasu (0, t) \text{ nie wystąpiła}$ $przesłanka$ $n - \text{liczba badanych SP}$
2	Prawdopodobieństwo przesłanki niebezpiecznej a) z winy technicznej b) z winy czynnika ludzkiego	Prawdopodobieństwo zdarzenia, że w przedziale czasu (<0, t>) nastąpi przesłanka P(t) = P(T < t) = 1 - R(t)	Dla ustalonej chwili $t P(t) = \frac{m(t)}{n}$ , w którym: m(t) - liczba powstałych przesłanek,w przedziale czasu (0, $t$ ) n - liczba badanych SP
3	Średni czas użytkowania SP do wystąpienia przesłanki zdarzenia niepożądanego MTTC	Wartość oczekiwana zmiennej losowej T $\Theta_1 = E(T_p) = \int_t^{\infty} tf(t) dt$ $T_p - zmienna losowa określona$ t - czas f(t) - funkcja gęstości	W przypadku, gdy badania przeprowadza się do chwili, w których wystąpiły przesłanki na wszystkich SP $\overline{\Theta}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$ , w którym n - liczba badanych SP
4	Średni czas lotu między kolejnymi momentami wystąpienia przesłanki zdarzenia niepożądanego <i>MTBC</i>	Wartość oczekiwana zmiennej losowej określającej czas lotu między dwoma kolejnymi momentami wystąpienia przesłanki: $\Theta_2 = E(T_k) = \int_t^\infty t f_k(t) dt$	W przypadku, gdy badania przeprowadza się do chwili, gdy na wszystkich SP powstały przesłanki $\overline{\Theta}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} t_{ki}$ , gdzie n - liczba badanych SP, z których każdy jest po (k-1) przesłance, naprawie (odnowie) $t_{ki}$ - czas przebywania <i>i</i> -tego SP w stanie zdatności od chwili zakończenia (k-1) – przesłanki do wystąpienia k-tej przesłanki

### LITERATURA

- Jaźwiński J., Borgoń J.: Niezawodność eksploatacyjna i bezpieczeństwo lotów. WKŁ, Warszawa 1989.
- [2] Drobiszewski J., Salamonowicz T., Smalko Z.: Wybrane problemy metodologii prognozowania technicznego. XXXI Szkoła Niezawodności, Szczyrk 2003.
- [3] Lewitowicz J.: Podatność eksploatacyjna statku powietrznego. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN, Z. 2 (134) Vol. 38, 2003.
- [4] Lewitowicz J.: *Podstawy eksploatacji statków* powietrznych – statek powietrzny i elementy teorii. T. 1. Wyd. ITWL, Warszawa 2001.
- [5] Lewitowicz J.: Podstawy eksploatacji statków powietrznych – systemy eksploatacji. T. 3. Wyd. ITWL. Warszawa 2006 (w druku).
- [6] Lewitowicz J.: Współczesne problemy diagnostyki samolotów i śmigłowców. Materiały
   6 Konferencji AIRDIAG' 99. Informator ITWL. Warszawa 2000.
- [7] Lewitowicz J., Kustroń K.: Podstawy eksploatacji statków powietrznych – własności i właściwości statku powietrznego.T.2. Wyd. ITWL. Warszawa 2003.
- [8] Szopa T.: Probabilistyczna metoda modelowania i badań wypadków. VII Konferencja Okrętownictwo i Oceanotechnika – Transport zintegrowany. Międzyzdroje 2004.
- [9] Zagdański Z.: Stany awaryjne statków powietrznych. Wyd. ITWL. Warszawa 1995.



Prof. dr hab. inż. Jerzy LEWITOWICZ. Absolwent Wojskowej Akademii Technicznej (1956r.) lotnictwo i Uniwersytetu Warszawskiego (1961r.) w zakresie fizyki jądrowej. Główne zainteresowania: rozwój najnowszej techniki wojskowej, w tym w szczególności lotniczej,

budowa i eksploatacja samolotów i śmigłowców ze szczególnym uwzględnieniem diagnostyki. Posiada ponad 50. letni staż naukowy i dydaktyczny w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych i na Politechnice Warszawskiej. Jest członkiem SIMP, AIAA, ICAS. Wieloletni członek trzech komitetów Polskiej Akademii Nauk: Fizyki, Budowy Maszyn, Badań Kosmicznych i Satelitarnych. W dorobku naukowym posiada ponad 300 publikacji naukowych; autor lub współautor 12, autor 27 wynalazków, ponad 300 opinii i recenzji naukowych, uczestnik ponad 100 konferencji naukowych i technicznych z udziałem czynnym. Laureat wielu nagród i wyróżnień naukowych w tym Mistrza Techniki Polskiej, rektora Politechniki Warszawskiej, "Błękitne Skrzydła", MON i MEN. Iniciator i organizator konferencji lotniczych, takich jak: AIRDIAG, FORUM SAMOLOTY, ŚMIGŁOWCE I SZYBOWCE".

# DIAGNOSTYKA PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH W WYBRANYCH STACJACH RADIOLOKACYJNYCH

Wojciech BREJWO, Jacek PAŚ

Instytut Systemów Elektronicznych Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, <u>wbrejwo@wat.edu.pl</u>, jpas@wat.edu.pl

#### Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono wyniki badań pól elektrycznych i magnetycznych, z zakresu częstotliwości od 5 Hz do 100 kHz, przy wybranych urządzeniach w stacjach radiolokacyjnych. Przedstawiono wyniki badań charakterystyk widmowych tych pól. Szczególną uwagę zwrócono na wytwarzane przy wskaźnikach radiolokacyjnych pola elektromagnetyczne, które uważane są za istotny czynnik wpływający na warunki pracy operatorów.

Słowa kluczowe: pola elektryczne i magnetyczne, widma, stacje radiolokacyjne.

#### DIAGNOSTICS OF ELECTROMAGNETIC FIELDS IN CHOSEN RADAR STATIONS

#### Summary

In the elaboration there were presented the results of measurements of electric and magnetic fields in the 5 Hz - 100 kHz range. The research was carried out near selected devices of radar stations. Besides, there were presented the results of the measurements of the splittings of the spectrum. Electromagnetic fields induced near the radar displays, regarded as an important factor, which influences the working conditions of crew, were especially taken into consideration.

Keywords: electric and magnetic fields, spectrum, radar stations.

### 1. WSTĘP

Diagnozowanie pól elektromagnetycznych środowisku zawodowym (cywilnym w i wojskowym) oraz dostępnym dla ogółu ludności jest niezbędne dla ochrony przed ich niekorzystnym oddziaływaniem. W skład czynności związanych diagnozowaniem pól elektromagnetycznych Z rozpoznanie źródeł pól, określenie wchodzi: wartości ich parametrów, rozkładów przestrzennych oraz charakterystyk widmowych badanych pól.

Mianem kompatybilności elektromagnetycznej określa dopuszczalne sie warunki dla oddziaływania zewnętrznych pól elektromagnetycznych na pracę urządzeń elektronicznych oraz sprzętu zawierającego układy elektroniczne. Zgodnie zapisami z występującymi w międzynarodowej normie IEC 50 (161) z 1990 r., zawartymi następnie w projekcie Polskiej Normy Pr. PN-T-01030 przyjmuje się, że: "kompatybilnościa elektromagnetyczną jest systemu zdolność urządzenia lub do zadowalającego działania określonym w środowisku elektromagnetycznym, również bez wprowadzania do tego środowiska niedopuszczalnych zaburzeń elektromagnetycznych". Zgodnie z wymienioną norma: "zaburzeniem elektromagnetycznym nazywa się dowolne zjawisko elektromagnetyczne, które może obniżyć jakość działania urządzenia lub systemu, albo niekorzystnie wpływać na materię ożywioną i nieożywioną" [1][2].

Zaburzenia elektromagnetyczne powstają głównie w wyniku niezamierzonego wytwarzania pól elektromagnetycznych w czasie pracy różnego rodzaju urządzeń elektronicznych, elektrotechnicznych, instalacji elektrycznych itp. Przyczyniają się one do kształtowania środowiska elektromagnetycznego w miejscu pracy, w obiektach użyteczności publicznej i w miejscach wypoczynku. Mogą wywierać istotny wpływ na wrażliwych prace urzadzeń na działanie zewnętrznych pól elektromagnetycznych oraz na zdrowie osób przebywających w ich zasięgu [3].

Przyjęcie zakresu częstotliwości, w którym promieniowanie elektromagnetyczne określa się mianem "fal małej częstotliwości" jest umowne. Zalicza się do nich pola elektromagnetyczne o częstotliwości mniejszej od kilkudziesięciu kHz. Tego rzędu częstotliwościom odpowiadają bardzo duże długości fal. (Przebiegom o częstotliwości 50 Hz odpowiadają fale o długości 6 000 km, częstotliwości 10 kHz odpowiadają fale o długości 30 W przypadku km). badania pól elektromagnetycznych o małych częstotliwościach, związku z tak dużymi długościami fal w w stosunku do odległości od źródeł, w której dokonuje się pomiarów parametrów pól, rozpatruje się oddzielnie składową elektryczną i składową magnetyczną pola elektromagnetycznego.

Ogólnie uważa się, że głównym zagrożeniem dla osób pracujących w stacjach radiolokacyjnych jest promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu wielkich częstotliwości (rzędu GHz). Celem pracy było zbadanie środowiska elektromagnetycznego w tych obiektach, W zakresie małych częstotliwości, pod katem możliwości niekorzystnego oddziaływania na operatorów i urządzenia techniczne.

W pracy przytoczono przykładowe wyniki badań pól małej częstotliwości, emitowanych przez wskaźniki radiolokacyjne (urządzenia elektroniczne zawierające lampy elektronopromieniowe) oraz przez inne urządzenia elektroniczne i elektryczne wchodzące w skład stacji radiolokacyjnych [4].

## 2. WARUNKI I WYNIKI POMIARÓW

Pomiary składowych elektrycznej i magnetycznej pola elektromagnetycznego przeprowadzono w uwarunkowanych względami pomiarowymi zakresach częstotliwości: od 5 Hz do 2 kHz - ELF (Extremely Low Frequencies) oraz od 2 kHz do 100 kHz - VLF (Very Low Frequencies). Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych oraz w warunkach rzeczywistych, na stanowiskach pracy.

#### 2.1. Pomiary pól przy wskaźnikach radiolokacyjnych, w warunkach laboratoryjnych

Wykonano pomiary natężenia  $\mathbf{E}$  pola elektrycznego oraz indukcji  $\mathbf{B}$  pola magnetycznego przy dwóch typów wskaźnikach radiolokacyjnych. Badając rozkłady  $\mathbf{E}$  i  $\mathbf{B}$  przyjęto charakterystyczne odległości od ekranów urządzeń równe: 10 cm, 30 cm, 50 cm. Dystans 30 cm stanowi odległość, na jaką praktycznie może zbliżać się do ekranu głowa osoby pracującej przy wskaźniku radiolokacyjnym, (podobnie jak przy monitorze komputerowym). Odległość 50 cm jest typowa dla określenia wartości dopuszczalnych, które są przyjmowane w normach.

W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów uzyskanych przy wskaźnikach radiolokacyjnych oznaczonych symbolami WRH i WRP. Posiadały one ruchome podstawy czasu wyzwalane z częstotliwością 375 Hz.

We wskaźniku WRH, z prostokątnym ekranem, początek podstawy czasu był umieszczony w lewym dolnym rogu ekranu. Częstotliwość przemieszczania się podstawy czasu z dołu ekranu do góry i z powrotem wynosiła 0,3 Hz. We wskaźniku WRP, z ekranem kołowym, początek podstawy czasu będącej promieniem koła umiejscowiony był w środku ekranu. Podstawa czasu obiegała ekran zgodnie z ruchem wskazówek zegara z częstotliwością 0,05 Hz.

Przemieszczanie się podstawy czasu z określoną częstotliwością powodowało występowanie maksymalnych i minimalnych wartości mierzonych parametrów w badanym obszarze, w takt zmian jej położenia. W przypadku wskaźników z wiązką elektronową odchylaną przy pomocy cewek, zmiany wartości mierzonych parametrów występowały w zakresie ELF i VLF. Przy wskaźnikach z wiązką elektronową odchylaną za pomocą napięcia sterowanego cyfrowo, wyżej wymienione zmiany występowały przy pomiarze indukcji B pola magnetycznego w zakresie VLF oraz natężenia E pola elektrycznego w zakresie ELF.

Odległość	Wartości	max. i min.	indukcji m różn	agnetycznej ych zakresó	j <b>B</b> przed wskaźnikami radiolokacyjnymi, dla ów częstotliwości					
od ekranu		W	RH		WRP					
w cm	ELF [µT]		VLF [nT]		ELF	[µT]	VLF [nT]			
	B <sub>max</sub>	B <sub>min</sub>	B <sub>max</sub>	B <sub>min</sub>	B <sub>max</sub>	B <sub>min</sub>	B <sub>max</sub>	B <sub>min</sub>		
10	2,14	0,93	414	259	0,30	0,30	6,8	3,7		
30	0,50	0,33	89	52	0,20	0,20	1,4	1,0		
50	0,26	0,22	30	18	0,15	0,15	0,7	0,8		

Tabela 1. Wyniki pomiarów indukcji **B** pola magnetycznego w zakresie małych częstotliwości przed wskaźnikami radiolokacyjnymi

Tabela 2. Wartości indukcji **B** pola magnetycznego w funkcji odległości od wentylatora i zasilacza wskaźnika radiolokacyjnego

Urządzenie	Odległość [cm]	0	10	20	30	40	50	60	70
Wentylator	ELF: B [µT]	12,8	1,6	0,6	0,4	0,3	0,2	-	-
Zacilaaz	ELF: Β [μT]	200	10,0	4,0	2,0	0,6	0,4	0,2	0,1
Zashacz	VLF: B [nT]	47	4,8	3,2	2,1	1,1	0,8	-	-

W trakcie pomiarów ustalono również, że źródłami pól magnetycznych są elementy składowe wskaźnika radiolokacyjnego, tj. wentylator wbudowany nad ekranem oraz zasilacz umieszczony pod pulpitem sterowniczym. Wyniki pomiarów indukcji **B** pola magnetycznego w funkcji odległości od tych urzadzeń przedstawiono w tabeli 2.

W wyniku pomiarów pól elektrycznych pochodzących od opisanych urządzeń stwierdzono występowanie natężenia E pola rzędu kilkudziesięciu V/m, w niewielkich odległościach od obudowy.

## 2.2. Pomiary pól w stacjach radiolokacyjnych

W następnym etapie badań dokonano pomiarów parametrów pól elektromagnetycznych małej częstotliwości w stacjach radiolokacyjnych. Niżej przedstawiono wyniki badań uzyskane w wozie nadawczo – odbiorczym stacji, w której stwierdzono podwyższone wartości parametrów badanych pól.

W wyniku pomiarów natężenia E pola elektrycznego w stacji stwierdzono występowanie podwyższonej wartości tego parametru przy obudowie nadajnika, gdzie w zakresie ELF otrzymano wartość E = 620 V/m. Ale już w odległości kilkunastu cm natężenie pola wydatnie malało. W przeważającej przestrzeni wozu nadawczo – odbiorczego wartość E wynosiła kilkanaście lub kilka V/m. W zakresie VLF występowało bardzo małe natężenie pola elektrycznego.

Stwierdzono natomiast występowanie obszarów o podwyższonych wartościach indukcji magnetycznej **B** wokół kilku urządzeń wchodzących w skład kabiny stacji radiolokacyjnej. Wyniki pomiarów **B** w funkcji odległości przy tych urządzeniach podano w tabeli 3.

Ponadto stwierdzono występowanie podwyższonej indukcji **B** pola magnetycznego

(w zakresie ELF) w następujących obszarach stacji: nad podłogą przy wejściu  $\mathbf{B} = 15 \ \mu\text{T}$ , pod sufitem przy wejściu  $\mathbf{B} = 3,8 \ \mu\text{T}$ . W miejscu pracy operatora: nad pulpitem sterowniczym wskaźnika przenośnego  $\mathbf{B} = 1,9 \ \mu\text{T}$ , wskaźnika stacjonarnego  $\mathbf{B} = 0,98 \ \mu\text{T}$ ; nad podłogą przy wskaźniku przenośnym  $\mathbf{B} = 3,2 \ \mu\text{T}$ , stacjonarnym 0,7  $\mu\text{T}$ ; nad fotelem operatora przy wskaźniku przenośnym  $\mathbf{B} = 2,3 \ \mu\text{T}$ , stacjonarnym  $\mathbf{B} = 1,42 \ \mu\text{T}$ .

Pomiary rozkładów pola przy wskaźniku przenośnym i stacjonarnym wykazały, że w przestrzeni wokół tych wskaźników wartości indukcji tła są większe od wartości pól wytwarzanych przez same wskaźniki.

# 2.3. Pomiary charakterystyk widmowych w stacjach radiolokacyjnych

Przedstawione wyżej wyniki dotyczyły pomiarów parametrów pola elektrycznego magnetycznego zmierzonych pasmach i W częstotliwości ELF oraz VLF. Dokładniejsze diagnozowanie środowiska elektromagnetycznego wymaga znajomości charakterystyk widmowych tych pól. W trakcie badań dokonano pomiarów charakterystyk widmowych natężenia pola elektrycznego E oraz indukcji pola magnetycznego **B** w stacjach radiolokacyjnych. "Bożena" i "Justyna". Rozkłady widmowe natężenia pola elektrycznego E w tych stacjach, w zakresie częstotliwości ELF, przedstawiono na rys. 1 i 2. Jak można zauważyć w obu przypadkach, w przedziale częstotliwości do 800 Hz, występuje osiem składowych widma o różnych częstotliwościach i wartościach natężenia E pola elektrycznego. Rozkład prążków, o zdecydowanie większych wartościach E w stacji "Bożena" jest równomierny w badanym zakresie częstotliwości, natomiast w stacji "Justyna" daje się zauważyć jego zagęszczenie w przedziale częstotliwości do 350 Hz. Na rys. 3 przedstawiono charakterystykę

Tabela 3.

Wartości indukcji **B** pola magnetycznego w zakresie ELF w funkcji odległości od urządzeń składowych stacji radiolokacyjnej

Odległość			Ro	odzaj urządzer	nia		_
Oulegiose	А	В	С	D	Е	F	G
[cm]	Β[μΤ]	Β[μΤ]	Β[μΤ]	Β[μΤ]	Β [μΤ]	Β [μΤ]	Β[μΤ]
0	30,0	200,0	7,5	1,9	4,5	8,0	24,0
10	14,0	130,0	9,2	1,8	2,7	8,0	17,0
20	8,2	91,0	9,2	1,8	1,7	6,3	13,0
30	5,5	63,0	7,3	1,7	1,3	4,4	9,0
40	3,9	51,0	6,5	1,7	1,1	3,3	7,0
50	5,0	38,0	6,0	1,7	0,9	2,9	6,0

A – Modulator, B – Stabilizator napięcia, C – Urządzenie rozpoznania, D – Wskaźnik przenośny, E – Blok włączania-wyłączania, F – Nadajnik mikrofalowy, G – Blok sterowania nadajnikiem.

widmową w przedziale częstotliwości odpowiadającemu zakresowi VLF, otrzymaną w stacji "Bożena". W tym przypadku zauważono tylko jedną składową widma, o częstotliwości około 7,9 kHz.

Przykładowe rozkłady indukcji **B** pola magnetycznego w zakresie częstotliwości ELF, w wybranych przestrzeniach obu badanych stacji przedstawiono na rys. 4, 5 i 6. Jak można zauważyć, występuje znaczne zróżnicowanie liczby prążków widma w zakresie częstotliwości do 400 Hz w obu stacjach. W stacji radiolokacyjnej "Bożena" występuje 11 składowych widma, o bardziej równomiernym rozkładzie. Natomiast w stacji "Justyna" stwierdzono trzy składowe w pobliżu wyłączonych silników napędów i siedem składowych po ich załączeniu. Zróżnicowanie wartości indukcji **B** w badanych obszarach wiąże się z różnymi właściwościami pracujących urządzeń oraz różnymi warunkami pomiarów w badanych obiektach.

Badając charakterystyki widmowe indukcji **B** pola magnetycznego w zakresie częstotliwości VLF, zaobserwowano jedną dość znaczną składową widma w stacji Bożena, odpowiadającą częstotliwości około 7,6 kHz.

Na rys. 7 przedstawiono charakterystykę widmową indukcji **B** pola magnetycznego w zakresie częstotliwości VLF w stacji radiolokacyjnej "Bożena".



Rys. 1. Charakterystyki widmowe natężenia E pola elektrycznego w zakresie częstotliwości ELF w stacji radiolokacyjnej "Bożena"



Rys. 2. Charakterystyki widmowe natężenia E pola elektrycznego w zakresie częstotliwości ELF w stacji radiolokacyjnej "Justyna"



Rys. 3. Charakterystyki widmowe natężenia E pola elektrycznego w zakresie częstotliwości VLF w stacji radiolokacyjnej "Bożena"



Rys. 4. Charakterystyki widmowe indukcji **B** pola magnetycznego w zakresie częstotliwości ELF w stacji radiolokacyjnej "Bożena"



Rys. 5. Charakterystyki widmowe indukcji **B** pola magnetycznego w zakresie częstotliwości ELF w stacji radiolokacyjnej "Justyna", w pobliżu wyłączonych silnikach napędów



Rys. 6. Charakterystyki widmowe indukcji **B** pola magnetycznego w zakresie częstotliwości ELF w stacji radiolokacyjnej "Justyna", w pobliżu pracujących silników napędów

#### **3. WNIOSKI**

przeprowadzone Jak wykazały badania, radiolokacyjnych W stacjach środowisko elektromagnetyczne kształtowane jest przez liczne źródła niezamierzonych pól. Należą do nich urzadzenia elektryczne oraz elektroniczne, skoncentrowane w stosunkowo małej przestrzeni. Wykonane pomiary pól w zakresach częstotliwości ELF i VLF, w obszarach bliskich przy elementach składowych stacji radiolokacyjnych, wykazują znaczne zróżnicowanie wartości parametrów pól dla różnych urzadzeń i różnych typów danego urządzenia.

Łatwo daje się zauważyć, że wartości natężenia E pola elektrycznego oraz indukcji B pola magnetycznego znacznie maleją ze wzrostem odległości od badanych urządzeń. Pomiary charakterystyk widmowych wykazały występowanie zróżnicowanych rozkładów składowych badanych pól w zakresie małych częstotliwości, w zależności od właściwości źródeł ich pochodzenia.

Personel stacji radiolokacyjnej przebywa głównie w obszarach związanych z wykonywanymi czynnościami. Dlatego istotne było określenie środowiska elektromagnetycznego przede wszystkim w tych przestrzeniach. Do takich miejsc należą stanowiska operatorów pracujących przy wskaźnikach radiolokacyjnych.

Wskaźniki radiolokacyjne, podobnie jak monitory komputerowe, są zaliczane do urządzeń monitorami ekranowymi. nazywanych W klasycznej postaci są to urządzenia zbudowane W oparciu o *lampy* elektronopromieniowe (kineskopy). Pracy tego rodzaju urzadzeń towarzyszy niezamierzone promieniowanie elektromagnetyczne z bardzo szerokiego zakresu czestotliwości, łacznie promieniowaniem z postępowi jonizującym. Dzieki dużemu technologicznemu zminimalizowane zostało oddziaływanie promieniowania jonizującego, towarzyszącego pracy kineskopów.

Natomiast dość dużym problemem pozostaje nadal niezamierzone promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu małych częstotliwości, którego oddziaływanie na organizmy żywe nie zostało dokładnie zbadane i jest przyczyną zaniepokojenia.

Porównując otrzymane przy wskaźnikach radiolokacyjnych wyniki pomiarów pól, w zakresie częstotliwości ELF oraz VLF, z wcześniej uzyskanymi wynikami przy monitorach komputerowych, można stwierdzić występowanie dużego podobieństwa w rozkładach natężeń pól elektrycznych magnetycznych przy i obu zbadanych urządzeniach [5][11]. W wyniku przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że zbadanych obszarach wskaźnikach w przy radiolokacyjnych moga występować pola elektryczne i magnetyczne wpływające niekorzystnie na ludzi oraz pracę urządzeń elektronicznych, wrażliwych na ich działanie. Przykładowo, z danych literaturowych i badań własnych wynika, że przy zewnętrznym polu magnetycznym o częstotliwości 50 Hz, którego wartość indukcji B jest większa niż 0,5 µT występują drgania obrazu na ekranie monitora komputerowego. Podobny efekt jest na wskaźnikach radiolokacyjnych. Tego rodzaju drgania nie są widoczne gołym okiem, lecz powoduja szybkie męczenie się wzroku. Natomiast zauważalne drgania obrazu powstają przy większych wartościach indukcji [6].

W celu ochrony osób zatrudnionych przy monitorach komputerowych przed szkodliwym oddziaływaniem pól elektromagnetycznych z zakresu małych częstotliwości wprowadzone zostały t. zw. "normy szwedzkie", określające dopuszczalne wartości parametrów tych pól [7][8].



Rys. 7. Charakterystyka widmowa indukcji **B** pola magnetycznego w zakresie częstotliwości VLF w stacji radiolokacyjnej "Bożena"

Według przyjętej w 1990 r. normy MPR I, w odległości 50 cm od przodu ekranu, natężenie pola elektrycznego w zakresie ELF nie powinno przekraczać wartości 25 V/m, natomiast w zakresie VLF wartości 2,5 V/m. Indukcja pola magnetycznego nie powinna być większa od 0,25 µT w zakresie ELF oraz 25 nT w zakresie VLF. W normach MPR II oraz TCO 92 wprowadzono zaostrzenie polegające na spełnieniu stawianych wymagań już w odległości 30 cm od ekranu. Następnie w normach TCO 95 i TCO 99 dodatkowo wprowadzono obniżenie wartości natężenie pola dopuszczalnych parametrów: elektrycznego w zakresie ELF nie powinno przekraczać wartości 10 V/m, natomiast w zakresie VLF wartości 1 V/m. Indukcja pola magnetycznego nie powinna być większa od 0,20 µT w zakresie ELF oraz 25 nT w zakresie VLF.

Mimo, że przytoczone "unormowania" nie są obowiązującymi w Polsce, wszystkie dostępne na polskim rynku monitory komputerowe legitymują się oznaczeniami świadczącymi o spełnianiu niniejszych "norm".

Godne uwagi jest także to, że w ostatnich latach niniejsze normy rozpowszechniają się z rozszerzeniem do innych środowisk, nie tylko do monitorów komputerowych. Również w kraju spotkać się można z zaleceniami dotyczącymi ochrony przed polami elektromagnetycznymi z zakresu małych częstotliwości, przyjmującymi jako korzystne wartości natężenia E pola elektrycznego na poziomie do 100 V/m oraz indukcji B nie większej niż 0,5 μT [6].

Porównując uzyskane wyniki pomiarów pól, przed ekranami wskaźników radiolokacyjnych i wcześniej przebadanych monitorów komputerowych, z wartościami określonymi w przedstawionych wyżej "unormowaniach szwedzkich", można stwierdzić, że wartości natężenia pola elektrycznego E oraz indukcji magnetycznej B mieszczą się przeważnie w granicach "normy" MPR I. Parametry te w nielicznych przypadkach odbiegają od "norm" MPR II i TCO, w odległości 30 cm od ekranów.

Warunki pracy przy wskaźnikach radiolokacyjnych różnią się do warunków pracy przy monitorach komputerowych. Wynika to różnego charakteru występujących pól, z uwarunkowanego częściowo odmiennymi zasadami działania obu urzadzeń. Przy wskaźnikach radiolokacyjnych przebiegi nateżenia pola elektrycznego oraz indukcji magnetvcznej z zakresu małych częstotliwości są dodatkowo modulowane z częstotliwością równą częstotliwości obiegania ekranu przez ruchomą podstawę czasu. Dzięki temu, operator narażony jest na działanie pól z zakresu ELF i VLF, których parametry ulegają cyklicznym bardzo powolnym zmianom, z częstotliwością mniejszą od 1 Hz.

Zróżnicowany charakter pól elektrycznych i magnetycznych w zakresie ELF i VLF przed

ekranami monitorów komputerowych i wskaźników radiolokacyjnych może przyczyniać się do różnego oddziaływania tych pól na osoby znajdujące się w ich zasiegu. Ponadto stwierdzono, że obszarach przebywania operatora W przy wskaźnikach radiolokacyjnych (wokół pulpitu sterowniczego, przy fotelu operatora, nad podłoga w miejscu oparcia nóg) moga występować pola magnetyczne z zakresu ELF o indukcji B znacznie przekraczającej wartości podane w przytoczonych "normach". Pola te pochodzą od urządzeń wchodzących w skład samych wskaźników radiolokacyjnych oraz innych, znajdujących się ich pobliżu. Dokonując pomiarów pól W wytwarzanych przez inne elementy wyposażenia stacii stwierdzono występowanie pól magnetycznych o znacznych wartościach indukcji. Przykładowo, w pobliżu grzejnika elektrycznego zainstalowanego w bezpośrednim sasiedztwie miejsca wypoczynku operatorów wartość B była rzędu kilkunastu µT. W ten sposób mogą być oni działanie silniejszego narażeni na pola magnetycznego w czasie wypoczynku niż podczas pracy przy wskaźnikach.

Przeprowadzone badania pól elektrycznych i magnetycznych w zakresie częstotliwości ELF VLF oraz pomiary ich charakterystyk i przestrzeniach widmowych, także W poza obszarami długotrwałego przebywania personelu, pozwoliły na określenie środowiska elektromagnetycznego w pozostałych częściach stacji radiolokacyjnej.

Ogólnie można zauważyć, że występujące w pobliżu urządzeń wchodzących w skład stacji radiolokacyjnych pola o dużych wartościach indukcji **B**, w tym poszczególne składowe ich charakterystyk widmowych, nie powinny stanowić bezpośredniego zagrożenia dla personelu ponieważ występują w obszarach oddalonych od miejsca jego długotrwałego przebywania.

Stopień zagrożeń związanych z występowania pól elektromagnetycznych w miejscu pracy określa się poprzez porównanie wyników pomiarów z wartościami parametrów pól podawanymi jako dopuszczalne w odpowiednich unormowaniach. Zgodnie z obowiązującymi zasadami dotyczącymi ochrony przed polami elektromagnetycznymi w miejscu pracy, zawartymi w Rozporządzeniu Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dn.29.11.2002 r. "w sprawie dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy", przyjęte zostały m. in.. wartości dopuszczalne nateżenia pola E elektrycznego oraz natężenia H (indukcji B) pola magnetycznego dla odpowiednich zakresów czestotliwości. Przykładowo, w tym dokumencie określono jako dopuszczalne w środowisku pracy wartości indukcji B odpowiednio: 3,33 mT dla pola stałego, 83,3 µT dla częstotliwości 50 Hz oraz 4,2 µT dla zakresu częstotliwości od 1 kHz do 100 kHz [9][10].

Analizując otrzymane wyniki diagnozowania środowiska elektromagnetycznego w stacjach radiolokacyjnych można wnioskować, że w świetle przepisów nie obowiazujących występuje zagrożenie ze strony pól elektromagnetycznych z zakresu małych częstotliwości dla osób zatrudnionych w tych obiektach. Przedstawione w opracowaniu zmierzone wartości parametrów pól są znacznie mniejsze od uznanych za dopuszczalne. Mimo tego, pracę przed monitorami ekranowymi, do których zalicza się wskaźniki radiolokacyjne monitory komputerowe, zalicza się do szkodliwych [6].

Najbardziej wskazanym sposobem zabezpieczania się przed oddziaływaniem pól elektrycznych i magnetycznych z omawianego zakresu częstotliwości jest przebywanie poza ich zasięgiem. Z opisanych pomiarów i podobnych badań wynika, że w przypadku monitorów komputerowych i wskaźników radiolokacyjnych należałoby pracować w odległości około 50 cm od ekranu tych urządzeń. Nie wskazane jest zbliżanie się na odległości mniejsze lub równe 30 cm. Postęp technologiczny w elektronice umożliwił zastąpienie lamp elektronopromieniowych przez monitory ciekłokrystaliczne. W tego rodzaju urządzeniach wydatnemu obniżeniu uległo niezamierzone promieniowanie elektromagnetyczne, w szerokim zakresie częstotliwości, dzięki wyeliminowaniu źródeł wysokiego napięcia i wysokiej temperatury oraz przez zastosowanie nowych rozwiązań układowych zapewniających powstawanie obrazu na ekranie.

# LITERATURA

- 1. International Standard IEC 50 (161): International Electrotechnical Vocabulary, Chapter 161: Electromagnetic Compatibility; First edition Geneve 1990.
- 2. Polska Norma Pr. PN-T-01030 Kompatybilność elektromagnetyczna Terminologia.
- W. Brejwo, Cz. Przybysz: "Wybrane zagadnienia ochrony przed uciążliwościami techniki cywilizacyjnej" Cz. I. "Zagrożenia związane z promieniowaniem niejonizującym" WAT 1995 r.
- W. Brejwo, M. Chojnacki, E. Zachwieja: "Diagnozowanie pól elektrycznych i magnetycznych z zakresu małych częstotliwości w stacjach radiolokacyjnych" VII Konferencja naukowa nt. "Sterowanie i regulacja w radiolokacji i obiektach latających" - Jelenia Góra 1996 r. Tom 1 str. 185-194.
- W. Brejwo, M. Chojnacki, E. Zachwieja: "Pola elektryczne i magnetyczne z zakresu małych częstotliwości przy urządzeniach z lampami elektronopromieniowymi" XXVIII Międzyuczelniana Konferencja Metrologów MKM'96 -Częstochowa 1996 r. Tom 1. str. 66-71.
- 6. H. Korniewicz: *Pola elektromagnetyczne urządzeń biurowych.* – Zawodowe i biurowe zagrożenia polami elektromagnetycznymi –

Materiał szkoleniowy – 19 lutego 1998, s 36-42.

- 7. W. J. Brejwo, Paś, Cz. Przybysz: "Charakterystyka norm dotyczących monitorów zestawów komputerowych" XIV Międzynarodowa Konferencja Naukowo Techniczna nt. "Inżynieria środowiska w eksploatacji kompleksów wojskowych" Zakopane 4-6 października 2000 r., s 99-105.
- K. Gryz, J. Karpowicz: "Źródla pól elektromagnetycznych - monitory ekranowe" CIOP - Bezpieczeństwo Pracy nr 4, 2002 r., s 13-17.
- Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dn.29.11.2002 r. "w sprawie dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy" Dz. U. Nr 217, poz. 1833.
- J. Karpowicz, K. Gryz: "Kontrola i kształtowanie warunków pracy w polach i promieniowaniu elektromagnetycznym" CIOP - Bezpieczeństwo Pracy nr 10, 2002 r., s 7-13.
- 11. W. Brejwo, J. Paś: *Badanie promieniowania elektromagnetycznego wytwarzanego przez zestaw komputerowy* XIV Międzynarodowa Konferencja Naukowo - Techniczna nt. "Inżynieria środowiska w eksploatacji kompleksów wojskowych" Zakopane 4-6 października 2000 r., s 306-315.



Dr inż. **Wojciech BREJWO** jest zatrudniony na stanowisku adiunkta w Instytucie Systemów Elektronicznych na Wydziale Elektroniki WAT. Zainteresowania naukowe koncentruje na pomiarach i oddziaływaniu promienio-

wania elektromagnetycznego na środowisko oraz w obszarze technologii elektronowej. Do ważniejszych zagadnień, którymi się zajmuje należy diagnostyka pól elektromagnetycznych w wojskowym, cywilnym oraz ogólnodostępnym środowisku.



Mgr inż. Jacek PAŚ jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Instytutu Systemów Elektronicznych na Wydziale Elektroniki WAT. Prowadzi zajęcia z przedmiotów "Układy analogowe" oraz "Podstawy eksploatacji".

Głównym obszarem jego zainteresowania jest kompatybilność elektromagnetyczna z zakresu małych częstotliwości oraz eksploatacja systemów bezpieczeństwa.

# METODY DIAGNOZOWANIA LINII ABONENCKICH Z WYKORZYSTANIEM ROBOTA POMIAROWEGO

# Wojciech WAWRZYŃSKI, Mirosław SIERGIEJCZYK

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Telekomunikacji w Transporcie 00-662 Warszawa, ul. Koszykowa 75 tel. 022-660 70 69, email: <u>wwa@it.pw.edu.pl</u>, <u>msi@it.pw.edu.pl</u>

#### Streszczenie

Robot pomiarowy jest elementem systemu diagnostyki central cyfrowych wspomagającym personel utrzymania w zakresie określenia aktualnego stanu badanych łaczy i podejmowaniu decyzji o dalszych działaniach utrzymaniowych mających na celu zapewnienie ciągłości świadczenia usług telekomunikacyjnych. W referacie omówiono rolę i funkcjonalność urządzeń cyfrowej centrali DGT 3450 służących do wykonywania pomiarów linii abonenckich i międzycentralowych. System komutacyjny DGT 3450 jest wyposażony w niezbędne funkcje eksploatacyjne i utrzymaniowe, zapewniające skuteczną i elastyczną realizację eksploatacji i utrzymania centrali w trybie obsługowym i bezobsługowym z i bez scentralizowanego systemu eksploatacji i utrzymania.

Słowa kluczowe: eksploatacja i utrzymanie, system komutacyjny DGT 3450, robot pomiarowy.

#### METHODS OF DIAGNOSIS OF THE SUBSCRIBER'S LINES WITH USING OF THE MEASURING ROBOT

#### Sumary

Measuring robot is the element of diagnostic system of the digital telephone exchange supporting the maintenance staff in the domain of qualification of the current state of the examined junctions as well as in taking a decision concerning further maintenance activities eye assurance permanence of providing telecommunication services. In the paper there is presented the role and running of the devices of the digital exchange DGT 3450 used for realization of the subscriber's lines and between-exchanges measures. The commutation system of DGT 3450 is equipped into necessary exploitation and maintenance functions, assuring the efficient and elastic realization of the exchange exploitation and maintenance in the service and non-service manner with and without the centralized system of exploitation and maintenance.

Keywords: exploitation and maintenance, digital exchange DGT 3450, measuring robot.

#### 1. WSTĘP

Niezawodność sieci zależy od wielu czynników takich jak: niezawodność poszczególnych elementów sieci, warunki eksploatacji, topologia sieci itp. Istnieje wiele metod zwiększania niezawodności [2], [5]. Jedną z nich jest zwiększanie niezawodności elementów sieci poprzez wybór lepszej technologii i zastosowanie bardziej niezawodnych urządzeń. Można też zwiększyć niezawodność dodając dodatkowe węzły i równoległe kanały.

Na parametry niezawodnościowe systemu telekomunikacyjnego w znaczący sposób wpływa sposób kontroli systemu i jego elementów w celu ustalenia stanu i wykrycia powstałych uszkodzeń. W celu spełnienia wymagania zapewnienia wysokiej niezawodności eksploatacyjnej w systemach telekomunikacyjnych implementowane są powszechnie mechanizmy programowe i sprzętowe pozwalające na tworzenie w czasie eksploatacji nowych struktur funkcjonalnych, sposobów kontroli technicznego wezłów wyposażenia i linii telekomunikacyjnych, systemów detekcji błędów i uszkodzeń. Te działania są w telekomunikacji określone utrzymania terminem urzadzeń elementem telekomunikacyjnych. Ważnym utrzymania cyfrowych central telekomunikacyjnych jest system diagnostyki centrali. W referacie omówiona przedstawiona jest rola i funkcjonalność urządzeń służących do wykonywania pomiarów linii abonenckich i międzycentralowych w cyfrowej centrali DGT 3450.

System komutacyjny DGT 3450 jest wyposażony w niezbędne funkcje eksploatacyjne utrzymaniowe, zapewniające i skuteczną i elastyczną realizację procesów użytkowych i utrzymaniowych centrali w trybie obsługowym bezobsługowym wykorzystaniem i Z

scentralizowanego systemu i bez scentralizowanego systemu nadzoru i zarządzania.

Funkcje eksploatacji i utrzymania implementowane w rozwiązaniach centrali DGT spełniają odpowiednie zalecenia CCITT (obecnie ITU-T), w szczególności Q.524, jak również wymagania sieci polskiej.

W celu sterowania i komunikowania się z wyżej wymienionymi funkcjami system eksploatacyjny i utrzymaniowy wyposażony został w następujące oprzyrządowanie [1]:

- interfejsy człowiek maszyna, monitory ekranowe lub komputery personalne (PC),
- interfejsy maszyna maszyna, które umożliwiają współpracę ze stanowiskami operatorskimi centrali, z centrami eksploatacji i utrzymania, z centrum zarządzania ruchem oraz innymi systemami zarządzania siecią, dołączonymi do centrali bezpośrednio lub poprzez sieć teledacyjną.

## 2. CHARAKTERYSTYKA SYSTEMU EKSPLOATACJI I UTRZYMANIA CYFROWYCH CENTRAL DGT 3450

## 2.1. Funkcje systemu eksploatacji i utrzymania

System eksploatacji i utrzymania central DGT 3450 prowadzi stałą, automatyczną obserwację i rejestrację [4]:

- stanów poszczególnych bloków systemu,
- parametrów łączy.
- parametrów zdarzeń związanych z ruchem.

Przez cały czas pracy centrali są realizowane w sposób automatyczny procedury samotestowania elementów centrali i zbieranie danych do celów statystycznych i taryfikacyjnych.

Realizacja procedur związanych z eksploatacją i utrzymaniem polega przede wszystkim na:

- 1. Zdalnej komunikacji operatora z systemem za pomocą terminala z centrum utrzymaniowego, niezależnie od możliwości wykorzystywania terminalu lokalnego.
- 2. Automatycznym rejestrowaniu danych do celów statystycznych, taryfikacyjnych, jak również informacji o ważniejszych awariach.
- Wymianie uszkodzonych pakietów wyposażenia oraz korekt oprogramowania w miarę potrzeb.
- 4. Testowaniu i samotestowaniu z automatyczną konfiguracją sprzętu w przypadku awarii.
- 5. Generowaniu odpowiednich wiadomości alarmowych na terminal utrzymaniowy.

System oferuje operatorowi możliwość wykonania poprzez terminal następujących zadań:

- 1. Obserwację wyników testowania elementów centrali.
- 2. Wyświetlanie alarmów generowanych przez system.
- 3. Zarządzanie konfiguracją centrali.

- Zarządzanie ruchem przepływającym wewnątrz centrali i pomiędzy współpracującymi centralami.
- 5. Zarządzanie bazą danych centralowych.
- 6. Lokalizację wadliwie pracujących elementów centrali lub łączy.
- Zdalne przeprowadzenie reinicjalizacji zespołów centrali, korektę i transfer oprogramowania.

Zdalny nadzór centrali możliwy jest poprzez transmisję informacji z wykorzystaniem modemów. W systemie zdalnego zarządzania nie istnieje konieczność sprzęgania centrali łączami cyfrowymi, do tego celu mogą być wykorzystane łącza analogowe istniejące w sieci.

Zbiór funkcji lokalnego podsystemu utrzymaniowego jest zbliżony do osiąganego z odległego centrum, przy czym istnieje możliwość ograniczenia liczby funkcji dostępnych lokalnie z konsoli operatora poprzez wprowadzenie odpowiednich haseł dostępu.

# 2.2. Wyposażenie systemu eksploatacji i utrzymania

Centrale systemu DGT 3450 są wyposażone w dwa podstawowe zespoły umożliwiające sterowanie funkcjami eksploatacyjno – utrzymaniowymi:

- 1. pakiet programów eksploatacyjno utrzymaniowych znajdujących się w procesorze koordynacyjnym sterującym pracą centrali,
- 2. zespół realizujący funkcje zdalnego sterowania i utrzymania centrali.

Drugi z tych zespołów składa się z wydzielonego komputera utrzymaniowego, kanału transmisji danych, wydzielonego procesora komunikacyjnego.

Procesor utrzymaniowy dołączony jest do dwóch punktów wewnętrznej szyny systemowej oraz modem komunikacyjny. wyposażony jest w Komunikacja komputerem pomiędzy utrzymaniowym może odbywać się poprzez łącza stałe lub komutowane. Możliwe jest również przekazywanie informacji sterujących i utrzymaniowych w systemie sygnalizacji Nr 7, jeśli istnieją łącza pracujące z tym samym typem sygnalizacji. Centrala DGT 3450 posiada homologację na ten typ sygnalizacji.

Większość zespołów sterujących systemem DGT 3450 posiada wbudowane podstawowe funkcje samotestujące i lokalne bazy danych dostępne zarówno dla pakietów programów eksploatacyjno – utrzymaniowych, jak i dla zespołu zdalnego sterowania.

Scentralizowane zarządzanie siecią oferowane w systemie DGT 3450 umożliwia realizacje wielu wyspecjalizowanych funkcji eksploatacyjno – utrzymaniowych dla szeregu odległych bezobsługowych central tego typu. Dla małej liczby central te mogą być wykonywane przez jeden uniwersalny komputer. Niezależnie od systemu zdalnego sterowania centrale DGT 3450 posiadają lokalny podsystem eksploatacyjno – utrzymaniowy wyposażony w terminal przeznaczony dla personelu wizytującego bezobsługowe centrale.

## 2.3. Podsystem kontroli ciągłej

Centrale DGT 3450 wyposażone zostały w pakiety programowe tworzące podsystem ciągłej wzajemnej kontroli poszczególnych modułów funkcjonalnych. Wykonywanie swoich funkcji w sposób ciągły realizują programy testowania kanałów przepływu informacji wraz z programowalnymi układami scalonymi na pakietach. W okresowych cyklach testowych sprawdzane są również połączenia fizyczne między modułami.

Wszystkie przypadki niewłaściwego funkcjonowania są przedmiotem analizy, a poważniejsze awarie rejestrowane. Ciągła kontrola i zbieranie danych o pracy centrali realizowane są programowo i umożliwiają operatorowi pełny wgląd w aktualny stan centrali we wszystkich najważniejszych punktach.

Dane zbierane przez system, które dotyczą sytuacji wadliwych, są wykorzystywane przez serwis do oceny poprawności działania centrali oraz do zespołów o szczególnie dużej ilości zdarzeń niekorzystnych.

Wyniki uzyskane dla pracujących systemów dużą przydatność mechanizmów wykazały kontrolnych, między innymi do lokalizacji wadliwych łączy analogowych w wiązkach do centrali elektromechanicznych, zmieniających swoje parametry powodujących powstanie strat ruchowych. Dokonane bezpośrednie porównanie strat ruchowych dla łaczy zewnetrznych za okres tygodnia pozwala już wskazać łącza, które formalnie mogą zostać zakwalifikowane jako poprawne, chociaż ich parametry odbiegają od parametrów pozostałych łączy.

Wyniki ruchowe pozwalają również na lokalizację sterowników i translacji, w których wystąpiły uszkodzenia, np. gwałtowny spadek ruchu przyjmowanego przez łącze abonenckie może wskazywać na uszkodzenie zespołów odpowiedzialnych za wysyłanie sygnału dzwonienia.

### 2.4. Pomiary łączy centrali DGT 3450

Centrala jest wyposażona w funkcje i urządzenia badaniowe umożliwiające samodzielną lub we współpracy urządzeniami badaniowymi Z zewnętrznymi (robotem pomiarowym), kontrole sygnalizacji i badanie parametrów transmisyjnych analogowych i cyfrowych łączy abonenckich. Te systemowe środki powinny prawidłowo współpracować z urządzeniami badaniowymi łączy używanymi analogowej W polskiej sieci W telefonicznej. przypadku wykorzystania istniejących urządzeń badaniowych zewnętrznych musi być możliwe np. dołączenie układu sterowania jednostki sterującej testem do interfejsu typu V. 24 a układu pomiarowego tej jednostki poprzez interfejs badaniowy do systemowej szyny badaniowej.

Należy zapewnić wykonanie automatycznych pomiarów wszystkich łączy wyjściowych z centrali i kierunków. W trakcie tych pomiarów należy kontrolować:

poprawność sekwencji sygnalizacyjnej,

- czasy odbioru sygnałów odpowiedzi,
- tłumienność skuteczną łączy pomiędzy jednostką sterującą a jednostką odzewową dla co najmniej jednej częstotliwości pasma akustycznego dla obu kierunków transmisji.

W przypadku połączeń badaniowych do centrali, która nie jest wyposażona w urządzenie pomiarowe (robot pomiarowy), należy zapewnić współpracę z odzewnikami typu HAV i RAV, używanymi w sieci polskiej. Dla testowania łączy przyjściowych urządzenia systemowe zapewniają realizację funkcji odzewników HAV i RAV.

Wyposażenie systemu eksploatacji i utrzymania centrali DGT 3450 umożliwia badanie poszczególnych łączy wyjściowych w sposób ręczny. W tym przypadku centrala na polecenie systemu utrzymaniowego zestawia połączenia pomiędzy jednym z wejść pomiarowych centrali, do którego jest dołączony robot pomiarowy, a łączem wyjściowym wyznaczonym do badania. Zaleca się aby szczegółowe badania ręczne były wykonywane za pomocą urządzeń badaniowych zewnętrznych.

System komutacyjny DGT 3450 wyposażony jest w środki umożliwiające dołączenia wybranego łącza do systemu pomiarowego i przeprowadzenie pomiarów szczegółowych. Robot pomiarowy jest połączony z ogólną siecią połączeń wewnętrznych centrali i może być sterowany zarówno z lokalnego jak i z odległego systemu utrzymaniowego.

### 2.5. Nadzór i zarządzanie centrali DGT 3450

System nadzoru i zarządzania centrali DGT3450/M jest elementem składowym Zdalnego Systemu Zarządzania DGT. Umożliwia zarządzanie i monitorowanie stanu różnego typu urządzeń, a w szczególności [4]:

- ► central DGT3450/M-Host,
- ➤ central DGT3450/M ,
- urządzeń zwielokrotnienia łączy DGT/PCM4,
- ➢ modemów DGT -HDSL,
- urządzeń innych producentów dołączonych poprzez konwertery styku,
- czujników alarmów zewnętrznych dołączonych do central DGT,
- inne urządzenia dołączone do koncentratora alarmów DGT.

System jest oparty na oprogramowaniu sieciowym dla sieci rozległej TCP/IP firmy Microsoft. Wykorzystuje technologie Internetu. Umożliwia dołączenie kilkudziesięciu central. Centrum zarządzania może być wyposażone w 20 stanowisk nadzoru i zarządzania. Zależnie od potrzeb klienta mają one charakter specjalizowany (np. stanowisko napraw) lub uniwersalny.

Ponadto system realizuje następujące funkcje dotyczące innych nadrzędnych lub skojarzonych podsystemów eksploatacji sieci:

- eksport danych taryfikacyjnych
- eksport przetworzonych danych statystycznych,
- gromadzenie danych z monitorowania w plikach umożliwiających analizę pracy sieci,
- rejestracja zdarzeń alarmowych,
- udostępnianie danych o sieci w trybie interakcyjnym,
- transfer sygnałów i zdarzeń alarmowych do innych systemów.

Większość funkcji utrzymaniowych związanych z poprawną pracą systemu jest realizowana automatycznie. Uszkodzenia są natychmiast wykrywane korygowane przez określone programy zaimplementowane w oprogramowaniu centrali i w poszczególnych jej modułach. Zespoły sterujące oraz matryce komutacyjne wszystkich modułów są zdublowane. Element zdublowany pracuje w trybie "gorącej rezerwy" i w przypadku awarii zespołu głównego przejmuje jego funkcje.

Wszystkie zdarzenia zachodzące w centrali są rejestrowane i zapisywane w postaci rekordów statystycznych. Ich analiza pozwala na ocenę poprawności pracy centrali, podjęcie stosownych kroków w celu wyeliminowania ewentualnych niesprawności oraz umożliwia ocenę niezawodności pracy systemu. Centrale systemu DGT są wyposażone w zespół narzędzi do prowadzenia automatycznych pomiarów łączy (parametrów elektrycznych i transmisyjnych), testów aparatów telefonicznych u abonenta itd.

Za zarządzanie w systemie DGT 3450 odpowiada sieć typu Ethernet wykorzystująca protokół IP i warstwę transportową TCP, UDP. Moduły komutacyjne zlokalizowane w jednym miejscu i tworzące centralę Host są połączone w sieć o topologii gwiaździstej.

System zdalnego nadzoru central i modułów komutacyjnych DGT 3450 pozwala na obserwację i sterowanie elementów składowych systemu. Zbudowany jest w oparciu o sieć Intranet i system operacyjny Windows NT. Oprogramowanie składa się ze szkieletu zawierającego informację o strukturze systemu i poziomie alarmów jego elementów.

Możliwe jest nadzorowanie central typu HOST oraz innych central DGT3450.

W skład pakietu oprogramowania wchodzą:

- Główny program nadzorujący pojedynczy obiekt.
- Program nadzorujący poziomy alarmu w całym systemie.
- Usługa nadzorując poprawność pracy programu i zapewniająca jego uruchomienie.

• Programy narzędziowy służący do diagnostyki działania poszczególnych programów.

Całość oprogramowania uruchamiana jest automatycznie i nie wymaga obsługi. System Zdalnego Nadzoru zapewnia obserwację stanu central, który prezentowany jest z pośrednictwem interaktywnych stron HTML generowanych dynamicznie i przeglądanych standardową przeglądarką internetową. Punktów wizualnego nadzoru (monitory) może być wiele, gdyż oprogramowanie zapewnia wielodostęp. Stanowisko nadzoru może znajdować się w dowolnym miejscu sieci.

System realizuje następujące funkcje:

- Obserwacja maksymalnych stanów alarmowych we wszystkich nadzorowanych obiektach.
- Obserwacja stanu poszczególnych sekcji danej centrali.
- Obserwacja stanu procesorów wybranej sekcji procesora oraz poziomie jego alarmu).
- Obserwacja stanu łączy wybranego traktu (prezentowane są łącza danego traktu wraz z informacją o typie, stanie, numerze fizycznym i katalogowym).
- Obserwacja szczegółowych informacji o wybranym łączu (prezentowane są dane o typie łącza, jego stanie, numerze fizycznym i katalogowym, usługach dostępnych i aktywnych na danym łączu oraz atrybutach wyposażenia).
- Obserwacja stanu wiązek danej centrali wraz z informacją o stanie łączy danej wiązki.
- Obserwacja historii uszkodzeń występujących na wiązkach oraz statystyka GNR za ostatnie 24 godziny.

### **3. ROBOT POMIAROWY**

### 3.1. Budowa i funkcje robota pomiarowego

Robot jest urządzeniem służącym do wykonywania pomiarów linii abonenckich typu CB i MB oraz międzycentralowych. Pozwala wykryć zwarcia między liniami, zwarcia do ziemi, przerwy w liniach oraz inne nieprawidłowości. Możliwe jest wykonywanie testów z udziałem lub bez udziału abonenta. Testy bez udziału abonenta mogą być wykonywane w trybie automatycznym dla zestawów łączy programowanych przez obsługę centrali.

Wyniki pomiarów automatycznych zapisywane są w zbiorach dyskowych i mogą być następnie drukowane na drukarce. Podczas pomiarów z udziałem abonenta automatycznie zestawiane jest połączenie głosowe z badanym abonentem za pomocą telefonu operatora (aparatu typu CB zarezerwowanego dla współpracy z robotem.)

Dodatkowo możliwe jest przeniesienie funkcji telefonu operatora na dowolnie wybrany numer telefonu. Robot umożliwia wykonywanie pomiarów napięć stałych, zmiennych, upływności, pojemności i impedancji linii oraz rezystancji pętli a także mierzy parametry sygnałów wysyłanych przez aparat abonenta. Robot posiada programowany zasilacz napięcia i prądu stałego wykorzystywany w czasie pomiarów. Urządzenie składa się z czterech bloków montowanych w sekcji głównej centrali. Schemat blokowy robota pomiarowego przedstawiony jest na rys. 1.

Badane łącze dołączone jest do wejścia robota za pośrednictwem szyn pomiarowych (linie LA, LB, LC, LD, RON, TRON, oznaczone również jako LR1, LR2, LR3, LR4, LR5, LR6).W zależności od wykonywanych pomiarów układ dołącza badaną linię do wewnętrznych szyn PLA i PLB.

Napięcia stałe doprowadzone do linii PLA i PLB są podawane na czterozakresowy dzielnik wejściowy za pomocą przełącznika P1, a następnie przez przełącznik P5 na przetwornik A/C (12 bitów + bit znaku)

Napięcia zmienne są dodatkowo zamieniane na stałe w przetworniku AC/DC, po czym podawane są również na przetwornik A/C. Przetwornik A/C korzysta z zewnętrznego napięcia odniesienia – U ref = 0.2048 V.

SLIC (wzorcowa translacja abonencka CB) – układ zmiany paramertów impulsów dla aparatów z wybieraniem dekadowym na przebieg prostokątny, który jest mierzony w sterowniku.



Rys.1. Schemat blokowy robota pomiarowego [1]

SICOFI układ pomiaru poziomu, częstotliwości i czasu trwania przerwy dla aparatów z wybieraniem kodowo częstotliwościowym.

W realizacji procedur użytkowych i obsługowych central DGT 3450, specjalne znaczenie ma tu komunikacja człowiek – maszyna. Komunikacja ta daje możliwość prostego dostępu do informacji związanych z każdym abonentem, łączami abonenckimi i międzycentralowymi, kierunkami połączeń, taryfikacją i sygnałami alarmowymi. Pozwala na łatwe wprowadzenie programów do obróbki danych statystycznych, danych nadzoru ruchu, itp.

W przypadku sekcji oddalonej (wyniesionej) od centrali konieczne jest zamontowanie dodatkowego Robot, który będzie kontrolował linie podłączone do sekcji wyniesionej. Robot automatycznie zajmuje wybrane łącze do pomiaru. Łącze może być zajęte pod warunkiem, że jest w stanie spoczynku lub blokady.

Pomiary napięć stałych i zmiennych występujących między liniami, pomiary upływności oraz pojemności i impedancji linii wykonywane są bez udziału abonenta (ON HOOK).

Pomiary te mogą być wykonywane zarówno w trybie ręcznym jak i automatycznie dla grupy łączy w czasie programowanym przez obsługę centrali. Pozostałe pomiary wymagają współpracy abonenta, którego linię sprawdzamy. Są to pomiary rezystancji pętli abonenckiej, parametrów impulsów aparatów z wybieraniem dekadowym lub kodowo - częstotliwościowym. Pomiary te można wykonywać tylko w trybie ręcznym.

Robot umożliwia wykrycie większości uszkodzeń linii. Uszkodzenie można wykryć porównując otrzymane wyniki z wymaganiami lub stanem Z poprzednich pomiarów. Robot montowany jest w centrali i obsługuje jej wszystkie przypadku sekcji sekcie. W oddalonej od (wyniesionej) centrali konieczne jest zamontowanie dodatkowego robota, który będzie kontrolował linie podłączone do sekcji wyniesionej. Robot automatycznie zajmuje wybrane łącze do pomiaru. Łącze może być zajęte pod warunkiem, że jest w stanie spoczynku lub blokady.

Pomiary napięć stałych i zmiennych występujących między liniami, pomiary upływności oraz pojemności i impedancji linii wykonywane są bez udziału abonenta (ON – HOOK).

Pomiary te mogą być wykonywane zarówno ręcznie jak i automatycznie dla grupy łączy w czasie programowanym przez obsługę centrali. Pozostałe pomiary wymagają współpracy abonenta (OFF – HOOK), którego linię sprawdzamy. Są to pomiary rezystancji pętli, parametrów impulsów dla aparatów z tarczą numerową (wybieraniem impulsowym) i parametrów sygnałów DTMF dla aparatów z wybieraniem tonowym. Pomiary te można wykonywać tylko w trybie ręcznym. W trybie z udziałem abonenta możliwe jest także wysyłanie sygnału dzwonienia i uzyskania połączenia głosowego z abonentem.

# 3.2. Zasada pomiaru

Badane łącze dołączone jest do wejścia robota za pośrednictwem szyn pomiarowych. W zależności od wykonanych pomiarów (linie abonenckie, międzycentralowe) układ przełączający dołącza badaną linie do wewnętrznych szyn pomiarowych.

Napięcia stałe doprowadzone do linii są podawane na 4-zakresowy dzielnik wejściowy a następnie na przetwornik A/C.

Napięcia zmienne są dodatkowo zamieniane na stałe w przetworniku AC/DC, po czym podawane są również na przetwornik A/C. Przetwornik A/C korzysta z zewnętrznego napięcia odniesienia. Wartość napięcia odniesienia jest mierzona w trakcie autokalibracji i kontroli robota.

Pomiary upływności linii, rezystancji pętli oraz pojemności linii wykonywane są przy pomocy programowego zasilacza napięcia (prądu) oraz wzorcowego rezystora do pomiaru prądu. Wartość rezystora pomiarowego prądu zmieniana jest w zależności od rodzaju pomiaru. Upływność linii mierzona jest poprzez pomiar wartości prądu przy zadanym napięciu pomiarowym. Napięcie pomiarowe otrzymywane jest z zasilacza pomiarowego.

Pojemność linii mierzona jest metodą polegająca na pomiarze czasu ładowania pojemności linii prądem stałym do maksymalnego napięcia zasilacza (-60V). Prąd ładowania jest równy ok. 0,5mA.

Pomiar impedancji wykonywany jest prądem zmiennym, dla dwóch częstotliwości 400Hz i 3200Hz. Na podstawie obu pomiarów obliczana jest wartość impedancji. Przyjęto, że impedancja jest szeregowym połączeniem *R* i *C*.

# **3.3.** Pomiary z wykorzystaniem robota

Robot umożliwia przeprowadzenie następujących pomiarów analogowych łączy abonenckich (rys.2):

- a) Obcych napięć stałych występujących między:
  - ✓ linią A i Z
  - ✓ linią B i Z
  - ✓ liniami A i B
- b) Obcych napięć zmiennych występujących między:
  - ✓ linią A i Z
  - ✓ linią B i Z
  - 🖌 liniami A i B
- c) Upływności między:
  - ✓ linią A i Z
  - ✓ linią B i Z
  - ✓ liniami A i B
- d) Pojemności między:  $\checkmark$  *linią A i Z*

- $\checkmark$  liniq B i Z
- ✓ liniami A i B
- e) Rezystancji pętli abonenckiej

gdzie:A, B – linie badanego łącza, Z – zacisk uziemienia

Pomiary napięć stałych i zmiennych występujących między liniami, pomiary upływności oraz pojemności i impedancji linii wykonywane są bez udziału abonenta. Pomiary te mogą być wykonywane zarówno w ręcznie jak i automatycznie dla grupy łączy w czasie programowanym przez obsługę centrali.

Wykonanie pomiarów robotem pomiarowym wymaga skorzystania z komputera stanowiska obsługi centrali. Aplikacją komunikującą się z robotem jest program RobView.

Główne menu aplikacji (rys. 3) umożliwia wykonanie jednej z następujących czynności:

- Pomiary ręczne
  - Parametry linii zakładka pozwala na przebadanie wybranego łącza w trybie ręcznym,

- Zestawienie połączenia zakładka pozwala na wykrycie aparatu dołączonego do linii abonenckiej,
- Kontrola Robota test sprawności robota;
- Pomiary automatyczne (w tej kolejności przygotowuje się pomiary łączy)
  - Zestawy zakładka pozwala na wybranie określonej grupy z możliwych do wykonania pomiarów,
  - Limity zakładka pozwala na określenie tolerancji pomiarów, dla której dany pomiar uznajemy za poprawny,
  - Lącza zakładka pozwala na wybranie określonej grupy abonentów, dla których będą wykonywane pomiary,
  - Pomiary zakładka pozwala na określenie godziny wykonania pomiarów.
- Serwery pomiarowe zakładka konfiguracyjna robota.
- Informacje informacje o wersji i autorach aplikacji.

Pomiary Ręczne			×
Numer Łącza:	Napięcia stałe [V] :	Napięcia zmienne [V] :	
	🗖 a-Z:	🗖 a-Z:	
	□ b-Z:	□ b·Z:	
	a-b:	a-b:	
Upływności (k0hm) :			
🗖 a-Z:	Pojemności [nF] :	7	
□ b-Z:	🗖 a-Z:	Chart Chara	
🗖 ab - Z :	□ b-Z:		
🗖 a-b:	a-b:	<u>U</u> staw <u>K</u> asuj	
			0 s

Rys. 2. Okno realizacji pomiarów (menu -> pomiary ręczne)

L Robot Pomi	arowy			_ 🗆 ×
Pomiary ręczne	Pomiary automatyczne	Serwery Pomiarowe	Informacje	

Rys. 3. Menu główne aplikacji obsługi robota pomiarowego centrali.

## 4. ZAKOŃCZENIE

Robot pomiarowy jest elementem systemu diagnostyki central cyfrowych wspomagającym personel utrzymania w zakresie określenia aktualnego stanu badanych łączy i podejmowaniu decyzji o dalszych działaniach utrzymaniowych mających na celu zapewnienie ciągłości świadczenia usług telekomunikacyjnych.

pomiarowego Za pomocą robota zainstalowanego w centrali abonenckiej DGT 3450 można dokonać wielu pomiarów a w oparciu o ich możliwe jest wykrycie większości analizy uszkodzeń linii. Odczytu wyników dokonuje się na terminalu nadrzędnym - stanowisko lokalnego nadzoru i zarządzania centrali. Pomiary te nie są zauważalne przez abonenta, ponieważ nie jest pobudzany dzwonek w aparacie telefonicznym. Gdy centrala wyposażona jest w pakiet do współpracy z robotem pomiarowym to możliwe jest samodzielne lub we współpracy z zewnętrznymi urządzeniami badawczymi przeprowadzenie kontroli łaczy abonenckich lub międzycentralowych.

# LITERATURA

- Dokumentacja techniczno eksploatacyjna centrali DGT 3450. Materiały firmowe DGT spółka z o.o. Gdańsk 2003.
- [2] Jajszczyk A.: *Podstawy komunikacji kanałów*. WNT, Warszawa 1990.
- [3] Ronayne J.: *Wprowadzenie do komunikacji cyfrowej*. WNT, Warszawa 1991.
- [4] Siergiejczyk M., Wawrzyński W.: System utrzymania i nadzoru central cyfrowych DGT 3450/M.-HOST. Konferencja Naukowo-Dydaktyczna "AUTOMATYZACJA I EKSP-LOATACJA SYSTEMÓW STEROWANIA", Gdynia 1999 r., str. 332-340.
- [5] Sterowanie i oprogramowanie w telekomunikacyjnych sieciach zintegrowanych. Praca

zbiorowa pod red. M. Dąbrowskiego. WKiŁ, Warszawa 1990.

[6] Wawrzyński W., Wieczorkowski M.: Systemy monitorowania telekomunikacyjnych linii światłowodowych. V Krajowa Konferencja "Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów – DIAG 2003". Ustroń, październik 2003, str. 221-228.

Prof. dr hab. inż. **Wojciech WAWRZYŃSKI.** Zainteresowania naukowe obejmują między innymi problemy telematyki transportu ze szczególnym



uwzględnieniem bezpieczeństwa eksploatacji oraz diagnozowania technicznego systemów sterowania w transporcie; budowy systemów telekomunikacyjnych i informatycznych oraz sieci transmisji danych z zachowaniem wysokiego stopnia niezawodności przekazu.

Dr inż. **Mirosław SIERGIEJCZYK**. Obszar naukowo- badawczy współautora referatu: architektura i usługi systemów i sieci



telekomunikacyjnych (ze szczególnym uwzględnieniem możliwości ich wykorzystania w transporcie), niezawodność i eksploatacja systemów i sieci teleinformatycznych, modelowanie, projektowanie, organizacja sieci i systemów teleinformatycznych w transporcie.

# DIAGNOZOWANIE STANU MIĘŚNI NA PODSTAWIE ANALIZY WIDMOWEJ PJR

#### Andrzej DOBROWOLSKI\*, Piotr KOMUR\*, Kazimierz TOMCZYKIEWICZ\*\*

 \* Instytut Systemów Elektronicznych WEL, Wojskowa Akademia Techniczna ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa (<u>http://adobrowolski.wel.wat.edu.pl/</u>)
 \*\* Klinika Neurologiczna, Wojskowy Instytut Medyczny ul. Szaserów 128, 00-909 Warszawa

#### Streszczenie

Statystyczne opracowanie wyników badania elektromiograficznego zapewnia w większości przypadków prawidłową klasyfikację patologii bez określenia stopnia ciężkości choroby. Celem rozpoczętych badań jest stworzenie aplikacji, która wykorzystując specjalnie opracowane algorytmy cyfrowego przetwarzania sygnałów, w sposób automatyczny i jednoznaczny wyznaczy rodzaj patologii oraz – być może – stopień uszkodzenia badanego mięśnia. Drugim celem publikacji jest uporządkowanie medycznych pojęć związanych z badaniami elektromiograficznymi w kontekście inżynierskim, co pozwoli ukonstytuować niezbędną płaszczyznę łączącą środowiska medyczne i techniczne.

Słowa kluczowe: elektromiografia ilościowa, potencjał czynnościowy jednostki ruchowej, analiza widmowa.

#### DIAGNOSE OF MUSCLE CONDITION ON THE BASIS OF MUP SPECTRAL ANALYSIS

#### Summary

The statistical study of the electromyography examination results, secure in most cases the correct classification of pathology without a grade of disease qualification. The aim of beginning works is to create an application, which applies dedicated digital signal processing algorithms, automatically and unambiguously determine the kind of pathology and perhaps the grade of disease. Another aim of this paper is to clarify medical concepts connected with electromyography examination in an engineering context. This allows us to form essential common ground linked to medical and technical environments.

Keywords: quantitative electromyography, motor unit action potential, spectral analysis.

#### 1. WPROWADZENIE

*Elektromiografia (EMG)* jest badaniem czynnościowym odgrywającym podstawową rolę w diagnostyce chorób mięśni i nerwów, pozwalającym m.in. na odróżnienie zapisu mięśnia zdrowego od zmienionego oraz określenie czy zmiany chorobowe mają charakter pierwotnie mięśniowy czy neurogenny.

Statystyczne opracowanie wyników badania elektromiograficznego realizowane w dziedzinie czasu zapewnia w większości przypadków prawidłową klasyfikację patologii bez określenia stopnia zaawansowania choroby. Jednakże ze względu na niejednoznaczność definicji parametrów czasowych diagnoza może być obarczona dużym błędem, który jest w tym przypadku silną funkcją doświadczenia diagnosty. Dotychczasowa praktyka lekarska nakazuje, na zasadzie consensusu, zarejestrować przynajmniej 20 różnych potencjałów czynnościowych jednostek ruchowych wchodzących w skład jednego mięśnia. Następnie dla każdego z przebiegów wyznacza się wybrane parametry czasowe (zaprezentowane w niniejszym artykule) i w dalszej kolejności oblicza ich wartości średnie. W końcowej fazie porównuje się te wartości z normą i – opierając się jednocześnie o dodatkowe informacje elektromiograficzne – stawia diagnozę.

Kłopotliwość takiej procedury w praktyce klinicznej polega na dużej czasochłonności, wynikającej m.in. z konieczności wyznaczania wielu parametrów przebiegu, najczęściej od 4 do 7. Dodatkowym problemem jest – jak wyżej wspomniano – niejednoznaczność przy określaniu podstawowych parametrów czasowych, co może powodować wątpliwości podczas porównywania parametrów określonych przez konkretnego diagnostę z normą, wyznaczoną w innym ośrodku badawczym i najczęściej za pomocą sprzętu starszej generacji.

Niniejsza praca została zainspirowana pomysłem uzyskania średniego przebiegu potencjału ruchowego i analizy jego parametrów, zamiast uśredniania parametrów potencjałów składowych.

Istotnym problemem okazała się jednak właściwa synchronizacja przebiegów mająca w tym przypadku znaczenie krytyczne, gdyż niewielkie przesunięcia przebiegów składowych silnie wpływały na kształt przebiegu wypadkowego. Przedstawiony problem stał się pierwotną przyczyną zainteresowania zastosowaniem autorów klasycznej analizv fourierowskiej. Średnie widmo amplitudowe, ze względu na swoją naturę, okazało się praktycznie niewrażliwe na synchronizację czasową przebiegów składowych, co umożliwiło zastosowanie klarownych i niezależnych od diagnosty procedur obliczeniowych.

Końcowym efektem pierwszego etapu badań jest pojedynczej zdefiniowanie dyskryminanty punktowej umożliwiającej bezpośrednio postawienie Podstawową jednoznacznej diagnozy. zaleta proponowanej dyskryminanty jest precyzyjna realizowalna w sposób zalgorytmizowany definicja, pozwalająca na obiektywne porównywanie wyników badań uzyskiwanych przez diagnostów o różnym doświadczeniu i pochodzących z różnych ośrodków badawczych. Spełnia więc podstawowe kryterium parametru służącego do określenia normy. Propozycja takiej normy dla wybranego mieśnia przedstawiona jest w końcowej części artykułu.

Poza określeniem czy ewentualne zmiany chorobowe mają charakter miogenny czy neurogenny elektromiografia pozwala na:

- ustalenie lokalizacji procesu;
- ocenę dynamiki procesu;
- różnicowanie niedowładu pochodzenia ośrodkowego od obwodowego czy psychogennego.

Elektromiografia jest często uzupełniana *elektroneurografią* (*ENG*), czyli badaniem przewodnictwa we włóknach czuciowych i ruchowych nerwów.

*Włókna mięśniowe* mają średnicę 10 ÷ 100 μm i długość od 1 mm do kilkunastu centymetrów. Grupa włókien mięśniowych unerwionych przez jeden *neuron ruchowy* tworzy tzw. *jednostkę ruchową*, w której skład wchodzą:

- komórka ruchowa rogów przednich lub jądro ruchowe nerwów czaszkowych wraz z aksonem (wypustką nerwu biegnącą do mięśnia),
- unerwione przez nią włókna mięśniowe,
- złącza (płytki) nerwowo-mięśniowe, tworzące połączenia między zakończeniami aksonu, a włóknami mięśniowymi.

Skurcz włókna mięśniowego można uznać za proces biochemiczny ściśle zwiazany pobudzeniem elektrycznym czyli blony, Z potencjałem czynnościowym włókna mięśniowego. Powstanie pobudzenia elektrycznego oparte jest na teorii jonowej, w myśl której pobudzenie komórki sprowadza się do zmiany przepuszczalności błony dla jonów sodu i potasu. Potencjał spoczynkowy jest elektrochemicznego wynikiem gradientu rozmieszczeniu jonów oraz różnej w

przepuszczalności błony dla poszczególnych jonów. Potencjał spoczynkowy jest kształtowany głównie przez jony sodu, potasu i chloru. Gradient elektrochemiczny dla jonów sodu i potasu jest utrzymywany dzięki stałej czynności pompy sodowo-potasowej odpowiedzialnej za aktywny transport jonów.

Impuls biegnacy nerwem ruchowym uwalnia płytce nerwowo-mięśniowej, acetylocholinę w przenoszącą pobudzenie na włókno mięśniowe. pobudzenia następuje W czasie gwałtowne przejściowe odwrócenie potencjału błonowego z ujemnego na dodatni, tzw. depolaryzacja. Zjawisku temu towarzyszy przepływ prądów powstałych błonowych W wyniku zmian przepuszczalności dla jonów sodu i potasu. Pobudzenie włókna rozpoczyna się w okolicy płytki nerwowo-mięśniowej i propaguje się w zależności od typu włókna z predkościa około 1,5÷6,0 m/s jednocześnie błony kanalików obeimujac Depolaryzacja poprzecznych. tvch struktur powoduje gwałtowne uwalnianie jonów wapnia ze zbiorników końcowych do cytoplazmy, co wywołuje skurcz włókna mięśniowego.

Przyczyną chorób nerwowo-mięśniowych jest uszkodzenie poszczególnych elementów jednostki ruchowej. Wyróżnia się miopatie, czyli choroby mięśni oraz neuropatie będące chorobami nerwów obwodowych. Proces chorobowy może również objąć swoim zasięgiem złącze nerwowo-mięśniowe wówczas również podlega ocenie i elektrofizjologicznej. Obraz kliniczny miopatii wykazuje m.in. obecność charakterystycznych zmian elektromiograficznych, tzw. zapis miogenny, natomiast w przypadku neuropatii otrzymuje się tzw. zapis neurogenny.

Badanie EMG polega na wprowadzeniu do mięśnia elektrody igłowej i rejestracji potencjałów z mięśnia w spoczynku oraz podczas słabego i maksymalnego wysiłku. Zarejestrowane potencjały noszą nazwę potencjałów czynnościowych jednostek ruchowych (PJR). Podczas badania elektroda jest przemieszczana wielokrotnie, w celu oceny różnych fragmentów mięśnia. PJR przedstawia krzywą ilustrującą depolaryzację i repolaryzację włókna mięśniowego, a charakter tej krzywej świadczy o prawidłowej bądź nieprawidłowej czynności elektrycznej jednostki ruchowej. Diagnoza z reguły poprzedzona jest statystyczną analizą kształtu [1, 2], a w szczególności amplitudy i czasu trwania PJR tzw. elektromiografia ilościowa (QEMG). Aby zapewnić wiarygodność analizy statystycznej konieczny jest pomiar co najmniej 20 różnych potencjałów, przy czym nie uwzględnia się przebiegów o wartości międzyszczytowej mniejszej od 50 µV. Kryterium wyboru potencjałów jest co najmniej pięciokrotne występowanie w tym samym zapisie potencjałów o identycznym kształcie.

W ostatnich latach, w celu zwiększenia wartości diagnostycznej pomiarów QEMG, stosuje się m.in. parametry statystyczne wyższych rzędów [3], sztuczne sieci neuronowe [4], analizę widmową [5] i falkową [6], filtrację cyfrową [7] oraz techniki modelowania [8]. Główną zaletą prezentowanej w tym artykule metody widmowej jest brak konieczności precyzyjnego wyznaczania początku i końca PJR oraz pozostałych – przedstawionych w kolejnym rozdziale – parametrów definiowanych w dziedzinie czasu.

### 2. ELEKTROMIOGRAM FIZJOLOGICZNY I PATOLOGICZNY

W stanie spoczynku w mięśniu zdrowym nie stwierdza się czynności elektrycznej. Przy wkłuwaniu elektrody igłowej w rozluźniony mięsień prawidłowa jest jedynie krótkotrwała aktywność spontaniczna jako wyraz nadmiernej pobudliwości błony komórkowej włókna mięśniowego. Pojawienie się długotrwałej aktywności spontanicznej w spoczynku jest patologią.

Podczas skurczu mięśnia, zależnie od jego siły, angażowana jest mniejsza lub większa liczba jednostek ruchowych. Przy lekkim skurczu mięśnia można wyróżnić pojedyncze potencjały jednostek ruchowych, przy skurczu silniejszym lub maksymalnym poszczególne potencjały nakładają się na siebie, tworząc *zapis interferencyjny* będący efektem sumowania w czasie i przestrzeni potencjałów różnych jednostek ruchowych.

Parametry fizjologicznych potencjałów czynnościowych jednostek ruchowych określone w populacji zdrowych dorosłych ludzi z uwzględnieniem rodzaju mięśnia przedstawione są w [9], a definicje parametrów zilustrowane są na rys. 1. Prawidłowe wartości amplitud PJR wynoszą od kilkuset µV do kilku mV, a czasy trwania mieszcza się w przedziale od kilku do kilkunastu ms. Liczba faz w warunkach fizjologicznych jest mniejsza od 4. Dopuszcza się jednak wystąpienie od 3-15% potencjałów wielofazowych.



Rys. 1. Ilustracja parametrów PJR

Przyjmuje się następujące definicje parametrów czasowych:

• **Amplitudę** *A* potencjału definiuje się jako wartość międzyszczytową.

- Czas trwania PJR t<sub>w</sub> mierzy się od pierwszego wychylenia przebiegu od linii podstawy do punktu, w którym końcowa faza przebiegu z powrotem osiąga linię podstawy z określoną procentowo lub bezwzględnie tolerancją amplitudy.
- Czas trwania impulsu *t<sub>i</sub>* określa się jako czas między minimami określającymi największe dodatnie wychylenie potencjału.
- Czas ekwiwalentny  $t_e$  jest czasem impulsu prostokątnego zapewniającym taką samą powierzchnię jak badany przebieg przy amplitudzie równej amplitudzie badanego impulsu.
- Powierzchnia S jest określana jako powierzchnia pod modułem przebiegu, w przedziale określonym przez czas trwania t<sub>w</sub>.
- Liczbę faz *l<sub>F</sub>* definiuje się jako liczbę odchyleń potencjału od linii podstawy.
- Zwroty definiuje się jako punkty zmiany kierunku potencjału, czyli ekstrema przebiegu, zaś liczbę zwrotów *l*<sub>z</sub> wyznacza się biorąc pod uwagę jedynie te sąsiednie punkty zmiany kierunku, dla których różnica wartości przekracza określoną wartość progową.

wyników należy Podczas analizy mieć świadomość, że w przedziale  $\pm \sigma$  wokół wartości średniej mieści się zaledwie 68% przypadków, dla  $\pm 1.5\sigma$  jest to już 87%, a przedział  $\pm 2.5\sigma$  pokrywa 98,8%, czyli "praktycznie" całą populację. Główny problem diagnostyczny pojawiajacy się podczas niejednokrotnie stosowania analizy czasowej polega na często występującym częściowym pokrywaniu się przedziałów  $\pm 2.5\sigma$ w przypadkach fizjologicznych i patologicznych.

Opracowywany przez autorów program analizujący przebiegi PJR wartość średnią  $\mu_x$ wyznacza w sposób klasyczny, zaś odchylenie standardowe  $\sigma_x$  oblicza na podstawie zależności ograniczającej błąd zaokrąglenia

$$\sigma_{x} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left( \sum_{i=1}^{N} x_{i}^{2} - N \,\mu_{x}^{2} \right)}$$
(1)

Procedura napisana w oparciu o zależność (1) jest wydajniejsza obliczeniowo od procedur bazujących bezpośrednio na definicji odchylenia standardowego oraz dokładniejsza – szczególnie, gdy wartość średnia jest dużo większa od odchylenia standardowego. W takim przypadku zgodnie ze wzorem definicyjnym należy odejmować w pętli dwie duże, lecz bliskie sobie wartości, co powoduje generację dużego błędu zaokrąglenia.

Wydłużenie średniego czasu trwania PJR, wzrost amplitudy oraz liczby potencjałów wielofazowych, zwiększenie powierzchni jednostki ruchowej oraz zubożenie zapisu wysiłkowego wskazują na proces neurogenny. Z drugiej strony do skrócenia średniego czasu trwania PJR, zmniejszenia powierzchni, zmniejszenia amplitudy i zwiększenia wielofazowości dochodzi w chorobach mięśni. W przebiegu reinerwacji po uszkodzeniu nerwu obwodowego w pierwszym okresie mogą pojawić sie potencjały wielofazowe o niskiej amplitudzie i krótkim czasie trwania. W procesach neurogennych dochodzi do zubożenia zapisu wysiłkowego, zmniejszenia liczby zwrotów oraz zmniejszenia stosunku napięcia pomiędzy sąsiednimi zwrotami do średniej amplitudy. Natomiast w procesach, gdzie ma miejsce uszkodzenie pierwotnie mięśniowe dochodzi zwiększenia do liczby zwrotów zwiększenia stosunku napięcia pomiędzy i sąsiednimi zwrotami do średniej amplitudy.

Reasumując można stwierdzić, że w przypadkach uszkodzeń neurogennych pojawia się zapis charakteryzujący się:

- aktywnością spontaniczną w spoczynku,
- wydłużonym czasem trwania i wysokimi amplitudami PJR,
- podwyższoną wielofazowością,
- ubogim zapisem wysiłkowym.

W przypadkach uszkodzeń pierwotnie mięśniowych mamy do czynienia z zapisem miogennym charakteryzującym się:

- krótkim czasem trwania i niską amplitudą PJR,
- podwyższoną wielofazowością,
- bogatym zapisem wysiłkowym tzw. *interferencja patologiczna*.

## 3. CHARAKTERYSTYKA SYSTEMU AKWIZYCJI SYGNAŁÓW

Do badania i archiwizacji sygnałów EMG zastosowano system *Viking IV D* amerykańskiej firmy *Nicolet BioMedical Inc.* W systemie tym sygnał pomiarowy z badanej jednostki ruchowej mierzony za pomocą koncentrycznej elektrody igłowej o średnicy 0,45 mm produkcji włoskiej firmy *Spes Medica s.r.l.* jest wzmacniany w niskoszumnym wzmacniaczu pomiarowym o regulowanym wzmocnieniu, a następnie – po filtracji antyaliasingowej – poddawany przetwarzaniu analogowo-cyfrowemu.

Podstawowe parametry techniczne systemu *Viking IV D*:

- ustawiane programowo wzmocnienie: od 200 000 V/V do 20 V/V w 13-tu krokach wg reguły 4-2-1 (czułość: od 1 μV/dz do 10 mV/dz w 13-tu krokach wg reguły 1-2-5);
- impedancja wejściowa: > 1 GΩ;
- współczynnik tłumienia sygnału wspólnego: > 100 dB;
- wartość skuteczna napięcia szumów na wyjściu, w paśmie od 2 Hz do 10 kHz, przy zwartym wejściu: < 0,7 μV;</li>
- rozdzielczość przetwornika A/C: 12 bitów;
- czas przetwarzania przetwornika A/C: 1 μs;
- nominalny pełny zakres przetwarzania przetwornika A/C: ± 1 V;
- całkowity błąd analogowy przetwornika A/C: < 1 LSB;</li>

- częstotliwość próbkowania: 20 kHz;
- długość ciągu: 2000 próbek (100 ms).

W praktyce podczas rejestracji potencjałów jednostki ruchowej, w zależności od diagnozowanego przypadku, stosuje się czułości od 50  $\mu$ V/dz do 1 mV/dz, co oznacza faktyczną rozdzielczość amplitudową na poziomie

$$LSB = \frac{U_{FS}}{2^n} = \frac{U_{FS}}{2^{12}} \implies \begin{cases} LSB_{\min} = 0.12 \,\mu V \\ LSB_{\max} = 2.44 \,\mu V \end{cases}$$
(2)

przy czym  $U_{FS}$  oznacza nominalny pełny zakres przetwarzania (z uwzględnieniem wstępnego wzmocnienia), zaś *n* liczbę bitów słowa wyjściowego przetwornika A/C.

Charakterystyka częstotliwościowa toru z uwzględnieniem filtracji antyaliasingowej oraz wstępnego przetwarzania cyfrowego, przedstawiona jest na rys. 2;



Rys. 2. Charakterystyka częstotliwościowa toru pomiarowego (zacieniowano obszar analizy widma)

#### 4. FOURIEROWSKA ANALIZA WIDMOWA

Ze względu na stosunkowo krótkie wektory próbek czasowych (od około 100 do 400 próbek) i zmienną, na etapie wstępnych badań, długość tych ciągów zrezygnowano z popularnych algorytmów szybkiej transformaty Fouriera na rzecz klasycznej umożliwiającej uzyskanie dowolnej definicji ziarnistości transformaty dziedzinie W czestotliwości, co w rozważanych przypadkach okazało sie własnościa bardzo cenna, m.in, ze względu na wąski fragment interesującego wycinka widma.

Przyjmując, że transformata liczona będzie dla  $\alpha$  razy więcej częstotliwości niż próbek w dziedzinie czasu posiada sygnał, otrzymujemy zależność określającą tzw. *częstotliwości analizy* 

$$m \cdot \Delta f = m \cdot \frac{f_s}{\alpha N} \tag{3}$$

przy czym *m* indeksuje próbki transformaty, natomiast *N* oznacza całkowitą liczbę próbek ciągu wejściowego. Indeks *m* zmienia się od 0 do  $\alpha N - 1$ .

Zależność (3) zawiera pewną modyfikację zależności klasycznej, w której parametr  $\alpha$  nie

występuje. Wprowadzenie wartości  $\alpha > 1$  umożliwia dowolne zagęszczenie transformaty nie wymagające uzupełniania zerami niezbędnego w przypadku stosowania algorytmów FFT. Ponadto – w przeciwieństwie do algorytmów FFT – przedstawione podejście pozwala na obserwację dowolnego wycinka pasma poprzez swobodny wybór indeksu *m*, tzn. interesujące pasmo określa się jako:  $m_{\min} \Delta f \div m_{\max} \Delta f$ .

Przyjęty algorytm dyskretnej transformaty Fouriera określony jest zależnością

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi \frac{mn}{\alpha N}}$$
(4)

Podlegające ocenie diagnostycznej widmo potencjału jednostki ruchowej  $U(m \cdot \Delta f)$  określane jest za pomocą zagęszczonej DFT, na podstawie wycinka sygnału o stałym czasie trwania. Ponieważ umowny - ze względu na specyficzny sposób wyzwalania pomiaru - punkt środkowy wypada w systemie Viking IV D w 40 ms ( $n_s = 800$ ), a czasy trwania PJR z reguły nie przekraczają znacząco 15 ms, autorzy zdecydowali się na analize widmowa wycinka czasowego o długości 20 ms (401 próbek), zawartego między  $n_{min} = 600$  i  $n_{max} = 1000$ (30 ms ÷ 50 ms). Ponieważ obserwacja wielu różnorodnych przebiegów PJR wskazuje, że istotna informacja diagnostyczna zawarta jest w paśmie od 1 kHz, 50 Hz do końcowa zależność zaimplementowana w programie diagnostycznym uzyskuje postać

$$U(m \cdot \Delta f)_{[dB\mu V]} =$$

$$= 20 \log \left( \frac{2 \cdot 10^{6}}{n_{\max} - n_{\min} + 1} \cdot \sum_{n=n_{\min}}^{n_{\max}} x(n) e^{-j2\pi n m \frac{\Delta f}{f_{s}}} \right), \quad (5)$$

$$dla \quad \frac{50 Hz}{\Delta f} \le m \le \frac{1 \text{kHz}}{\Delta f}$$

Transformata obliczana jest z ziarnistością  $\Delta f = 10$  Hz. Górna granica zakresu, w którym obliczane jest widmo  $f_{\text{max}} = 1$  kHz została przyjęta doświadczalnie na podstawie obserwacji, wskazującej, że powyżej tej częstotliwości poziom widma zaczyna zbliżać się do poziomu szumów i zakłóceń. Dolna granica  $f_{\text{min}} = 50$  Hz wynika z przyjętego czasu obserwacji (20 ms).

Niosące zasadniczą informację diagnostyczną uśrednione widmo amplitudowe jest określane jako średnia arytmetyczna widm poszczególnych PJR, przy czym – jak już wcześniej wspomniano – liczba PJR K nie powinna być mniejsza od 20

$$U_{sr}(m \cdot \Delta f) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} U_k(m \cdot \Delta f)$$
(6)

Dyskryminantę  $\delta$  umożliwiającą klasyfikację diagnozowanego przypadku do grupy przypadków fizjologicznych bądź miogennych lub neurogennych wyznacza się jako średni poziom widma uśrednionego, wg zależności

$$\delta = \frac{1}{m_{\max} - m_{\min} + 1} \cdot \sum_{m=m_{\min}}^{m_{\max}} U_{sr}(m \cdot \Delta f)$$
(7)

#### 5. DYSKUSJA WYNIKÓW

Badania przeprowadzono na 16-to osobowej grupie osób dorosłych (w wieku od 16 do 78 lat) obojga płci (w tym 7 kobiet i 9 mężczyzn). W grupie tej 6 osób zaklasyfikowano jako zdrowe, u 5-ciu stwierdzono miopatię, a u pozostałych 5-ciu neuropatię. W każdym przypadku analizowano po 20 przebiegów PJR pochodzących z mięśnia naramiennego (*deltoid*).

Na rys. 3 i 4 przedstawiono uśrednione widma amplitudowe potencjałów czynnościowych jednostek ruchowych i ich wartości średnie  $\delta$  we wszystkich wymienionych przypadkach.



Rys. 3. Srednie widma amplitudowe sygnałów PJR z mięśnia naramiennego: a) przypadki fizjologiczne,
b) przypadki miogenne,
c) przypadki neurogenne





Zaprezentowane wvniki pozwalają na stwierdzenie, że podejście widmowe może poważnie uprościć proces diagnozowania oraz zwiększyć trafność diagnozy stawianej na podstawie analizy QEMG. Celem dalszych badań jest określenie norm pozwalających jednoznaczną klasyfikację na przypadków neurogennych miogennych, i fizjologicznych dla pozostałych mięśni. Autorzy pracują obecnie nad implementacją programie zaproponowanych procedur W diagnostycznym współpracującym z systemem Viking IV D.

### LITERATURA

- E. Zalewska, I. Hausmanowa-Petrusewicz, *"Effectiveness of motor unit potentials classification using various parameters and indexes*", J. Clinical Neurophysiology, vol. 111(8), 2000, s. 1380 – 1387.
- [2] E. Stalberg, S. D. Nandedkar, D. B. Sanders, B. Falck, *"Quantitative motor unit potential analysis*", J. Clinical Neurophysiology, vol. 13(5), 1996, s. 401 – 422.
- [3] S. Shahid, J. Walker, G. M. Lyons, C. A. Byrne, A.V. Nene, "Application of higher order statistics techniques to EMG signals to characterize the motor unit action potential", IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 52, 2005, s. 1195 – 1209.
- [4] C. I. Christodoulou, C. S. Pattichis, "Unsupervised pattern recognition for the classification of EMG signals", IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 46, 1999, s. 169 – 178.
- [5] C. S. Pattichis, A. G. Elia, "Autoregressive and cepstral analyses of motor unit action potentials", Medical Engineering & Physics, vol. 21, 1999, s. 405 – 419.
- [6] C. S. Pattichis, M. S. Pattichis, *"Time-scale analysis of motor unit action potentials"*, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 46, 1999, s. 1320 1329.

- [7] I. Rodriguez-Carreno, A. Malanda-Trigueros, L. Gila-Useros, J. Navallas-Irujo, J. Rodriguez-Falces, *"Filter design for cancellation of baseline-fluctuation in needle EMG recordings"*, Computer methods and programs in biomedicine, vol. 81, 2006, s. 79 – 93.
- [8] E. Zalewska, I. Hausmanowa-Petrusewicz, E. Stalberg "Modeling studies on irregular motor unit potentials", J. Clinical Neurophysiology, vol. 115(3), 2004, s. 543 – 556.
- [9] Ch. Bischoff, E. Stalberg, B. Falck, K. Edebol Eeg-Olofsson, "*Reference values of motor unit* action potentials obtained with multi-MUAP analysis", Muscle & Nerve, vol. 17, 1994, s. 842 – 851.



Andrzej Dr inż. DOBROWOLSKI jest adiunktem naukowodydaktycznym na Wydziale Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, wykładowcą przedmiotów "Układy analogowe" i "Komputerowa analiza układów elektronicznych". Jego zaintereso-

wania naukowe koncentrują się na cyfrowym przetwarzaniu sygnałów biomedycznych.



Mgr inż. Piotr KOMUR jest pracownikiem naukowo - dydaktycznym Instytutu Systemów Elektronicznych Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Prowadzi zajęcia z przedmiotów "Układy analogowe" i "Podstawy modulacji i detekcji". Głównym obszarem jego zaintereso-

wań są programowalne układy analogowe oraz komputerowa analiza układów elektronicznych.



Dr n. med. Kazimierz TOMCZYKIEWICZ jest adiunktem Kliniki Neurologicznej Wojskowego Instytutu Medycznego Warszawie. w Jego zainteresowania naukowe koncentrują się na neurofizjologii klinicznej zastosowaniu oraz jej w praktyce klinicznej. Jest

Sekretarzem Polskiego Towarzystwa Neurofizjologii Klinicznej.

# OKREŚLENIE ROZKŁADU NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH W FUNKCJI GŁĘBOKOŚCI WARSTWY WIERZCHNIEJ ELEMENTU MASZYNY

#### Józef BŁACHNIO

#### Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa, fax: 22 6852182, email: jozef.blachnio@itwl.pl

#### Streszczenie

Posiadanie wiarygodnej i kompletnej informacji o stanie maszyny, jest niezbędne do podjęcia prawidłowych decyzji o dopuszczeniu jej do dalszej eksploatacji. Stosowane metody badań nieniszczących umożliwiają między innymi diagnozowanie własności warstwy wierzchniej elementów maszyn. Jednakże głębokość pomiaru naprężeń za pomocą metod nieniszczących jest ograniczona do grubości rzędu kilkudziesięciu mikrometrów, a otrzymany wynik jest uśrednioną wartością z tej głębokości. Jedną z metod określania naprężeń jest metoda polowego efektu Barkhausena. Zastosowanie analizy falkowej oraz modelu tłumienia sygnału efektu Barkhausena pozwoliło zbudować funkcje skalujące odwzorowujące parametry tego sygnału na rozkład naprężeń w warstwie wierzchniej. Opracowaną metodę diagnostyczną zastosowano do określenia rozkładu naprężeń własnych w warstwie wierzchniej łopatki sprężarki osiowej silnika turbinowego.

Słowa kluczowe: warstwa wierzchnia, naprężenia własne, efekt Barkhausena, transformata falkowa.

### THE ASSESSMENT OF INTERNAL STRESS DISTRIBUTION AGAINST DEPTH OF THE MACHINE COMPONENT'S SURFACE LAYER

#### Summary

The reliable and complete information on machine's health proves necessary to make a correct decision on allowing further operational use of this machine, or not. The non-destructive testing (NDT) methods in use facilitate, among other things, the diagnosing of properties of surface layers of the machine's components. However, the depth of taking stress measurements with the NDT methods has been limited down to tens of micrometers, the result gained is an averaged value of this depth. The Barkhausen field effect method is one of the methods to evaluate the stress. The wavelet analysis and the model of suppressing the Barkhausen effect signal have enabled generation of scaling functions that provide the signal parameters mapping on the stress distribution in the surface layer. The already developed diagnostic method has been applied to assess the internal stress distribution in the surface layer of a blade of the turbine engine's axial compressor.

Keywords: surface layer, residual stress, Barkhausen effect, wavelet transform.

## 1. WPROWADZENIE

W procesie eksploatacji maszyn oddziałują na nie obciążenia mechaniczne, cieplne i inne o różnej intensywności i częstotliwości, powodujac pogarszanie ich stanu technicznego Posiadanie wiarygodnej i kompletnej informacji o stanie maszyny, a zwłaszcza o stanie jej odpowiedzialnych elementów, jest niezbędne do podjecia prawidłowych decyzji o dopuszczeniu maszyny do dalszej eksploatacji. Dlatego prowadzone są prace nad rozwojem metod diagnostycznych, pozwalające w sposób nieniszczący uzyskać jak największą wiedzę o stanie elementu maszyny. Stosowane metody badań nieniszczących umożliwiają między innymi diagnozowanie własności warstwy

wierzchniej elementów maszyn. Stąd też o stanie elementu maszyny można wnioskować na podstawie własności materiału w warstwie wierzchniej. Takie podejście wydaje się być prawidłowe, gdyż warstwa wierzchnia jest pod bezpośrednim wpływem czynników zewnetrznych działajacych podczas eksploatacii i jej własności zmieniaja sie szybciej niż własności rdzenia. Jednakże głębokość penetracji większości nieniszczących metod diagnostycznych jest ograniczona do warstwy przypowierzchniowej o grubości rzędu kilkudziesięciu mikrometrów [1, 2, 3]. Jeśli nawet metoda umożliwia badanie materiału do głębokości większej to i tak otrzymany wynik jest uśrednioną reprezentacją własności materiału z tej głębokości. Trudno jest więc określić jak kształtują się własności materiału w funkcji głębokości. Informacja taka pozwoliłaby określić nie tylko stan materiału, ale również obserwować tendencję zachodzących zmian podczas eksploatacji elementu maszyny.

Okresowe badania stanu technicznego elementów maszyn są istotnym czynnikiem wyznaczającym poziom bezpieczeństwa i określającym ekonomikę eksploatacji maszyn. Znajomość stanu technicznego maszyny pozwala ocenić zużycie eksploatacyjne jej podzespołów. Na podstawie znajomości stopnia i rodzaju zużycia można zaplanować właściwą obsługę techniczną, terminy przeglądów oraz ewentualnych napraw, a także zadecydować o wycofaniu danego elementu maszyny z eksploatacji.

Spośród metod badań nieniszczących istotną rolę odgrywają metody magnetyczne [1, 2, 4]. Jedną z takich metod jest metoda polowego efektu Barkhausena. Opiera się ona na obserwacji wymuszonych polem magnetycznym oddziaływań pomiędzy strukturą domenową ferromagnetyka a jego strukturą krystaliczną, z którą powiązane są własności materiału tj. naprężenia własne, defekty struktury, udział fazy niemagnetycznej itp. Wzajemne oddziaływania struktury domenowej i krystalicznej są rejestrowane w postaci sygnału zwanego szumem magnetycznym lub zwanego sygnałem efektu Barkhausena, w skrócie SEB.

### 2. ISTOTA METODY POLOWEGO EFEKTU BARKHAUSENA

Metoda polowego efektu Barkhausena opiera się na pomiarze sygnału napięciowego indukowanego w cewce pomiarowej przyłożonej do ferromagnetyka, który jest poddany działaniu zmiennego pola magnetycznego. Sygnał ten ma charakter szybko zmiennego sygnału niestacjonarnego (rys. 1).

Zewnętrzne pole magnetyczne wymusza ferromagnetyku kierunków w zmiany namagnesowania domen magnetycznych. Zmiana namagnesowania domen powoduje przemieszczanie się ścian domen, tak aby ich wewnętrzna energia była jak najniższa [5, 6]. Ponieważ domeny magnetyczne są obszarami sieci krystalicznej o jednakowej orientacji wektorów magnetycznych atomów, istnieje wzajemne nakładanie się struktury magnetycznej ferromagnetyka i jego struktury krystalicznej. Struktura krystaliczna ma wpływ na konfigurację domen, zaś struktura magnetyczna na własności sieci krystalicznej np. naprężenia własne.

Magnesowanie ferromagnetyka, czyli zmiana kierunków wektorów magnetycznych domen może być więc hamowana lub stymulowana bezpośrednio przez naprężenia mechaniczne oraz pośrednio przez defekty struktury, które blokują bądź ułatwiają przemieszczanie się ścian domen. Obserwując intensywność ruchu ścian domen można określić poziom i kierunek naprężeń własnych lub określić rodzaj mikrostruktury ferromagnetyka.







Rys. 2. Krzywa wzorcowania jednoosiowego [7]:  $\varepsilon_0 - rzeczywiste odkształcenie zerowe,$  $\varepsilon_r - odkształcenie rozciągające,$  $\varepsilon_s - odkształcenie ściskające$ 

Impulsy napięciowe rejestrowane w cewce podczas magnesowania ferromagnetyka są informacją o intensywności zmian natężenia wewnętrznego pola magnetycznego ferromagnetyka,

102

wywołanego ruchem ścian domen. Zmiana natężenia pola magnetycznego ferromagnetyka przebiega gwałtownie w momencie, gdy grupa ścian domen przemieści się skokowo pokonując siły oddziaływań atomowych w sieci krystalicznej. Wówczas poziom wewnętrznej energii magnetostatycznej i magnetosprężystej domen jest najwyższy, a gwałtowny wzrost natężenia wewnętrznego pola magnetycznego indukuje impulsy napięciowe w przyłożonej cewce w postaci SEB. Liczba i amplituda impulsów korelują z intensywnością zjawiska przemieszczania się ścian domen, które to parametry SEB umożliwiają oznaczenie kierunku i poziomu naprężeń własnych. Rys. 2 przedstawia amplitudy zależność średniej impulsów napięciowych SEB wyrażonych w postaci parametru MP od wartości odkształcenia plastycznego, jest to krzywa wzorcowania jednoosiowego.

## 3. WIARYGODNOŚĆ OKREŚLANIA NAPRĘŻEŃ NA PODSTAWIE SYGNAŁU EFEKTU BARKHAUSENA

Zmiany struktury domenowej mające wpływ na poziom SEB mogą być wykorzystane do pomiaru naprężeń. Pomiar ten jest możliwy w sposób pośredni. Bezpośrednio dokonuje się pomiaru wielkości parametru magnetosprężystego MP (odzwierciedlającego amplitudę impulsów SEB) w funkcji wartości zadawanych naprężeń  $\sigma$ . Uzyskana w ten sposób eksperymentalna funkcji  $MP = f(\sigma)$  jest zależnością wzorcową [8, 9].

W przedmiocie badań w ogólnym przypadku występuje przestrzenny stan naprężeń. Stan ten dla ciał wykazujących przestrzenną anizotropię może być opisany przez stan odkształcenia. Opierając się na podstawowym prawie Hooke'a, które zakłada liniową jednorodną zależność pomiędzy składowymi stanu naprężenia  $\sigma_i$  oraz stanu odkształcenia  $\varepsilon_i$ [9, 10], dla ciała izotropowego naprężenia w trzech kierunkach głównych wyrażają się zależnościami:

$$\sigma_{1} = \frac{2G}{1-2\nu} [(1-\nu)\boldsymbol{\varepsilon}_{1} + \nu(\boldsymbol{\varepsilon}_{2} + \boldsymbol{\varepsilon}_{3})],$$
  

$$\sigma_{2} = \frac{2G}{1-2\nu} [(1-\nu)\boldsymbol{\varepsilon}_{2} + \nu(\boldsymbol{\varepsilon}_{3} + \boldsymbol{\varepsilon}_{1})], \quad (1)$$
  

$$\sigma_{3} = \frac{2G}{1-2\nu} [(1-\nu)\boldsymbol{\varepsilon}_{3} + \nu(\boldsymbol{\varepsilon}_{1} + \boldsymbol{\varepsilon}_{2})],$$

gdzie:  $G = \frac{E}{2(1+v)}$  - moduł Kirchhoffa, *E* - moduł

Younga, v- współczynnik Poissona.

Według literatury [1, 4, 11] możliwe jest przeprowadzenie klasycznego wzorcowania jednoosiowego, jak i dwuosiowego. Wzorcowanie jednoosiowe (rys. 2) jest przydatne wówczas, gdy składowa poprzeczna naprężenia stanowi mniej niż 25 % granicy sprężystości materiału próbki [1, 4], co odnosi się głównie do próbek (np. płaskich) odpowiednio wąskich i długich.

Wzorcowanie dwuosiowe umożliwia określenie płaskiego stanu naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu badań. Zasadniczo, wzorcowanie dwuosiowe polega na wyznaczaniu zestawu krzywych wzorcowania jednoosiowego otrzymanych przez zmianę naprężeń poprzecznych w taki sposób, aby objąć wszystkie kombinacje składowych naprężeń podłużnych i poprzecznych.

Przedstawione sposoby wzorcowania jednoosiowego i dwuosiowego nie zapewniają wystarczającej dokładności i precyzji określania gdyż oparte pewnych naprężeń, są na się spodziewać, uproszczeniach. Można że dokładność i precyzja określania naprężeń będzie się pogarszać w przypadku stosowania przedmiotów badań, w których występują naprężenia własne bądź własności anizotropia magnetospreżystych materiału.

metode Opracowano własną określenia zależności SEB od naprężeń, bazując na innej znanej nieniszczącej metodzie pomiaru naprężeń. Za punkt wyjścia przyjęto głębokość i powierzchnię pomiaru SEB. Poszukując metody pomiaru naprężeń, w której tą wielkość fizyczną mierzy się na porównywalnej głębokości i na porównywalnej powierzchni, zwrócono uwagę na klasyczną dyfraktometryczną metodę rentgenowską  $\sin^2 \varphi$  [1, 3]. Metoda ta umożliwia uzyskiwanie wyników pomiaru naprężeń z dużą dokładnością i precyzją. Dokładność metody oraz rozmiary badanego obszaru powierzchni próbki zależą między innymi od struktury materiału, kształtu powierzchni próbki i zastosowanej techniki pomiarowej.

Określenie zależności SEB od napreżeń przeprowadzono na próbkach wzorcowych płaskich ze stali 18H2N4WA: niewyżarzonej i wyżarzonej, poddawanych naprężeniom rozciągającym i ściskającym przez zginanie. W centralnym punkcie próbki, przy stałej wartości strzałki ugięcia dokonywano w kierunku wzdłużnym, kolejno pomiaru naprężenia  $\sigma_{re}$  metodą dyfraktometryczną  $\sin^2 \varphi$ , a następnie parametru magnetosprężystego MP. Pomiar naprężenia trwał kilkadziesiąt minut, natomiast parametru magnetosprężystego kilka sekund. Każdorazowo próbka była zginana o pewną wartość strzałki ugięcia, aż do zakresu plastycznego jej materiału. Krótkie czasy pomiarów zapobiegały relaksacji napreżeń w odkształconej próbce, szczególnie w pobliżu granicy spreżystości materiału, co miało korzystny wpływ na poprawność wyników pomiarów.

Przedstawiona metoda wzorcowania umożliwiła otrzymanie graficznych i analitycznych zależności parametru magnetosprężystego w funkcji jednoosiowego stanu naprężenia. Na rys. 3a przedstawiono zależność  $\sigma_{re} = f(MP)$  dla próbki niewyżarzonej, natomiast na rys. 3b dla próbki wyżarzonej odprężająco. Zależności analityczne są

w bardzo dobrej zgodności z graficznymi, o czym świadczy współczynnik korelacji bliski jedności.



Parametr magnetosprężysty MP

Rys. 3. Zależność naprężenia σ<sub>re</sub>, mierzonego metodą dyfraktometryczną sin<sup>2</sup> φ, od parametru magnetosprężystego MP:
a) - dla próbki niewyżarzonej,
b) - dla próbki wyżarzonej

Przebieg obu krzywych jest identyczny, przy czym krzywa dla próbki niewyżarzonej jest przesunięta o wartość zmierzonych naprężeń własnych ściskających wynoszących  $\sigma_0 = -541$  MPa. W próbce wyżarzonej odprężająco zmierzone naprężenia własne były bliskie zeru i wynosiły  $\sigma_0 = -12$  MPa. Uzyskane krzywe wzorcowania przedstawiają fizyczną zależność SEB od naprężeń mechanicznych. Jest ona nieliniowa i w zakresie plastycznym osiąga nasycenie, w wyniku czego prędkość przyrostu parametru magnetosprężystego  $d(MP)/d\sigma_{re}$  znacznie maleje. Oznacza to, że powyżej zakresu sprężystego materiału próbki

wrażliwość szumu magnetycznego na naprężanie zmniejsza się.

Weryfikację poprawności uzyskanych wyników wzorcowania przeprowadzono porównując zgodność wyników pomiarów naprężeń metodą magnetyczną z metodami analityczną oraz metodą dyfraktometryczną  $\sin^2 \varphi$ . Badania porównawcze przeprowadzono na analogicznych próbkach i w identyczny sposób jak poprzednio. Ponadto analitycznie obliczono wartości naprężeń  $\sigma_{ob}$  w próbkach w zakresie stosowalności prawa Hooke'a z zależności:

$$\sigma_{\rm ob} = f_{\rm zm} E \frac{4h}{l^2}, \qquad (2)$$

gdzie:  $f_{zm}$  - zmierzona strzałka ugięcia; E - moduł Younga; h - grubość próbki; l - długość cięciwy łuku zgiętej próbki.

W próbce niewyżarzonej występują naprężenia własne. Aby uzyskać rzeczywiste naprężenia w trakcie jej zginania, dokonano liniowej superpozycji naprężeń własnych z obliczonymi, określając całkowite naprężenia powierzchniowe:

$$\sigma_{ob c} = \sigma_0 + \sigma_{ob} \qquad (3)$$

Rezultaty weryfikacji zgodności wyników badań uzyskanych obiema napreżeń metodami upoważniają do sformułowania wniosku, iż przy przeprowadzeniu prawidłowym wzorcowania parametru magnetosprężystego na naprężenia oraz przy prawidłowym pomiarze tego parametru metoda efektu Barkhausena, można uzyskać dobra zgodność wyników określania naprężeń zadanych oraz naprężeń własnych z wynikami pomiarów tych naprężeń klasyczną metodą dyfraktometryczną  $\sin^2 \varphi$ [4, 10, 17, 18].

Zastosowane liniowe sumowanie naprężeń jest prawdziwe przy założeniu, że odbywa się ono dla zakresu sprężystego w nieskończenie cienkiej warstwie powierzchniowej materiału próbki. Wyniki zależności naprężeń: obliczonego  $\sigma_{ob c}$ , pomierzonych metodami dyfraktometryczną  $\sigma_{re}$  i magnetyczną  $\sigma_m$  oraz parametru magnetosprężystego MP w funkcji strzałki ugięcia fzm próbek wyżarzonej i niewyżarzonej przedstawiono na rys. 4. Na podstawie uzyskanych funkcji  $MP = f(f_{zm})$  oraz funkcji wzorcowania  $\sigma_{re}$  (MP) (rys. 3) otrzymano zależność naprężenia w funkcji strzałki ugięcia  $\sigma_m = f(f_{zm})$ . Przedstawione wyniki określania naprężeń metodą magnetyczną w obu rodzajach próbek są zgodne w zakresie sprężystym z metodami analityczną oraz dyfraktometryczną  $\sin^2 \varphi$ .

Według literatury [1, 3], dokładność pomiaru naprężeń metodą dyfraktometryczną  $\sin^2 \varphi$  można osiągnąć do ± 20 MPa, a metodą magnetyczną od 10 MPa do 20 MPa. D. Senczyk w pracy [3] stwierdza istotną korelację wyników pomiarów obiema metodami, uzyskując współczynnik korelacji bliski jedności. Biorąc pod uwagę doniesienia literaturowe można stwierdzić, że uzyskano dobrą zgodność wartości naprężeń własnych wyznaczonych metodą efektu Barkhausena w porównaniu z pomierzonymi klasyczną metodą dyfraktometryczną  $\sin^2 \varphi$ .





#### 4. OKREŚLENIE ROZKŁADU NAPRĘŻEŃ W FUNKCJI GŁĘBOKOŚCI MATERIAŁU ZA POMOCĄ TRANSFORMATY FALKOWEJ SEB

Analiza widmowa sygnałów pomiarowych za pomoca transformaty falkowej odbywa się w przestrzeni czasu i skali, która reprezentuje wymiar funkcji falkowej w przestrzeni stanu [12, Funkcje falkowe są podstawą teorii 13]. transformaty falkowej i są odpowiednikami funkcji trygonometrycznych w analizie fourierowskiej. Funkcja falkowa jest przebiegiem ograniczonym, którego średnia wartość wynosi zero:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) dx = 0$$
 (4)

gdzie:  $\psi(x)$  – funkcja falkowa podstawowa.

Porównując funkcję falkową z funkcją sinusoidalną, która jest podstawą analizy Fouriera, można zauważyć, że sinusoida w przeciwieństwie do funkcji falkowej jest przebiegiem okresowym - od minus do plus nieskończoności, przy czym jest ona gładka, natomiast funkcja falkowa jest nieregularna asymetryczna. Z właściwości funkcji falkowej wynika, że zastosowanie jej do analizy dobrze częstotliwości opisuje miejscowe zmiany i amplitudy, co było niemożliwe do uzyskania za pomoca transformaty Fouriera.

Ciągła transformata falkowa (CWT) opiera się na wykorzystaniu funkcji falkowych z określonego dyskretnego przedziału skali, co umożliwia otrzymanie spektrogramu. Ciągła transformata falkowa jest opisana zależnością [12, 13]:

$$C(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi_a(t,b) dt$$
 (5)

gdzie: f(t) – analizowany sygnał,  $\Psi_a(t,b)$  – funkcja falkowa o wymiarze skali *a* i położeniu *b* względem sygnału f(t).

Algorytm przetwarzania ciagłą transformatą falkową polega na wyznaczaniu współczynników falkowych *C* czyli spektogramu. Po wykonaniu tych czynności otrzymuje się współczynniki dla różnych skal i dla kolejnych części sygnału. Współczynniki te są wynikiem analizy sygnału za pomocą falek. Można także wyznaczyć skalogram przedstawiający amplitudę współczynników *C* falek w funkcji czasu i skali [14, 15].

Ponieważ widmo funkcji falkowej o dowolnej skali jest dobrze zlokalizowane w dziedzinie częstotliwości, współczynniki falkowe *C* mogą odwzorowywać przebiegi czasowe o konkretnych częstotliwościach, które są składowymi badanego sygnału. W transformacie Fouriera otrzymuje się jedynie pojedynczą wartość oznaczającą amplitudę składowej harmonicznej o konkretnej częstotliwości, zaś ciągła transformata falkowa wyznacza przebieg czasowy tej amplitudy.

Znając częstotliwość próbkowania sygnału i częstotliwość środkową użytej funkcji falkowej można podczas analizy falkowej odpowiednim wartościom skali przypisać właściwe wartości i pasma częstotliwości. Znane są także właściwości materiału, którego wykonany jest element maszyny badany metoda efektu Barkhausena i na podstawie funkcji tłumienia (6) można wartościom skali a przyporządkować oszacowaną głębokość pomiaru g. Oznacza to, że współczynniki falkowe uzyskane z analizy falkowej SEB dla konkretnej wartości skali będą opisywały stan warstwy wierzchniej na określonej głębokości. Oczywiście jest to głębokość oszacowana, niemniej jednak możliwość przejścia ze skali na głębokość jest podstawą metody analizy falkowej SEB.

Zależność tłumienia D(g) od właściwości materiału oraz od zakresu częstotliwości pola elektromagnetycznego f opisuje wzór [16]:

$$D(g) = \frac{\int_{f_1}^{f_2} G(f) \cdot e^{(-A \cdot g \cdot f^{\frac{1}{2}})} df}{\int_{f_1}^{f_2} G(f) df}$$
(6)

gdzie:  $A = (\pi \mu \sigma_e)^{1/2}$ ,

 $\mu\,$ – bezwzględna przenikalność magnetyczna,

 $\sigma_e$  – przewodność elektryczna właściwa,

g – odległość od powierzchni w głąb materiału,  $f_1 \div f_2$  – zakres częstotliwości sygnału,

G(f) – funkcja statystycznego rozkładu amplitudy sygnału w funkcji częstotliwości (dla szumu białego G(f)=1).

Zjawisku tłumienia podlega także sygnał SEB oraz pole magnesujące generowane przez głowicę pomiarową. Oznacza to, że w metodzie efektu Barkhausena logarytmiczna funkcja tłumienia decyduje o głębokości pomiaru. Ponadto głębokość pomiaru również zależy od skutecznej głębokości magnesowania materiału.

Parametr falkowy wielkością jest bezwymiarową, co oznacza, że nie można zinterpretować go fizycznie. Odzwierciedla on poziom napreżeń własnych w warstwie wierzchniej ferromagnetyka. Na podstawie przebiegu funkcji skalujących można wyznaczyć wartość zmiany naprężeń własnych odpowiadającej zmianom wartości parametru falkowego dla określonej głębokości pomiaru. Funkcje skalujące są również wyznaczone dla konkretnego przypadku, tzn. rodzaju materiału z jakiego został wykonany element maszyny, rodzaju obróbki technologicznej, parametrów i warunków eksploatacji itd. Stąd parametr falkowy może być jedynie wykorzystany do opracowania porównawczej metody oceny stanu warstwy wierzchniej. Wymaga to przygotowania odpowiednich wzorców, które przekładałyby zmiany

wartości parametru falkowego na zmiany ilościowe naprężeń własnych i umożliwiałyby identyfikację stanu materiału po obróbce technologicznej lub procesie eksploatacji.







Rys. 5. Funkcje skalujące wyrażające relację pomiędzy zmianą parametru falkowego a zmianą naprężeń własnych w łopatkach sprężarki, dla kierunków pomiaru: a) - X,
b) - Y. Linie przerywane to aproksymowana funkcja skalująca [19]

Przeprowadzono eksperymet z łopatkami sprężarki osiowej wykonanych ze stali 18H2N4WA, z turbinowego silnika odrzutowego po procesie eksploatacji. W wyniku przeprowadzonych badań parametry falkowe i uzyskany metodą rentgenowską  $\sin^2 \varphi$  (stosując sekwencyjne trawienie warstwy wierzchniej) poziom naprężeń, pozwoliły sporządzić wykresy funkcji skalujących dla zależności zmian naprężeń w funkcji zmiany parametru falkowego (rys. 5). Na ich podstawie możliwe było oszacowanie zmian naprężeń w funkcji głębokości.





W celu weryfikacji uzyskanych relacii przygotowano osobną grupę lopatek eksploatowanych i przeprowadzono badania metoda analizy falkowej SEB. Następnie wykorzystując funkcje skalujące (rys.5) oraz znany rozkład naprężeń własnych w funkcji głębokości warstwy wierzchniej łopatek odtworzono stan naprężeń w funkcji głębokości (rys.6). W efekcie uzyskano nową nieniszczącą metodę oceny stanu naprężeń w warstwie wierzchniej w funkcji jej głębokości [19,20].

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że zastosowanie analizy falkowej sygnału efektu Barkhausena do oszacowania rozkładu naprężeń daje podobne rezultaty jak uznana metoda rentgenograficzna  $\sin^2 \varphi$ . Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że do uzyskania rozkładu naprężeń z wykorzystaniem pomiarów rentgenograficznych należało zastosować sekwencyjne trawienie elektrolityczne.

#### 5. WNIOSKI

Uzyskanie wiarygodnego rozkładu naprężeń głębokości warstwy wierzchniej w funkcji umożliwia odpowiednio wczesne zdiagnozowanie procesów degradacji, które występują podczas eksploatacji maszyn. Istnieje wiele metod, które umożliwiają punktowy pomiar naprężeń o wartości uśrednionej z pewnej głębokości pomiaru. Jednakże uzyskanie wiarygodnego rozkładu naprężeń w sposób nieniszczący jest trudne ze względu na ograniczenia penetracji materiału przez zastosowane w tych metodach nośniki informacji. Metoda magnetyczna wykorzystująca efekt Barkhausena umożliwia magnesowanie materiału do głębokości wystarczającej w badaniach naprężeń w warstwie wierzchniej. Opracowany model analizy falkowej svgnału efektu Barkhausena umożliwia oszacowanie rozkładu intensywności efektu Barkhausena w funkcji głebokości. Ponieważ istnieje wyraźna korelacia pomiędzy efektem Barkhausena. a poziomem naprężeń, to opracowane funkcje skalujące przedstawiają zależność parametru falkowego i naprężeń własnych w funkcji głębokości warstwy wierzchniej. Wykazano, iż opracowana metoda badań wykorzystująca sformułowany model falkowej analizy SEB, wprowadza do diagnostyki elementów maszyn nowe możliwości oceny stanu warstwy wierzchniej w sposób nieniszczący.

### LITERATURA

- [1] Lu J.: Handbook of measurement of residual stresses, Fairmont Press, Liburn, USA, 1996.
- Błachnio J., Janecki J., Dutkiewicz J.: Zbadanie relacji pomiędzy mikrostrukturą, a poziomem szumu magnetycznego w aspekcie zastosowania do diagnostyki łopatek sprężarki turbinowego silnika lotniczego.
  Ogólnopolska Konferencja Naukowa nt,: "Inżynieria Powierzchni 2000". Radom-Kazimierz Dolny, 2000,ss. 45-55.
- [3] Senczyk D.: Badania porównawcze wyników pomiarów naprężeń metodą magne- tosprężystą i rentgenograficzną. 20. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Szczyrk, 1991.
- [4] Augustyniak B., Chmielewski M., Kiełczyński W.: Badania porównawcze metodami nieniszczącymi naprężeń pozostających w złączach spawanych, Zeszyty Problemowe -Badania Nieniszczące, Nr 1 (1996), s. 253-256.
- [5] Barkhausen H.: Zwei mit Hilfe der neuen Verstärker entdeckte Erscheinungen, Physik, Zeitschrift, Vol.20 (1919).
- [6] Sablik M. J., Augustyniak B.: Magnetic methods of nondestructive evaluation. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronic Engineering, Vol. 12, New York: Wiley & Sons, 1999, pp. 12-30.

- [7] American Stress Technologies Inc., SCAN 500 System v1.22 user's manual.
- [8] American Stress Technologies Inc., μSCAN 500 Operating instructions v.1.5.3.
- [9] Błachnio J.: Ocena stanu warstwy wierzchniej łopatek wirnika sprężarki metodą szumu Barkhausena, ITWL, Warszawa, 1998 Prace Naukowe Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Z. 3.
- [10] Błachnio J., Janecki J.: Ocena wytężenia łopatek sprężarki lotniczego silnika turbinowego metodą szumu magnetycznego, Problemy Badań i Eksploatacji Techniki Lotniczej, T. 4, ITWL, Warszawa, 1998.
- [11] Dąbrowski W., Eybel R.: Application of Barkhausen noise inspection to determine residual stress in landing gear component, 4<sup>th</sup> International Barkhausen Noise and Magnetic Conference, Brescia, Italy, 2003, s. 63.
- [12] Debonath L.: Wavelet transforms and time frequency signal analysis, Birkhäuser Verlag, Boston, 2001.
- [13] Białasiewicz J. T.: *Falki i aproksymacje*, WNT, Warszawa, 2000.
- [14] Błachnio J., Kownacki C., Transformata falkowa w analizie szumu magnetycznego, 7th International Conference: Airplanes and helicopters diagnostics : AIRDIAG'2001, Warszawa, 2001, s. 89-98.
- [15] Kownacki C., Błachnio J., The attempt to estimate properties of a machine part surface layer using wavelet transform of the Barkhausen signal, 4<sup>th</sup> International Conference on Barkhausen Noise and Magnetic Testing ICBM 2003, Brescia, Włochy, 2003, s. 323-331.
- [16] Tiitto S., Sãynãjãkangas S.: Spectral damping in Barkhausen noise, IEEE Transactions on Magnetics Vol.11, No. 6 (1975), pp. 666-1672.

- [17] Jacob P., Marrone S., Suominen L., Honkamaki V.: Non-destructive evaluation of residual stress depth-profiles by Barkhausen noise analysis and their validation by XRD method combined with electrochemical (destructive) surface removal, 4<sup>th</sup> International Barkhausen Noise and Magnetic Conference, Brescia, Italy, 2003, pp. 361.
- [18] Błachnio J.: Ocena stanu warstwy wierzchniej za pomocą efektu Barkhausena, 28 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Zakopane, 1999, s. 191-198.
- [19] Kownacki C.: Analiza falkowa sygnału efektu Barkhausena w diagnostyce elementów maszyn,. Rozprawa doktorska, Politechnika Białostocka, 2005.
- [20] Kownacki C., Błachnio J.: Sposób wyznaczania rozkładu naprężeń własnych w funkcji głębokości warstwy wierzchniej materiałów ferromagnetycznych, Zgłoszenie patentowe, nr.1/2005.



# Dr hab. inż. Józef BŁACHNIO

Reprezentowane dziedziny, dyscypliny i specjalności w naukach technicznych:

- budowa i eksploatacja maszyn;
- inżynieria materiałowa;
- diagnostyka techniczna;
- samoloty, śmigłowce i silniki lotnicze.
# OBSERWATORY O NIEZNANYM WEJŚCIU W DIAGNOSTYCE UKŁADU DWÓCH ZBIORNIKÓW

# Marta PAWŁOWSKA, Marcin WITCZAK

Instytut Sterowania i Systemów Informatycznych, Uniwersytet Zielonogórski, ul. Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra, fax: 32 – 47 – 295, email: {M.Pawlowska, M.Witczak}@issi.uz.zgora.pl

#### Streszczenie

Przedmiotem pracy jest zaproponowanie systemu detekcji i lokalizacji uszkodzeń układu dwóch zbiorników z zastosowaniem rozszerzonych obserwatorów o nieznanym wejściu. W szczególności, pokazuje się jak rozwiązać problem lokalizacji uszkodzeń z zastosowaniem banku rozszerzonych obserwatorów o nieznanym wejściu, gdzie każdy obserwator wrażliwy jest na wszystkie uszkodzenia oprócz jednego. W końcowej części pracy przedstawia się rezultaty symulacji komputerowych potwierdzające skuteczność proponowanego rozwiązania.

Słowa kluczowe: obserwatory o nieznanym wejściu, układ dwóch zbiorników, diagnostyka uszkodzeń.

#### UNKNOWN INPUT OBSERVERS IN FAULT DIAGNOSIS OF A TWO-TANK SYSTEM

#### Summary

The main objective of the paper is to propose a fault detection and isolation system for a twotank system using extended unknown input observers. In particular, it is shown how to solve the fault isolation problem with a bank of extended unknown input observers where each of the observers is sensitive to all but one faults. The final part of the paper presents the computer simulation results that confirm the effectiveness of the proposed approach.

Keywords: Unknown input observers, two-tank system, fault diagnosis.

#### 1. WPROWADZENIE

Współczesne systemy sterowania są coraz bardziej wymagające. Przedsiębiorców i inwestorów nie stać na poniesienie znacznych strat, spowodowanych awariami, dlatego też niezwykle istotną sprawą jest budowa systemu sterowania, tolerującego uszkodzenia (ang. fault-tolerant control) [3]. Jest to jeden z najistotniejszych problemów współczesnej automatyki. Poszukuje się coraz bardziej efektywnych metod rozpoznawania nieprawidłowości procesu, zmniejszających skutki uszkodzeń urządzeń, a co za tym idzie, minimalizujących spadek efektywności procesu przemysłowego. Powstało wiele rozwiązań tego problemu, zarówno teoretycznych, jak i praktycznych [7, 19], jednakże głównie dla systemów liniowych. Istnieją również rozwiązania, związane z niedokładnością opisu matematycznego systemu, które pozwalają uodpornić na nie układ sterowania i diagnostyki [9, 11, 17], jednak ich dominująca większość ogranicza swe zastosowanie do systemów liniowych.

Niestety, większość współczesnych systemów przemysłowych posiada nieliniowy i bardzo złożony charakter, co stanowi duży problem, którego całkowite rozwiązanie, mimo zastosowania modeli nieliniowych, nie zawsze jest możliwe. W praktyce, zazwyczaj istnieje pewna rozbieżność pomiędzy zachowaniem rzeczywistego systemu a zachowaniem modelu. Tego typu niedokładności opisu matematycznego nazywa się niepewnością modelu (ang. model uncertainty) [17, 23]. Ma ona zasadniczy wpływ na jakość procesu detekcji, a w konsekwencji lokalizacji uszkodzeń. Niepewność modelu może znacząco zmniejszyć czułość systemu diagnostycznego na uszkodzenia, jak również może prowadzić do występowania fałszywych alarmów. W obu przypadkach, może to doprowadzić do znacznych strat ekonomicznych związanych z diagnozowanym systemem, np. niepotrzebnych przerw w procesie produkcyjnym lub wystąpieniem poważnych uszkodzeń w wyniku niewykrycia poprzedzających je uszkodzeń o znacząco mniejszej skali.

W literaturze [17, 23] prezentuje się kilka rozwiązań, które mogą zwiększyć odporność układu diagnostycznego na niepewność modelu. Jednym z najczęściej stosowanych rozwiązań jest zastosowanie odpornych obserwatorów stanu [1, 29, 31, 33], np. obserwatorów o nieznanym wejściu (ang. extended unknown input observer) [17, 23, 29].

W pracy rozważa się zastosowanie obserwatorów o nieznanym wejściu do detekcji i lokalizacji uszkodzeń układu dwóch zbiorników. W wielu pracach próbowano rozwiązać problem projektowania systemu diagnostycznego dla układu dwóch i trzech zbiorników przy zastosowaniu różnych metod, opartych nie tylko o obserwatory stanu, ale także m.in. techniki neuronowe. Przykładowo, w pracy [33] przedstawiono sposób detekcji i lokalizacji uszkodzeń jedynie dla urządzeń wykonawczych z zastosowaniem stosunkowo skomplikowanych, pod względem implementacyjnym, nieliniowych obserwatorów stanu. W pracach [20] oraz [21] zaprezentowano sposób projektowania systemów detekcji i lokalizacji uszkodzeń przy założeniu, że pełen zestaw danvch wejściowo-wyjściowych odpowiadający wszystkim możliwym scenariuszom uszkodzeń jest dostępny na etapie projektowania. Jednakże w praktyce bardzo trudne (lub wręcz niemożliwe) jest uzyskanie takich danych, ponieważ koszt ich pozyskania jest olbrzymi, co powoduje, że takie rozwiązanie problemu właściwie nie ma praktycznego zastosowania. Z kolei praca [14] przedstawia jedynie sposób detekcji uszkodzeń. Niestety, żadna z wymienionych prac nie rozwiązuje problemu całkowicie budowy układu diagnostycznego dla układu dwóch zbiorników.

Biorąc pod uwagę powyższe uwarunkowania, celem pracy jest zaproponowanie kompletnego układu detekcji i lokalizacji uszkodzeń układu dwóch zbiorników, którego proces syntezy jest zadaniem stosunkowo łatwym pod względem implementacyjnym. Główną przyczyną wyżej wymienionego założenia jest fakt, że rozwiązania diagnostyczne wykorzystujące nieliniowe obserwatory stanu są zazwyczaj bardzo złożone pod implementacyjnym, ogranicza względem co znacząco ich praktyczne zastosowania w układach przemysłowych.

Praca został zorganizowany w następujący sposób: w punkcie 2 przedstawia się układ dwóch zbiorników. Punkt 3 prezentuje sposób budowy rozszerzonego projektowania obserwatora nieznanym wejściu oraz jego algorytm 0 obliczeniowy [17, 29]. W kolejnym punkcie proponuje się bank obserwatorów diagnostycznych dla układu dwóch zbiorników. Punkt 5 opisuje generator residuum dla banku obserwatorów. W tym punkcie, analizuje się również teoretyczne właściwości sygnałów residualnych otrzymanych za pomoca powyższych obserwatorów. W punkcie 6 prezentuje się wyniki symulacji komputerowych efektywność proponowanego potwierdzające rozwiązania. Ostatni punkt poświęca się podsumowaniu i wnioskom oraz dalszym kierunkom badań.

# 2. SYSTEM DWÓCH ZBIORNIKÓW

Układ dwóch zbiorników składa się z dwóch identycznych, cylindrycznych zbiorników, połączonych przewodem (rys. 1). Pompa wtłacza wodę do zbiornika w sposób ciągły i ze zmienną bądź stałą prędkością. Przewód między zbiornikami oraz odpływ ze zbiornika drugiego są zawsze otwarte.

Układ dwóch zbiorników jest systemem SIMO (ang. *Single-Input Multi-Output*). Posiada on jedno wejście, tzn. przepływ wody przez pompę oraz dwa wyjścia:

- poziom wody w zbiorniku pierwszym,

- poziom wody w zbiorniku drugim



Rys. 1. Schemat układu dwóch zbiorników

Systemem nominalnym nazywany jest system w stanie, w którym nie występują żadne uszkodzenia.

#### 3. OBSERWATORY O NIEZNANYM WEJŚCIU

Pierwsze prace, dotyczące obserwatorów o nieznanym wejściu, pojawiły się już w latach 70-tych ubiegłego wieku [28]. Od tamtej pory nastapił znaczny postęp w tej dziedzinie nauki i dziś obserwatory sa coraz cześciej stosowane w układach diagnostycznych [1, 6, 17, 29]. Pomimo stosunkowo szerokiego spektrum rozwiązań, brak jest jednego uniwersalnego rozwiązania. Oznacza to, że projektowanie obserwatorów diagnostycznych stanowi wciąż ważny problem praktyczny i teoretyczny.

Na szczególną uwagę zasługują tutaj obserwatory o nieznanym wejściu [9, 26]. W literaturze można znaleźć liczne zastosowania narzędzia diagnostycznego tego typu [13, 15, 18, 33].

Rozważmy system o nieznanym wejściu opisany następującymi równaniami:

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}_k, \boldsymbol{u}_k) + \boldsymbol{E}_k \boldsymbol{d}_k \qquad (1)$$

$$y_{k+1} = C_{k+1} x_{k+1}$$
 (2)

gdzie:  $\mathbf{x}_k \in \mathfrak{R}^n$  oznacza wektor stanu,  $\mathbf{y}_k \in \mathfrak{R}^m$  jest wektorem wyjścia systemu,  $\mathbf{u}_k \in \mathfrak{R}^r$  jest wejściem systemu,  $\mathbf{g}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \in \mathfrak{R}^n$  jest różniczkowalną funkcją nieliniowa,  $\mathbf{E}_k$  oznacza macierz rozkładu nieznanego wejścia, natomiast  $\mathbf{d}_k \in \mathfrak{R}^q$ ,  $q \le m$ , nieznane wejście. Znane są dwa sposoby wyznaczania obserwatorów o nieznanym wejściu: pierwszy z nich polega na rekonfiguracji równania układu w taki sposób, aby wyeliminować nieznane wejście; drugi polega na dodaniu odpowiedniej macierzy, niwelującej działanie nieznanego wejścia [23].

W niniejszej pracy rozważa się zastosowanie zastosowanie drugiego z rozwiązań. W szczególności, jeśli dla macierzy  $C_{k+I}E_k$ spełniony jest warunek [9] [Lemat 3.1]:

$$rzad(C_{k+1}E_k) = rzad(E_k) = q \quad (3)$$

Wtedy istnieje macierz  $H_{k+1}$  taka, że:

$$\boldsymbol{H}_{k+I} = (\boldsymbol{C}_{k+1}\boldsymbol{E}_{k})^{+} =$$

$$= \left[ (\boldsymbol{C}_{k+1}\boldsymbol{E}_{k})^{T} \boldsymbol{C}_{k+1}\boldsymbol{E}_{k} \right]^{-1} (\boldsymbol{C}_{k+1}\boldsymbol{E}_{k})^{T}$$
(4)

gdzie:  $(C_{k+I}E_k)^+$  oznacza macierz pseudoodwrotną. Mnożąc lewostronnie (2) przez  $H_{k+I}$ , a następnie podstawiając (1) otrzymuje się:

$$\boldsymbol{H}_{k+1}\boldsymbol{y}_{k+1} = \boldsymbol{H}_{k+1}\boldsymbol{C}_{k+1} \big(\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}_{k},\boldsymbol{u}_{k}) + \boldsymbol{E}_{k}\boldsymbol{d}_{k}\big)$$
(5)

Korzystając z (4) oraz (5) można pokazać, że:

$$\boldsymbol{d}_{k} = \boldsymbol{H}_{k+1} \big( \boldsymbol{y}_{k+1} - \boldsymbol{C}_{k+1} \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}_{k}, \boldsymbol{u}_{k}) \big)$$
(6)

Podstawiając (6) do (1) otrzymuje się:

$$x_{k+1} = g(x_k, u_k) + E_k H_{k+1} y_{k+1} + (7)$$
  
-  $E_k H_{k+1} C_{k+1} g(x_k, u_k)$ 

W efekcie, równanie stanu (1) można zapisać następująco:

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = \overline{\boldsymbol{g}}(\boldsymbol{x}_k, \boldsymbol{u}_k) + \overline{\boldsymbol{E}}_k \boldsymbol{y}_{k+1} \qquad (8)$$

gdzie:

$$\overline{G}_{k} = I - E_{k} H_{k+1} C_{k+1} \qquad (9)$$

$$\overline{\boldsymbol{E}}_{k} = \boldsymbol{E}_{k} \boldsymbol{H}_{k+1} \tag{10}$$

$$\overline{\boldsymbol{g}}(\boldsymbol{x}_k, \boldsymbol{u}_k) = \overline{\boldsymbol{G}}_k \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}_k, \boldsymbol{u}_k) \quad (11)$$

Podsumowując, obserwator stanu dla systemów opisanych równaniami (1) i (8) można zapisać następująco:

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{k+1/k} = \overline{\boldsymbol{g}}(\hat{\boldsymbol{x}}_k, \boldsymbol{u}_k) + \overline{\boldsymbol{E}}_k \boldsymbol{y}_{k+1} \quad (12)$$

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_{k+1/k} + K_{k+1}(y_{k+1} - C_{k+1}\hat{x}_{k+1/k})$$
(13)

gdzie:  $K_{k+1}$  oznacza macierz wzmocnień obserwatora. Zadanie projektowania obserwatora sprowadza się do takiego doboru macierzy  $K_{k+1}$ , aby obserwator był zbieżny, tzn.  $\lim_{k\to\infty} (x_k - \hat{x}_k) = 0$ 

Jednym ze sposobów rozwiązania takiego problemu jest zastosowanie nieliniowego obserwatora o nieznanym wejściu [1, 22, 23]. Mimo niekwestionowanej użyteczności takiego podejścia, jego zastosowanie wydaje się być bardzo ograniczone. Dzieje się tak dlatego, że procedura konstruowania takiego obserwatora jest bardzo złożona. nawet dla prostych systemów laboratoryjnych [33]. Alternatywnym rozwiązaniem wydaje się zastosowanie rozwiązań bazujących na linearyzacji modelu wokół aktualnej estymaty stanu, tak jak ma to miejsce w przypadku rozszerzonego filtru Kalmana (EKF) (ang. Extended Kalman Filter) [2]. Z drugiej strony, oczywistym jest, że takie rozwiązanie pracuje dobrze tylko w przypadku niewielkiej rozbieżności pomiędzy modelem linearyzowanym wokół aktualnej estymaty stanu, a nieliniowym zachowaniem systemu. Problemem jest więc poprawienie zbieżności tego typu rozwiązań. Zastosowanie EKF jako deterministycznego obserwatora stało się bardzo popularne na przestrzeni ostatnich dwóch dekad (zob. [4]). Stało się tak głównie dlatego, że EKF może być łatwo zastosowany dla szerokiej klasy nieliniowych. systemów W pracy [30], zaproponowano tzw. rozszerzony obserwator o nieznanym wejściu (EUIO) (ang. Extended Input Observer), którego sposób Unknown projektowania jest bardzo podobny do rozszerzonego filtru Kalmana. Autorzy powyższej pracy wykazali również, że powyższy obserwator jest zbieżny przy zachowaniu pewnych, stosunkowo łatwych do spełnienia warunków.

W niniejszej pracy proponuje się podobne rozwiązanie, przy czy sposób jego wyprowadzenia różni się znacząco od tego przedstawionego w pracy [30]. W szczególności, jako algorytm obliczeniowy dla (12})-(13), przyjmuje się strategię podobną jak w przypadku rozszerzonego filtru Kalmana, co zapisuje się następująco:

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{k+1/k} = \overline{\boldsymbol{g}}(\hat{\boldsymbol{x}}_k, \boldsymbol{u}_k) + \overline{\boldsymbol{E}}_k \boldsymbol{y}_{k+1} \quad (14)$$
$$\boldsymbol{P}_{k+1/k} = \overline{\boldsymbol{A}}_k \boldsymbol{P}_k \overline{\boldsymbol{A}}_k^T + \boldsymbol{Q}_k \quad (15)$$

$$K_{k+I} = P_{k+1/k} C_{k+1} (C_{k+1} P_{k+1/k} C_{k+1} + R_{k+1}) \quad (16)$$
$$\hat{x}_{k+I} = \hat{x}_{k+I/k} + K_{k+I} (y_{k+1} - C_{k+1} \hat{x}_{k+I/k}) \quad (17)$$
$$P_{k+I} = [I - K_{k+1} C_{k+1}] P_{k+1/k} \quad (18)$$

gdzie:

$$\overline{A}_{k} = \frac{\partial \overline{g}(x_{k}, u_{k})}{\partial x_{k}} \bigg|_{x_{k} = \hat{x}_{k}}$$
(19)

oraz  $\mathbf{R}_k > 0$  i  $\mathbf{Q}_k > 0$  oznaczają macierze instrumentalne, których wartości ustalone są przez użytkownika. Mając dany algorytm obliczeniowy EUIO, możliwe jest rozważanie opisu matematycznego systemu uwzględniając sygnały uszkodzeń:

$$x_{k+1} = g(x_k, u_k) + E_k d_k + L_{1,k} f_k, \quad (20)$$
$$y_{k+1} = C_{k+1} x_{k+1} + L_{2,k+1} f_{k+1}, \quad (21)$$

gdzie:  $f_k$  oznacza wektor uszkodzeń, a  $L_{l,k}$  i  $L_{2,k+l}$  są ich macierzami rozkładu.

#### 4. PROJEKTOWANIE OBSERWATORÓW DIAGNOSTYCZNYCH DLA UKŁADU DWÓCH ZBIORNIKÓW

Rozważmy układ dwóch zbiorników opisany następującymi równaniami [20]:

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}_k, \boldsymbol{u}_k) + \boldsymbol{L}_{dl,k} \boldsymbol{f}_k, \qquad (22)$$

$$y_{k+1} = C_{k+1} x_{k+1} + L_{d2,k+1} f_{k+1},$$
 (23)

gdzie:

$$g(x_{k}, u_{k}) = \begin{vmatrix} -h\frac{K_{I}}{A_{I}}\sqrt{x_{I,k} - x_{2,k}} + h\frac{I}{A_{I}}u_{k} + x_{I,k} \\ h\frac{K_{I}}{A_{2}}\sqrt{x_{I,k} - x_{2,k}} - h\frac{K_{2}}{A_{2}}\sqrt{x_{2,k}} + x_{2,k} \end{vmatrix}$$
(24)  
$$L_{dI,k} = \begin{bmatrix} -\frac{h}{A_{1}} & -h\frac{\sqrt{x_{1,k}}}{A_{1}} & h\frac{\sqrt{x_{1,k} - x_{2,k}}}{A_{1}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -h\frac{\sqrt{x_{1,k} - x_{2,k}}}{A_{2}} & 0 & 0 \end{vmatrix}$$
(25)

$$\boldsymbol{L}_{d2,k} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(26)

gdzie:

 $f_{1,k}$  - wyciek z przewodu pompy;  $f_{2,k}$  - wyciek ze zbiornika~1;  $f_{3,k}$  - zatkany wylot zbiornika 1;  $f_{4,k}$  uszkodzony czujnik poziomu cieczy zbiornika 1;  $f_{5,k}$  - uszkodzony czujnik poziomu cieczy zbiornika 2. Pozostałe parametry to:

 $A_1$  - przekrój pierwszego zbiornika;  $A_2$  - przekrój drugiego zbiornika;  $K_1$  - przekrój zwężki między zbiornikami;  $K_2$  - przekrój zwężki wypływu ze zbiornika 2; h - czas próbkowania. Dodatkowo przyjmuje się, że  $L_d^{i,j}$ oznacza macierz składająca się *i*-tej i *j*-tej kolumny macierzy  $L_{d1k}$ ;

Jak już wcześniej wspomniano, główny problem pracy sprowadza się do zaprojektowania banku EUIO, gdzie każdy EUIO wrażliwy jest na wszystkie uszkodzenia oprócz jednego. Zadanie to realizuje się poprzez odpowiedni dobór sygnałów wyjściowych systemu wykorzystanych do syntezy EUIO oraz korzystając z faktu, że EUIO umożliwia wyeliminowanie wpływu nieznanego wejścia na sygnał residuum, będący różnicą wybranych sygnałów wyjściowych systemu i ich estymat otrzymanych za pomocą obserwatora [16]. Przyjmując, że nieznanym wejściem będą kolejne sygnały uszkodzeń  $f_1,..., f_s$  otrzymuje się następujący bank obserwatorów:

**Observator** *obs*<sub>1:</sub>

Przyjmując, że:

$$E_{k} = L_{d,k}^{1}, \quad d_{k} = f_{1,k}, \quad L_{d1,k} = L_{d,k}^{2,3}$$

uzyskuje się obserwator (12)-(13) którego sygnał residuum będzie niewrażliwy na  $f_{I,k}$ . W rezultacie, parametry niezbędne do syntezy obserwatora dane są następująco:

$$C_{k+1} = \begin{bmatrix} 1, 0 \end{bmatrix} \qquad \overline{E} = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$
$$\overline{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

W tym miejscu należy podkreślić, że ze względu na podobieństwo rozkładu uszkodzeń  $f_1$  i  $f_2$ ,  $obs_1$ będzie niewrażliwy również na uszkodzenie  $f_2$ . W konsekwencji efekty wystąpienia tych uszkodzeń będą nierozróżnialne.

**Observator** *obs*<sub>2:</sub>

Przyjmując, że

$$E_k = L_{d,k}^3, d_k = f_{3,k}, L_{d1,k} = L_{d,k}^{1,2}$$

uzyskuje się obserwator (12)-(13) którego sygnał residuum będzie niewrażliwy na  $f_{3,k}$ . W rezultacie, parametry niezbędne do syntezy obserwatora dane są następująco:

$$C_{k+1} = \begin{bmatrix} 1, 0 \end{bmatrix} \qquad \overline{E}_{k} = \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{A_{1}}{A_{2}} \end{bmatrix}$$
$$\overline{G}_{k} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{A_{1}}{A_{2}} & 1 \end{bmatrix}$$

**Obserwator** *obs*<sub>3:</sub>

Parametry niezbędne do syntezy obserwatora niewrażliwego na  $f_{4k}$  dane są następująco:

$$C_{k+1} = \begin{bmatrix} 0,1 \end{bmatrix} \qquad \overline{E} = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$
$$\overline{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

**Obserwator** *obs*<sub>4:</sub>

Parametry niezbędne do syntezy obserwatora niewrażliwego na  $f_{5k}$  dane są następująco:

$$C_{k+1} = \begin{bmatrix} 1,0 \end{bmatrix} \qquad \overline{E} = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$
$$\overline{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

# 5. GENERATOR RESIDUUM

Dla obserwatorów *obs*<sub>1</sub>, *obs*<sub>2</sub> i *obs*<sub>3</sub>, podanych w punkcie poprzednim, proponuje się przyjęcie następującej postaci sygnału residuum:

$$z_{k+1} = y_{2,k+1} - \hat{y}_{2,k+1} \tag{27}$$

natomiast dla obserwatora *obs*<sub>4</sub> residuum w postaci:

$$z_{k+1} = y_{1,k+1} - \hat{y}_{1,k+1} \tag{28}$$

Ostateczna postać residuum dla poszczególnych obserwatorów jest następująca:

• Obserwator  $obs_1$  niewrażliwy na uszkodzenia  $f_1$ i  $f_2$ 

(29)  

$$z_{k+1} = g_{d,2}(x_k, u_k) - g_{d,2}(\hat{x}_k, u_k) + -h \frac{\sqrt{x_{1,k} - x_{2,k}}}{A_2} f_{3,k} + f_{5,k+1} + (29) - K_{2,k+1}(x_{1,k} - \hat{x}_{1,k}) - K_{2,k+1}f_{4,k}$$

• Observator  $obs_2$  niewrażliwy na uszkodzenie  $f_3$ 

$$z_{k+1} = \frac{A_{I}}{A_{2}} (g_{d,I}(x_{k}, u_{k}) - g_{d,I}(\hat{x}_{k}, u_{k})) + \frac{h}{A_{2}} f_{I,k} + g_{d,2}(x_{k}, u_{k}) - g_{d,2}(\hat{x}_{k}, u_{k}) + A_{I}h \frac{\sqrt{x_{I,k}}}{A_{2}^{2}} f_{2,k} + K_{2,k+I} (x_{I,k} - \hat{x}_{I,k}) - K_{2,k+I} f_{4,k} + \frac{A_{I}}{A_{2}} f_{4,k+I} + f_{5,k+I}$$
(30)

• Obserwator  $obs_3$  niewrażliwy na uszkodzenie  $f_4$ 

$$z_{k+1} = g_{d,2}(x_k, u_k) - g_{d,2}(\hat{x}_k, u_k) + - \frac{h\sqrt{x_{1,k} - x_{2,k}}}{A_1} f_{3,k} - K_{2,k+1}(x_{2,k} - \hat{x}_{2,k}) +$$
(31)  
$$- K_{2,k+1}f_{5,k} + f_{5,k+1}$$

• Observator  $obs_4$  niewrażliwy na uszkodzenie  $f_5$ 

$$z_{k+1} = g_{d,2}(x_k, u_k) - g_{d,2}(\hat{x}_k, u_k) - \frac{h}{A_1} f_{1,k} + \frac{h\sqrt{x_{1,k}}}{A_1} f_{2,k} + \frac{h\sqrt{x_{1,k} - x_{2,k}}}{A_1} f_{3,k} + K_{1,k+1}(x_{1,k} - \hat{x}_{1,k}) - K_{1,k+1}f_{4,k} + f_{4,k+1}$$
(32)

Analizując wpływ poszczególnych uszkodzeń na sygnały residuum można wyznaczyć macierz diagnostyczną [16], którą przedstawia się w Tab. 1.

Tabela 1. Macierz diagnostyczna

					<u> </u>	
	$f_l$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	
$obs_1$	0	0	1	1	1	
$obs_2$	1	1	0	1	1	
obs3	0	0	1	0	1	
$obs_4$	1	1	1	1	0	

Liczba "1" oznacza, że obserwator reaguje na dane uszkodzenie, natomiast "0" oznacza, że jest na nie niewrażliwy. Z tabeli wynika, iż istnieje możliwość detekcji i lokalizacji każdego z rozpatrywanych uszkodzeń na podstawie stanu banku obserwatorów, gdyż stan ten jest unikalny dla każdego uszkodzenia (traktując  $f_1$  i  $f_2$  jako nierozróżnialne).

#### 6. REZULTATY EKSPERYMENTÓW

Korzystając ze środowiska obliczeń inżynierskich MATLAB zaimplementowano symulator układu dwóch zbiorników umożliwiający generowanie danych w stanie nominalnym układu, jak również w przypadku występowania wszystkich uszkodzeń. Następnie, zaimplementowano zaproponowany bank obserwatorów, otrzymując w efekcie generator residuum.

Do symulacji wykorzystano następujące parametry układu:  $u_k=2.56$  - stałe wejście systemu; h=0.100 - czas próbkowania;  $A_1=4.2929$  - przekrój zbiornika 1;  $A_2=4.2929$  - przekrój zbiornika 2;  $K_1=0.3646$  - przekrój zwężki między zbiornikami;  $K_2=0.2524$  - przekrój zwężki wypływu ze zbiornika 2;

Residua otrzymane za pomocą poszczególnych obserwatorów dla normalnego stanu pracy przedstawia rys. 1. Jak można zauważyć, residuum nie przekracza empirycznie dobranego poziomu granicznego. Residuum dla uszkodzeń  $f_1, \ldots, f_5$  przedstawiają rysunki 3 – 7.







Rys. 3. Uszkodzenie  $f_l$ 



Rys. 7. Uszkodzenie f<sub>5</sub>

Podobnie jak w poprzednim punkcie, możliwe jest wyznaczenie macierzy diagnostycznej na podstawie sygnałów residuum (por. rys. 3 - 7). Niniejszą macierz diagnostyczną przedstawia się w Tab. 2. Pogrubione wartości w macierzy diagnostycznej oznaczają reakcje obserwatorów, niezgodne z wynikami otrzymanymi na podstawie analizy teoretycznej przedstawionej w Tab.1.

Tabela 2. Macierz diagnostyczna f3 f4 fs 0 0 1 obs 1 1 obs, 1 1 0 1 1 obs3 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 obs₄

Przyczyną takiej niezgodności jest fakt, że przy projektowaniu obserwatorów korzysta się ze sprzężenia zwrotnego od wyjścia systemu, co, jak można zauważyć w Tab. 2, powoduje tłumienie efektu niektórych uszkodzeń na sygnał residuum. Mimo tak niekorzystnych uwarunkowań, nadal możliwa jest detekcja i lokalizacja wszystkich uszkodzeń.

# 7. PODSUMOWANIE

pracy W ramach zaproponowano i zaprojektowano bank obserwatorów o nieznanym weiściu dla układu dwóch zbiorników. W szczególności, przeprowadzono symulację uszkodzeń i porównano reakcję obserwatorów z oczekiwanymi rezultatami. Jak wykazano w sposób analityczny i empiryczny, rozróżnienie efektu uszkodzeń  $f_1$  i  $f_2$  nie jest możliwe. Oznacza to, że ich precyzyjna lokalizacja nie jest możliwa. Możliwa jest tylko lokalizacja grupy uszkodzeń  $f_1$  i  $f_2$ . W przypadku pozostałych uszkodzeń ich wykrycie i zlokalizowanie jest możliwe, co stanowi podstawę do kontynuowania badań z wykorzystaniem danych z rzeczywistego systemu. Celem dalszej pracy jest budowa układu układu diagnostycznego dwóch zbiorników z zastosowaniem zaprezentowanych obserwatorów nieznanym wejściu, który będzie pracował 0 czasie rzeczywistym (ang. online). Układ W wykorzystywać będzie do obliczeń program Matlab firmy MathWorks, do wizualizacji wykorzystane zostanie środowisko SCADA InTouch firmy Wonderware natomiast do komunikacji z obiektem sterownik PLC - Ge Fanuc VersaMax. Komunikacja między aplikacjami odbywać się będzie przy pomocy protokołu DDE lub nowszego OPC.

# LITERATURA

 E. Alcorta Garcia and M. P. Frank: *Deterministic* nonlinear observer-based approaches to fault diagnosis. Control Engineering Practice, 1997, Vol. 5, No. 5, pages 663–670.

- [2] O. D. B. Anderson and B.J. Moore: *Optimal Filtering*.; Prentice-Hall, New Jersey, 1979.
- [3] M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, and M. Staroswiecki: *Diagnosis and Fault-Tolerant Control.*; Springer-Verlag, New York, 2003.
- [4] M. Boutayeb and D. Aubry: A strong tracking extended Kalman observer for nonlinear discrete-time systems. IEEE Transaction Automatic Control, 1999, Vol. 44, No. 8, pages 1550–1556.
- [5] K. Busawon, M. Saif, and M. Farza: A discretetime observer for a class of non-linear systems, Proc. 36th IEEE Conference on Decision and Control, CDC, 1997, pages 4796– 4801.
- [6] C. Califano, S. Monaco and D. Normand-Cyrot: On the observer design in discrete-time. System and Control Letters, 2003, Vol. 49, pages 255– 265.
- [7] C. Cempel and F. Tomaszewski: Diagnostyka maszyn. Zasady ogólne. Przykłady zastosowań. Wydawnictwo MCNEMT, Radom, 1992.
- [8] G. H. Chen and W. K. Han: Improved quantitative measures of robustness for multivariable systems.; IEEE Trans. Automatic Control, 1994, Vol. 39, No. 4, pages 807–810.
- [9] J. Chen and J. R. Patton: Robust Model-based Fault Diagnosis for Dynamic Systems; Kluwer Academic Publishers, London, 1999.
- [10] J. Chen, J. R. Patton, and H. Zhang: Design of unknown input observers and fault detection filters; Int. J. Control, 1996, Vol. 63, No. 1, pages 85–105.
- [11] F. Delebecque, R. Nikoukah, and H. Rubio Scola: *Test signal design for failure detection: A linear programming approach*. Int. J. Appl. Math. Comput. Sci., 2003, Vol. 13, No. 4, pages 515–526
- [12] M. Hou and P. C. Muller: Design of observers for linear systems with unknown inputs. IEEE Trans. Automatic Control, 1992. Vol. 37, No. 6, pages 871–875.
- [13] M. Hou and R. J. Patton: Observer-based strategies for fault diagnosis in a three-tank system.; IFAC Symposium SAFEPROCESS 2000, 14-16 June, Budapest, 2000, pages 721– 726.
- [14] M. Hou, Y. S. Xiong, and R. J. Patton: Observing a three-tank system, IEEE Transactions on Control Systems Technology; 2005. Volume 13, Issue 3, pages 478–484.
- [15] S. Hui and S. H. Zak: Observer design for systems with unknown input. Int. J. Appl. Math. Comput. Sci., 2005, pages 431–446.
- [16] D. Koenig and S. Mammar: Design of a class of reduced unknown inputs non-linear observer for fault diagnosis. Proc. American Control Conference, Arlington, USA, 2002.
- [17] J. Korbicz, M. J. Kościelny, Z. Kowalczuk, and W. Cholewa: *Fault Diagnosis. Models, Artificia Intelligence, Applications;* Springer-Verlag, Berlin, 2004.

- [18] R. Miklosovic and Z. Gao: A dynamic decoupling method for controlling high performance turbofan engines. Proc. of the 16th IFAC World Congress, 2005.
- [19] A. Obuchowicz and J. Korbicz: Algorytmy ewolucyjne w systemach diagnostyki.; Diagnostyka Procesów Przemysłowych DPP, Łagów Lubuski, 2001.
- [20] K. Patan and A. Obuchowicz. System diagnostyczny dla zespołu dwóch zbiorników z opóźnieniem oparty na technikach neuronowych; Diagnostyka Procesów Przemysłowych DPP'99, 13–16 wrzesień, Kazimierz Dolny, 1999, strony 133–138.
- [21] M. Patan and K. Patan: Kalibracja modeli diagnostycznych dla układu dwóch zbiorników przy użyciu optymalnego planowania eksperymentu; Diagnostyka Procesów Przemysłowych DPP'03, 15–17 wrzesień, Władysławowo, 2003.
- [22] J. R. Patton, M. P. Frank and N. R. Clark: *Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Springer-Verlag, Berlin, 2000.
- [23] J. R. Patton, J. C. Lopez-Toribio, and J. F. Uppal: Artificial intelligence approaches to fault diagnosis for dynamic systems.; J. Applied Mathematics and Computer Science, 1999, Vol. 9, No. 3, pages 471–518. Int.
- [24] R. Rajamani: Observers for Lipschitz nonlinear systems., IEEE Trans. Automatic Control, 1998, Vol. 43, No. 3, pages 397–401.
- [25] G. Schreier, J. Ragot, J. R. Patton, and M. P. Frank: Observer design for a class of non-linear systems. Proc. IFAC Symp.: Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes: SAFEPROCESS'97, Hull, UK, 1997, Vol. 1, pages 483–488.
- [26] R. Seliger and P. Frank: *Robust observer-based fault diagnosis in non-linear uncertain systems*. In Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems (Patton, Frank and Clark, (Eds.). Springer-Verlag, Berlin, 2000.
- [27] Y. Song and W. J. Gizzle: The extended Kalman filter as a local asymptotic observer for nonlinear discrete-time systems.; Journal of Math., Estimation, Contr., 1995, Vol. 5, pages 59–78.
- [28] S. H. Wang, E. J. Davison, and P. Dorato: Observing the states of systems with unmeasurable disturbances.; IEEE Trans. Automatic Control, 1975, Vol. 20, No. 5, pages 716–717.
- [29] M. Witczak: Identification and fault detection of non-linear dynamic systems; In: Lecture notes in control and computer science, University of Zielona Góra Press, Zielona Góra, 2003, Vol. 1.
- [30] M. Witczak, A. Obuchowicz, and J. Korbicz: Genetic programming based approaches to identification and fault diagnosis of non-linear dynamic systems. Int. J. Control, 2002, Vol. 75, No. 13, pages 1012–1031.

- [31] M. Witczak and P. Prętki: Designing neuralnetwork-based fault detection systems with Doptimum experimental conditions. Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, 2005, Vol. 12, No. 2.
- [32] M. Witczka: LMI-based strategies for designing observer and unknown input observer for nonlinear discrete-time. 2006.
- [33] A. Zolghadri, D. Henry, and M. Monision: Design of nonlinear observers for fault diagnosis - A case study.; Control Engineering Practice, 1996, Vol. 4, No. 11, pages 1535–1544.



Marta PAWŁOWSKA, urodziła się 23 czerwca 1981 roku. Tytuł magistra inżyniera w zakresie informatyki uzyskała w 2005 roku na Uniwersytecie Zielonogórskim. Jest autorem jednego artykułu opublikowanego w materiałach

konferencji międzynarodowej. Jest zatrudniona na stanowisku asystenta w Instytucie Sterowania i Systemów Informatycznych, Uniwersytetu Zielonogórskiego. Aktualnie jej zainteresowania naukowe koncentrują się na diagnostyce procesów przemysłowych oraz zastosowaniu metod sztucznej inteligencji w diagnostyce.



Marcin WITCZAK, urodził się 19 grudnia 1973 roku. Tytuł magistra inżyniera w zakresie elektrotechniki uzyskał na Uniwersytecie Zielonogórskim w 1998 roku. Tytuł doktora w dziedzinie automatyki i robotyki uzyskał na

Politechnice Wrocławskiej w 2002 roku. W tym samym roku odbył staż na University of Hull, Wielka Brytania. Do czasu otrzymania stopnia doktora pracował jako asystent w Instytucie Systemów Sterowania i Informatycznych Uniwersytetu Zielonogórskiego gdzie jest obecnie zatrudniony na stanowisku adiunkta. Aktualnie zainteresowania naukowe to: detekcja i lokalizacja uszkodzeń, sztuczna inteligencja, planowanie eksperymentu i teoria sterowania. Dr Witczak uczestniczył w wielu projektach krajowych i międzynarodowych projektach badawczych, np. INCO-Copernicus (1997-1999) czy FP EU RTN and DAMADICS (2000-2004). Opublikował ponad 50 artykułów w czasopismach o zasiegu miedzynarodowym oraz w materiałach konferencji krajowych międzynarodowych. Jest autorem jednej i monografii i pięciu rozdziałów w książkach.

# SYMPTOMY DRGANIOWE W DIAGNOSTYCE TURBIN PRZECIWPRĘŻNYCH I UPUSTOWYCH

# Tomasz GAŁKA

#### Instytut Energetyki, Pracownia Diagnostyki Urządzeń Cieplnych Elektrowni ul. Augustówka 5, 02-981 Warszawa, fax (22) 642 8378, e-mail tomasz.galka@ien.com.pl

#### Streszczenie

W wibrodiagnostyce turbin parowych przedmiotem zainteresowania są przede wszystkim duże turbozespoły kondensacyjne. W porównaniu z nimi turbozespoły przeciwprężne i upustowe, pracujące w elektrociepłowniach komunalnych i przemysłowych, charakteryzują się nie tylko inną konstrukcją, ale również innymi uwarunkowaniami eksploatacyjnymi. Różnice te w znacznym stopniu wpływają na rejestrowane sygnały drganiowe, a zatem i na symptomy diagnostyczne. Ich interpretacja może się okazać znacznie trudniejsza. W szczególności należy uwzględnić duży wpływ parametrów pracy na rejestrowane wartości symptomów, przy czym procedury normalizacyjne, opracowane dla turbin kondensacyjnych, nie są w tym przypadku przydatne. Potwierdzają to wyniki badań, przeprowadzonych na turbinie kondensacyjno-upustowej 25 MW.

Słowa kluczowe: turbina parowa, wibrodiagnostyka, symptom diagnostyczny.

# VIBRATION-BASED SYMPTOMS IN THE DIAGNOSTICS OF COUNTER-PRESSURE AND TAPPED TURBINES

Vibrodiagnostics of steam turbines has been focused mainly on large condensing units. Compared to them, counter-pressure and tapped turbines, operated by municipal and industrial CHP plants, are characterized not only by different design features, but also by operational conditions. These differences markedly influence measurable vibration signals and hence diagnostic symptoms. Diagnostic reasoning may thus prove more difficult. In particular, large influence of operational parameters on recorded symptom values must be accounted for; typical normalization procedures, developed for condensing units, prove unsuitable in such cases. This has been confirmed by experimental studies of a 25 MW condensing tapped turbine.

Keywords: steam turbine, vibrodiagnostics, diagnostic symptom.

#### **1. WPROWADZENIE**

Głównym obiektem zainteresowania w wibrodiagnostyce turbozespołów są duże bloki kondensacyjne, pracujące w energetyce zawodowej. Jest to uzasadnione ich dużym kosztem oraz poważnymi skutkami awarii - zarówno pod względem bezpośredniego zagrożenia, iak i ponoszonych kosztów. Dla tych obiektów, będących reprezentatywnym przykładem maszyn krytycznych, opracowuje zarówno się najnowocześniejsze systemy, jak i najbardziej zaawansowane procedury diagnozowania i prognozowania.

W porównaniu nimi turbozespoły z przeciwprężne i upustowe, pracujące w elektrociepłowniach komunalnych i przemysłowych, skupiały mniejszą uwagę. Są to maszyny znacznie mniejsze; eksploatowane w kraju turbozespoły tego rodzaju rzadko przekraczają moc elektryczną 100 MW, a najczęściej spotykane są jednostki w zakresie 10 ÷ 50 MW. Charakteryzują się dużym zróżnicowaniem parametrów rozwiązań i

konstrukcyjnych, co utrudnia stosowanie typowych systemów: o ile w elektrowni zawodowej z reguły pracują turbiny jednego lub dwóch typów, o tyle każdy elektrociepłowni niejednokrotnie w turbozespół jest inny. Należy też pamiętać, że skutki awarii nie sa odczuwane przez system elektroenergetyczny jako całość. Wszystko to nie sprzyja stosowaniu rozbudowanych systemów diagnostycznych, których koszt jest z reguły wysoki.

Nie oznacza to oczywiście, że bezawaryjna praca tego typu turbozespołów nie jest istotna. W niektórych przypadkach – na przykład wówczas, gdy turbozespół dostarcza pary technologicznej moga mieć one charakter krytyczny. Skłania to do przydatności przeanalizowania rozwiazań stosowanych w odniesieniu do turbozespołów kondensacyjnych. Dotyczy to przede wszystkim interpretacji obserwowalnych symptomów diagnostycznych, a zwłaszcza mających największe zastosowanie symptomów drganiowych. Interpretacja ta wykorzystuje pewne modele, a model jest zawsze uproszczeniem. Konieczne jest stwierdzenie, czy w konkretnym przypadku uproszczenie takie jest dopuszczalne.

W dalszym ciągu omawiane będą przede wszystkim symptomy, których źródłem są widma drgań bezwzględnych, rejestrowanych na nieruchomych częściach turbozespołu. Wydaje się jednak, że przynajmniej niektóre wnioski mogą być uogólnione na szerszą klasę symptomów drganiowych.

Zastosowano wnioski wynikające z analizy modelu wibrodiagnostycznego turbiny parowej [1, 2], pozwalające na wyodrębnienie dwu grup symptomów drganiowych, a mianowicie:

- symptomów związanych bezpośrednio z ruchem obrotowym wirnika turbiny (składowe harmoniczne);
- symptomów wynikających z oddziaływania strumienia pary z układem przepływowym (składowe łopatkowe).

Pierwsze z nich są związane z uszkodzeniami i niesprawnościami typowymi dla wszystkich maszyn wirnikowych, natomiast drugie pozostają w związku ze stanem układu przepływowego turbiny.

## 2. UWARUNKOWANIA KONSTRUKCYJNE I EKSPLOATACYJNE

Podstawowa zależność między wektorem cech stanu  $\mathbf{X}(\theta)$  a wektorem mierzalnych symptomów  $\mathbf{S}(\theta)$ , gdzie  $\theta$  oznacza czas,

$$\mathbf{S}(\boldsymbol{\theta}) = F[\mathbf{X}(\boldsymbol{\theta})] \quad , \tag{1}$$

jest przydatna jedynie dla najprostszych obiektów, do których turbozespoły z pewnością nie należą. W [1] zaproponowano dla nich zależność typu

$$\mathbf{S}(\theta) = F[\mathbf{X}(\theta), \mathbf{R}(\theta), \mathbf{Z}(\theta)] , \qquad (2)$$

uwzględniającą wpływ wektorów sterowania  $\mathbf{R}$  i zakłóceń  $\mathbf{Z}$ ; w obydwóch powyższych wzorach F oznacza pewien operator.

Turbozespoły kondensacyjne w energetyce zawodowej, zwłaszcza podstawowe, pracują przez znaczną część czasu z parametrami pary bliskimi znamionowym i mocą narzuconą przez wymagania systemu elektroenergetycznego. Parametry wylotowe (próżnia) zmieniają się nieco zależnie od pory roku, lecz w stosunkowo niewielkich granicach. Uzasadnia to pominięcie wpływu innych niż moc czynna parametrów pracy na składowe wektora  $S(\theta)$  [3], czyli przyjęcie

$$\mathbf{R}(\theta) = \{ P_u(\theta) : \qquad (3)$$

Przy takim uproszczeniu możliwe jest sformułowanie stosunkowo prostych procedur normalizacji wpływu wektora sterowania [4], co bardzo ułatwia interpretację obserwowanych symptomów.

W turbozespołach przeciwprężnych i upustowych założenie to nie może być przyjęte. Na ogół produkcja energii elektrycznej jest w nich podporządkowana wymaganiu dostarczenia pary o odpowiednich parametrach i w odpowiedniej ilości z wylotu i/lub upustów. Parametry pracy zmieniają się w związku z tym w dość dużych granicach i niejednokrotnie bardzo szybko. Przykład przedstawiono na rys. 1, ukazującym zmiany trzech parametrów (ciśnienia i przepływu pary na wlocie oraz poboru pary z upustu) w funkcji czasu w okresie około 110 minut dla turbiny 25 MW z jednym upustem regulowanym. Jak widać, parametry wlotowe (turbina jest zasilana z kolektora) wahają się nieznacznie, natomiast pobór pary z upustu, zależny od chwilowych potrzeb odbiorcy, zmienia się w szerokich granicach i bardzo szybko.



Rys. 1. Przebiegi czasowe ilości (linia przerywana) i ciśnienia (linia kropkowana) pary na włocie oraz poboru pary z upustu (linia ciągła); parametry odniesione do ich wartości początkowych. Turbina Lang 25 MW

W [5] zaproponowano dla turbiny tego typu (ma ona cztery zawory regulacyjne) wektor sterowania  $\mathbf{R}$  w postaci

$$\mathbf{R}(\theta) = \{p_1, p_2, p_3, p_4, m_p, p_{wv}\} , \qquad (4)$$

gdzie  $p_i$  oznacza ciśnienie za *i*-tym zaworem regulacyjnym,  $p_{wy}$  – ciśnienie wylotowe, zaś  $m_p$ – przepływ masowy w upuście. Jest to zależność bardziej złożona niż (3) i trudniejsza do identyfikacji. Oczywiście w takim przypadku normalizacja wpływu mocy czynnej nie może być stosowana.

Powyższe różnice stają się szczególnie istotne dla składowych łopatkowych. Ich generacja wynika z niejednorodności, jakie w przepływie pary wprowadzają elementy układu przepływowego łopatki poszczególnych stopni wirników i kierownic. Powoduja one powstanie okresowej siłv wymuszajacej o czestotliwości zależnej od liczby łopatek. Dokładniejsze omówienie można znaleźć w literaturze (np. [2, 6]). Niejednorodności w przepływie pary są jednak wprowadzane również przez zawory regulacyjne i upusty; można to opisać przez rozkład ciśnienia w przekroju poprzecznym turbiny (w funkcji promienia, czyli odległości od wału, i położenia kątowego). Wpływ zaworów regulacyjnych, określany jako asymetria zasilania, jest wspólny dla wszystkich turbin z regulacją grupową. W przypadku turbin kondensacyjnych jest on uwzględniony w procedurach normalizacji wpływu mocy czynnej, choć moc ta nie jest jednoznaczną funkcją stopnia otwarcia zaworów [5], stąd procedury te są z konieczności przybliżone. Jeśli chodzi o upusty, to sprawa przedstawia się nieco inaczej.

W turbinach kondensacyjnych para jest pobierana z upustów jedynie do podgrzewu regeneracyjnego, a jej pobór jest w porównaniu z całkowitym przepływem masowym niewielki. Opis wyników modelowania numerycznego można znaleźć w literaturze (patrz np. [7]). Przykładowo dla drugiego upustu niskoprężnego turbiny typu 13K215 o mocy nominalnej 200 MW przy maksymalnym poborze pary z upustu uzyskano najwieksze niejednorodności rozkładu ciśnienia na poziomie około 8% ciśnienia statycznego (pobór ten wynosi około 7.8% całkowitego przepływu na wlocie do części niskoprężnej). Jest to niewiele, lecz w turbinie upustowej 13UC100 dla poboru z upustu za 16 stopniem wynoszącego 19% całkowitego przepływu przez stopień niejednorodność sięgała już, według tego samego źródła, 17%. Powoduje to powstawanie dodatkowych sił działających na układ przepływowy, a w konsekwencji zmianę obserwowanych charakterystyk drganiowych.

#### **3. BADANIA EKSPERYMENTALNE**

# 3.1. Obiekty i metodyka

Obiektem badań był turbozespół kondensacyjnoupustowy Lang o maksymalnej mocy elektrycznej 25 MW (ten sam, którego dotyczą przebiegi z rys.1), zainstalowany w elektrociepłowni przemysłowej. Pracuje on w układzie kolektorowym, z parametrami włotowymi pary 3.5 MPa/435°C. Nominalne ciśnienie w skraplaczu wynosi 9 kPa. Przepływ masowy przez turbinę wynosi przy obciążeniu znamionowym 112 t/h. Turbina jest wyposażona w upust 0.4 MPa i charakteryzuje się bardzo dużym zakresem poboru z tego upustu, sięgającym od zera do nominalnego przepływu przez turbinę. Wał turbozespołu jest podparty w czterech łożyskach ślizgowych.

W pomiarach rejestrowano widma tercjowe prędkości drgań bezwzględnych na łożyskach turbozespołu oraz na dwóch zaworach regulacyjnych. Zakres częstotliwościowy widm wynosił 10 kHz. Jako przetwornik drgań stosowano akcelerometr piezoelektryczny o zakresie 12 kHz z mocowaniem magnetycznym. Cykl pomiarowy trwał około 20 minut i w tym czasie rejestrowano podstawowe parametry pracy turbozespołu: parametry pary na wlocie i w upuście, przepływy masowe oraz moc czynną i bierną. Wykorzystywano do tego celu opomiarowanie ruchowe turbozespołu.

W celach porównawczych wykonano także pomiar na turbozespole tego samego typu, który został przebudowany i przystosowany do pracy z pogorszoną próżnią (para z wylotu jest pobierana do celów ciepłowniczych). Przy niezmienionym przepływie masowym przez turbinę temperatura pary wylotowej wynosi obecnie 120°C, natomiast jej ciśnienie waha się w granicach 55 ÷ 120 kPa. Osiągalna moc elektryczna wynosi 17 MW. Ogólny układ konstrukcyjny turbozespołu pozostał niezmieniony.

# 3.2. Wyniki pomiarów i ich omówienie

O dużej zmienności poboru pary z upustu była już mowa. W trakcie wykonanych badań maksymalny pobór (uśredniony za czas trwania cyklu pomiarowego) wynosił 60 t/h, czyli aż 71% całkowitego przepływu przez turbinę, a minimalny – 8.9 t/h (9.2%). W dalszym ciągu analizą objęto wyniki uzyskane przy trzech wariantach parametrów pracy, podanych tabeli 1.

Tabela 1. Parametry pracy turbozespołu 25 MW

Wariant	$m_w$	$m_u$	$P_a$	$P_r$
	t/h	t/h	MW	MVAr
1	96.7	8.9	18.3	3.3
2	84.8	37.9	10.9	5.2
3	84.1	60.0	8.1	3.7
Oznaczenie: m przepłuw macowy przez turbine				

Oznaczenie:  $m_w$  – przepływ masowy przez turbinę,  $m_u$  – pobór z upustu,  $P_a$  – moc czynna,  $P_r$  – moc bierna

W zakresie składowych harmonicznych (rozpatrywane były pierwsze cztery harmoniczne oraz składowa  $0.5 \times f_0, f_0 = 50$  Hz) w większości przypadków różnice między wynikami uzyskanymi dla poszczególnych wariantów były niewielkie, w granicach kilku decybeli. Większe różnice zaobserwowano jedynie na przednim łożysku turbiny, lecz było to prawdopodobnie spowodowane uszkodzeniem przekładni zębatej napędu głównej pompy olejowej, zlokalizowanej w przednim stojaku turbiny. Również na tylnym łożysku generatora zaobserwowano różnice składowych harmonicznych, sięgające w niektórych przypadkach kilkunastu dB, zwłaszcza w kierunku pionowym. Jest to związane najprawdopodobniej z wpływem mocy czynnej; różnica między wariantem 1 i 3 jest przeszło dwukrotna, a zatem znacznie większa, niż jest to możliwe w dużych blokach kondensacyjnych w energetyce zawodowej.<sup>1</sup> Generalnie ze spadkiem mocy czynnej składowe harmoniczne nieco sie zmniejszały, choć przy najniższej mocy niektóre wykazywały nieznaczny wzrost. Przykład podano w tabeli 2 (tu i w dalszym ciągu dla ułatwienia porównań zastosowano skalę decybelową, w której 0 dB odpowiada 10<sup>-6</sup> mm/s). Dość interesujący jest pewien wzrost składowych subharmonicznych drgań pionowych dla najniższej mocy czynnej, świadczący

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Dla przykładu turbozespoły 13K215 o mocy nominalnej 200 MW mogą pracować z minimalną mocą około 140 MW.

o niewielkim zmniejszeniu obciążenia łożyska, co potwierdza też spadek składowej podstawowej. W przypadku tego łożyska normalizacja wpływu mocy czynnej w oparciu o procedury stosowane dla turbozespołów kondensacyjnych mogłaby mieć zastosowanie, gdyż jest ono – w przeciwieństwie do przedniego łożyska generatora – konstrukcyjnie oddzielone od kadłuba turbiny, a zatem wpływ sił pochodzących od niejednorodnego rozkładu ciśnień jest prawdopodobnie pomijalny; wymagałoby to jednak bardziej szczegółowych badań. Warto też zwrócić uwagę, że wpływ zmian mocy na dominującą II harmoniczną jest najmniejszy, co sprawia, że całkowite wartości prędkości drgań we wszystkich wariantach różniły się nieznacznie.

Tabela 2. Składowe harmoniczne drgań pionowych tylnego łożyska generatora

Tercja	Prędkość drgań [dBvel] w wariancie			
[Hz]	1	2	3	
25	80.29	81.46	87.94	
50	114.23	101.44	107.07	
100	117.66	116.36	116.36	
160	103.53	96.40	88.22	
200	106.70	98.77	102.15	

W zakresie składowych łopatkowych różnice są znacznie większe. W tabeli 3 podano prędkości drgań w tercjach od 500 Hz do 8000 Hz, zarejestrowane na tylnym łożysku turbiny w kierunku pionowym.

Tabela 3. Składowe łopatkowe drgań pionowych tylnego łożyska turbiny

Tercja	Prędkość drgań [dBvel] w wariancie			
[Hz]	1	2	3	
500	95.61	94.38	97.89	
630	98.04	101.22	103.10	
800	99.18	95.85	104.29	
1000	98.69	95.30	112.57	
1250	94.29	93.13	109.50	
1600	94.75	98.90	110.59	
2000	99.16	97.72	107.36	
2500	95.24	96.57	111.80	
3150	96.10	96.39	110.81	
4000	98.14	98.18	103.40	
5000	103.22	101.74	92.59	
6300	97.07	89.81	87.43	
8000	90.02	86.51	86.83	

Jak widać, różnice między wariantami 1 i 2 są – mimo przeszło czterokrotnego wzrostu poboru pary z upustu – stosunkowo nieduże. Dopiero w wariancie 3 w większości pasm tercjowych następuje gwałtowny wzrost, niekiedy nawet o kilkanaście dB. Dotyczy to wszystkich tercji z wyjątkiem trzech najwyższych, gdzie największe wartości obserwuje się dla najniższego poboru pary, a potem ma miejsce wyraźny spadek. Powyższe uwagi dotyczą jednak tylko drgań pionowych. W kierunku poziomym wpływ poboru pary z upustu jest znacznie mniejszy, a różnice na ogół nie przekraczają 4 dB. Natomiast w kierunku osiowym ilościowo obraz jest podobny do obserwowanego dla drgań pionowych, ale jakościowo zupełnie inny. Zostało to przedstawione w tabeli 4.

Tercja	Prędkość drgań [dBvel] w wariancie			
[Hz]	1	2	3	
500	99.39	95.55	93.92	
630	104.05	103.45	97.42	
800	104.74	100.71	98.41	
1000	106.15	103.16	102.13	
1250	104.69	103.85	101.01	
1600	104.25	103.88	91.20	
2000	104.94	103.23	93.50	
2500	107.49	103.63	95.15	
3150	105.76	100.97	95.85	
4000	97.52	91.86	91.55	
5000	90.10	85.08	87.07	
6300	87.94	85.36	87.20	
8000	86.20	86.31	86.55	

Tabela 4. Składowe łopatkowe drgań osiowych tylnego łożyska turbiny

Jak widać w tabeli 4, w całym zakresie łopatkowym wartości prędkości drgań są najniższe dla wariantu 3, a więc tego, który charakteryzuje się największym poborem pary z upustu. Wyjaśnienie tego zjawiska wymagałoby dokładnej analizy wykorzystaniem metod modelowania z numerycznego, o których była wyżej mowa [7]. Analiza danych z tabel 3 i 4 świadczy jednak, że zmiana poboru pary wpływa zasadniczo nie tylko na wartości, ale również na rozkład przestrzenny sił pochodzacych od niejednorodnego rozkładu ciśnienia i działających na układ przepływowy turbiny.

Warto dodać, że dla przedniego łożyska generatora, powiązanego konstrukcyjnie z kadłubem turbiny, zmiany są jakościowo podobne do obserwowanych na tylnym łożysku turbiny, choć ilościowo różnice są nieco mniejsze. Interpretacja wyników pomiarów na przednim łożysku turbiny jest trudniejsza ze względu na wspomniane uszkodzenie przekładni zębatej. Spowodowało ono anormalny wzrost drgań nie tylko w zakresie harmonicznym, ale również w niektórych pasmach tercjowych zakresu łopatkowego. Jest to podstawowym problemem w analizie drgań turbin o tym układzie konstrukcyjnym.

Interesujące są również wyniki porównania widm zarejestrowanych na zaworach regulacyjnych. Z przyczyn technicznych możliwe było wykonanie pomiaru jedynie na dwóch skrajnych zaworach (lewym i prawym). W obydwóch przypadkach zaobserwowano wyraźny (nawet ponad 10 dB) wzrost prędkości drgań w zakresie 200 ÷ 500 Hz dla wariantu 2, natomiast przy poborze najniższym i najwyższym widma niewiele różniły się od siebie. Być może zjawisko to ma charakter rezonansowy; rozstrzygnięcie tej kwestii wymagałoby szczegółowej analizy pracy układu regulacji turbiny.

Powyższe zmiany są bardzo dobrze widoczne w widmach drgań; przykład podano na rys.2. W tym przypadku przy najniższym poborze pary z upustu (wariant 1) udział składowych łopatkowych jest stosunkowo niewielki, natomiast przy najwyższym poborze (wariant 3) rośnie od znacznie, do tego że składowe łopatkowe stają się stopnia, porównywalne z harmonicznymi. Wiąże się z tym wzrost całkowitej prędkości drgań o około jedną zmiany trzecia. mimo że składowych harmonicznych, dominujących w widmach, są minimalne.



Rys. 2. Widma prędkości drgań pionowych tylnego łożyska turbiny Lang 25 MW; góra – wariant 1, dół – wariant 3

Na rys. 3 przedstawiono porównanie widm prędkości drgań badanej turbiny z drugą, przystosowaną do pracy z pogorszona próżnią i pozbawioną upustu; jak wspomniano w p.3.1, turbiny te były pierwotnie identyczne. Do porównania wybrano drgania poziome tylnego łożyska turbiny, a więc te, w których wpływ zmian poboru z upustu był stosunkowo najmniejszy. Pomiary wykonano przy zbliżonych wartościach przepływu masowego. Jak widać, różnica jest dość duża. Składowe podstawowe różnią się o około 7 dB, drugie harmoniczne - o około 5 dB i jest to zapewne związane z typowymi parametrami wpływającymi na obraz drgań harmonicznych, przede wszystkim stanem wyważenia. Dużo większe są różnice w zakresie łopatkowym. W sześciu pasmach tercjowych wynoszą one od 8 do ponad 12 dB. Na ogół wyższe wartości występują dla turbiny upustowej, jedynie w trzech najwyższych pasmach tercjowych, zawierających składowe generowane przez stopnie wirnika, wartości dla turbiny bez upustu są porównywalne lub nawet wyższe. Jest to ciekawe spostrzeżenie, dowodzi bowiem - wraz z omówionymi wyżej wynikami porównania trzech wariantów pracy turbiny - że wprowadzane przez zmienny pobór pary z upustu niejednorodności mogą w pewnym zakresie poborów częściowo niwelować niejednorodności, których źródłem jest asymetria zasilania.<sup>2</sup> Jak już jednak wspomniano, wyjaśnienie obserwowanych pełne ziawisk wymagałoby szczegółowej analizy z zastosowaniem modelowania numerycznego.





<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Turbina jest wyposażona w cztery zawory regulacyjne, lecz w żadnym z wariantów pracy wszystkie nie były całkowicie otwarte; ostatni zawór jest w pełni otwarty w zasadzie jedynie przy maksymalnym przepływie masowym i zaniżonych parametrach pary wlotowej.

Do ciekawych wniosków prowadzi analiza korelacji między przebiegami prędkości drgań w poszczególnych pasmach widm tercjowych a przebiegami niektórych parametrów pracy turbozespołu. Dla przykładu przedstawiono wyniki uzyskane dla tylnego łożyska turbiny w kierunku poziomym. Wykonano 70 rejestracji widm prędkości drgań w odstępach czasu 1 minuty, rejestrując równocześnie następujące parametry:

- ciśnienie, temperaturę i przepływ pary świeżej,
- ciśnienie, temperaturę i pobór pary z upustu,
- ciśnienie pary na wylocie z turbiny,
- moc czynną i bierną.

Obliczenia współczynników korelacji  $\rho$  między wartościami prędkości drgań w poszczególnych pasmach a powyższymi parametrami wykazały, że dla większości z nich przebiegi  $\rho(f)$ , gdzie f jest częstotliwością środkową pasma, były bardzo zbliżone. Ponieważ układy regulacji utrzymują temperaturę pary świeżej oraz pobór pary z upustu na zadanych poziomach (przez cały czas trwania cyklu pomiarowego nie uległy one zmianie), korelacja dla tych dwóch parametrów nie występuje. Dla wszystkich pozostałych parametrów przebiegi  $\rho(f)$  wykazywały wartości około 0.4 ÷ 0.65 w zakresie składowych harmonicznych (poza II harmoniczną, dla której współczynniki  $\rho$  były bardzo niskie) oraz w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych od 400 Hz do 1600 Hz i od 5000 Hz do 8000 Hz. Odpowiada to pasmom zawierającym składowe generowane przez poszczególne stopnie układu przepływowego turbiny. Dwa przykłady przedstawiono na rys.4a i 4b. Jedynie dla temperatury pary z upustu przebieg  $\rho(f)$  był mniej regularny od pozostałych (choć jakościowo podobny), a wartości współczynników wyraźnie mniejsze - patrz rys.4c. Wynika to zapewne z działania układu regulacji, który minimalizuje wahania tego parametru.

Zbliżone przebiegi  $\rho(f)$ dla większości parametrów pracy turbozespołu sugerują możliwość opracowania procedur normalizacyjnych opartych tylko na jednym wybranym parametrze (czyli analogicznie do wspomnianej wyżej normalizacji W wpływu czynnej turbozespołach mocy kondensacyjnych). Wydaje się jednak, że wniosek taki jest jeszcze przedwczesny, a jego potwierdzenie wymagałoby dalszych badań. Możliwość taka byłaby dużym ułatwieniem we wnioskowaniu diagnostycznym.

Aby wnioski wynikające z porównań widm drgań zarejestrowanych przy różnych parametrach pracy mogły być uznane za miarodajne, konieczna jest analiza dokładności określenia wartości prędkości drgań w pasmach tercjowych. Jak się okazuje [8], występuje tu duża zależność od częstotliwości, przy czym niezależnie od punktu pomiarowego zależność ta przedstawia się podobnie. Miarą tej dokładności może być względna szerokość przedziału ufności  $\pm$  95%, czyli iloraz  $\Delta_{95}/S$ , gdzie *S* jest wartością średnią rozpatrywanego symptomu. Przykładowy przebieg tej zależności dla jednego z punktów pomiarowych turbiny upustowej 25 MW, będącej przedmiotem omawianych badań, przedstawiono na rys. 5. Przebieg ten otrzymano z próbki 56 pomiarów.





Warto dodać, że w pozostałych punktach obserwowano zależności  $\Delta_{95}/S$  bardzo zbliżone jakościowo, przy czym regułą jest znaczny wzrost dla tercji z zakresu łopatkowego. Godny uwagi jest

również fakt, że bardzo podobne jakościowo zależności obserwuje się dla dużych turbin kondensacyjnych. Przykład dla turbiny typu K-200 w wersji zmodernizowanej przedstawiono na rys. 6. Jak widać, jest on jakościowo bardzo zbliżony, jedynie wartości  $\Delta_{95}/S$  są nieco niższe.



Rys. 5. Zależność  $\Delta_{95}/S$  dla drgań pionowych przedniego łożyska generatora turbozespołu upustowego Lang 25 MW (56 pomiarów)





Powyższe wyniki uzasadniają stwierdzenie, że w zakresie składowych łopatkowych, w którym dokładność jest mniejsza, różnica w granicach 6 dB (czyli dwukrotna przy przejściu na wartości bezwzględne) nie może być uznana za wynikającą z błędu pomiaru. Potwierdza to miarodajność wniosków z porównania wyników pomiarów turbozespołu upustowego przy różnych wariantach pracy, gdyż różnice są na ogół znacznie większe, a w niektórych przypadkach sięgają nawet rzędu wielkości.

#### 4. PODSUMOWANIE

Mimo mniejszej na ogół mocy i nie tak spektakularnego znaczenia dla funkcjonowania systemu elektroenergetycznego jako całości, turbozespoły przeciwprężne i upustowe, pracujące

elektrociepłowniach komunalnych w i przemysłowych, są obiektami ważnymi dla diagnostyki technicznej. Ważnymi, ale niejednokrotnie dość trudnymi z punktu widzenia procedur wypracowania wiarygodnych wnioskowania diagnostycznego. Wspólna dla wszystkich turbin parowych zasada działania i podobne rozwiązania konstrukcyjne sprawiają, że możliwe jest stosowanie metod i systemów opracowanych dla dużych turbozespołów kondensacyjnych. Różnice dotyczą głównie tego wszystkiego, co wiąże się z wpływem parametrów pracy na obserwowane charakterystyki drganiowe. W porównaniu z typowymi turbozespołami kondensacyjnymi liczba parametrów, które należy wziać pod uwagę, jest większa, a zakres ich zmian znacznie szerszy. Powoduje to, że procedury normalizacji ich wpływu musza być inne. Interpretacja symptomów diagnostycznych może być wskutek tego znacznie trudniejsza.

Duży zakres zmian niektórych parametrów, zwłaszcza przepływowych, oraz szybkość tych zmian przyczyniają się również do nasilenia procesów wyczerpywania żywotności, nawet przy niższych wartościach temperatury znacznie ciśnienia pary wlotowej. i W prawidłowo eksploatowanym turbozespole kondensacyjnym, zwłaszcza pracującym jako podstawowy, stany nieustalone mają miejsce w zasadzie jedynie podczas rozruchów i odstawień. Ich liczba jest niska, niekiedy zaledwie kilkadziesiat rocznie. Natomiast w turbozespole pracującym w elektrociepłowni każda zmiana parametrów przepływowych może być traktowana jako jeden cykl z punktu widzenia procesów zmęczenia niskocyklicznego, których wpływ jest w związku z tym nasilony. Z reguły trwałość układów przepływowych w takich turbozespołach okazuje się znacznie niższa.

Na koniec należy również wspomnieć, że eksploatowanych znaczna liczba w kraiu ciepłowniczych dość turbozespołów ma zaawansowany wiek, a zakres modernizacji - o ile w ogólne miały one miejsce - był skromny w porównaniu z energetyką zawodową. Wszystkie powyższe czynniki podkreślają znaczenie właściwie prowadzonej diagnostyki ich stanu technicznego, a więc przede wszystkim wiarygodnej interpretacji symptomów diagnostycznych.

W artykule wykorzystano wyniki prac prowadzonych w Pracowni Diagnostyki Urządzeń Cieplnych Elektrowni Instytutu Energetyki w ramach działalności statutowej.

# LITERATURA

- Z. Orłowski: Wibrodiagnostyka turbin parowych. Prace Instytutu Energetyki, zeszyt 18. Warszawa, 1989.
- [2] Z. Orłowski: *Diagnostyka w życiu turbin parowych*. WNT, Warszawa, 2002.

- [3] T. Gałka: Application of energy processor model for diagnostic symptom limit value determination in steam turbines. Mechanical Systems and Signal Processing, 1999, vol.13, No.5, pp. 757-764.
- [4] T. Gałka: Normalization of Vibration Measurements: Unnecessary Complication or Important Prerequisite?. Proceedings of the Second International Symposium on Stability Control of Rotating Machinery ISCORMA-2, Gdańsk, 2003, pp. 722-731.
- [5] T. Gałka, T. Ponikiewski: Ocena symptomów wibrodiagnostycznych turbin przeciwprężnych i upustowych ze szczególnym uwzględnieniem diagnostyki układów przepływowych. Opracowanie Instytutu Energetyki (niepublikowane). Warszawa, 2005.
- [6] R. Łączkowski: Drgania elementów turbin cieplnych. WNT, Warszawa, 1974.
- [7] Modelowanie i diagnostyka oddziaływań mechanicznych, aerodynamicznych i magnetycznych w turbozespołach energetycznych. Praca zbiorowa pod red. J. Kicińskiego. IMP PAN, Gdańsk, 2005.

[8] T. Gałka: Kwestia dokładności w analizie trendów drgań maszyn wirnikowych. Materiały XXXIII Ogólnopolskiego Sympozjum 'Diagnostyka Maszyn' Węgierska Górka, 2006 (edycja na CD-ROM).



Dr inż. **Tomasz GAŁKA** ukończył Wydział Elektroniki Politechniki Warszawskiej. Od 1982 r. jest pracownikiem naukowym Instytutu Energetyki w Warszawie, obecnie kierownikiem Pracowni Diagnostyki Urządzeń Cieplnych Elektrowni. Zajmuje się

głównie wibrodiagnostyką turbozespołów energetycznych. Uczestniczył w kilku projektach badawczych z tej dziedziny. Jest autorem lub współautorem ponad 50 publikacji krajowych i zagranicznych.

# METODA POMIARU WYBRANYCH PARAMETRÓW METROLOGICZNYCH PIŁ TARCZOWYCH Z WĘGLIKAMI SPIEKANYMI PRZY ZASTOSOWANIU TECHNIK WIZYJNYCH

#### Piotr BASZUN\*, Henryk KRÓL\* Marek PISZCZEK\*\*

Wojskowa Akademia Techniczna Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych\*, Wydział Techniki Wojskowej, Instytut Optoelektroniki\*\*, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa; fax: 022 683-91-25; e-mail: <u>pbaszun@wat.edu.pl</u>, <u>hkrol@wat.edu.pl</u>, <u>mpiszczek@wat.edu.pl</u>

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczące pomiaru bicia promieniowego i bocznego pił tarczowych z węglikami spiekanymi. Proponowany układ pomiarowy oparty jest na wykorzystaniu technik wizyjnych. W przyjętym modelu pomiarowym założono, że jeden ząb wybrany losowo, traktowany był jako pierwszy (tzw. zerowy) i w stosunku do tego zęba wykonywane były pomiary. Wyznaczenie wartości bicia promieniowego i bocznego realizowane było w szeregu sesji pomiarowych oddzielnych dla każdego zęba i dla każdego rodzaju "bicia". Uzyskane wstępne wyniki wskazują na potrzebę prowadzenia dalszych badań nad tą metodą.

Słowa kluczowe: bicie promieniowe, bicie boczne, piła tarczowa, techniki wizyjne.

#### METHOD OF MEASUREMENT SELECTED METROLOGICAL PARAMETERS OF CEMENTED CARBIDES CUTTING SAW WITH APPLICATION OF VISUAL INSPECTION

#### Summary

There are presented experimental results of radial run-out and axial run-out measurement of the timber cutting saw with cemented carbides. Measurement system based on visual inspection with CCTV is proposed. Method was based on the assumption, than one of the teeth, randomly choosen, was a reference, and the following measurements were taken relate to them. Determination of value of the radial and axial run-out separately for each tooth and kind of run-out was provided in series of experiment sessions. Preliminary results show us the need of following research of this method.

Keywords: radial run-out, axial run-out, cutting saw, visual inspection.

#### 1. WSTĘP

Przedmiotem badań są piły tarczowe z węglikami spiekanymi. Są one najczęściej stosowanymi piłami do cięcia drewna, zarówno wzdłużnego, jak i poprzecznego. Z analizy danych wynika, że dla określenia niezbędnej średnicy takiej piły można wykorzystać następującą zależność D = 2(h + a + e) [mm]

gdzie:

- D średnica piły,
- h wysokość ciętego drewna,
- a odległość pomiędzy powierzchnią stołu a osią piły,
- e wielkość wystawania piły ponad cięte drewno.

Przy średnicy piły 100 mm, powszechnie stosowana jest jej grubość 0,8 mm, a dla średnicy metra - od 6 mm. Duża rozpiętość w grubościach zależy w znacznym stopniu nie tylko od rodzaju obrabiarki i warunków pracy, ale także od poziomu technicznego przygotowania pił do pracy, przede wszystkim od nadania pile odpowiedniego naprężenia. Prawidłowo eksploatowane piły zachowują swoje naprężenie dłuższy czas. Natomiast piły przegrzane, źle ostrzone, wymagają ponownego naprężenia.

Przeprowadzona analiza wskazuje, że liczba zębów piły tylko w pewnym stopniu zależy od średnicy piły. Główny jednak wpływ na nią mają: szybkość cięcia, wielkość posuwu na jeden ząb, wymagana gładkość powierzchni cięcia, gatunek ciętego drewna i kierunek cięcia.

Doświadczalnie stwierdzono, że większa liczba zębów wymagana jest przy cięciu twardych gatunków drewna, a także przy cięciu poprzecznym w stosunku do cięcia wzdłużnego. Ponadto istotne znaczenie ma wybór właściwego rodzaju uzębienia. Najistotniejsze jest bowiem to, aby wybrać właściwy kąt natarcia uzębienia, a więc dostosować piłę do rodzaju cięcia tj. wzdłużnego lub poprzecznego.

W trakcie badań poszczególnych parametrów pił szczególną uwagę poświęcono badaniom bicia promieniowego i bocznego pił.

# 2. PODSTAWOWE WYMAGANIA WOBEC PIŁ TARCZOWYCH

Piły tarczowe muszą spełniać podstawowe wymagania normy europejskiej EN 847-1. Norma ta, ustanowiona w 1997 roku, zawiera podstawowe wymagania bezpieczeństwa dotyczące pił tarczowych. W 1999 roku Polski Komitet Normalizacyjny wdrożył normę EN 847-1 w naszym kraju, jako PN-EN 847-1: 1999 "Narzędzia do drewna Wymagania tarczowe". bezpieczeństwa Frezy i piły \_ Wymagania te można sprecyzować w kilku grupach, które w szczególności dotyczą kształtu i wymiarów, wyważenia statycznego i dynamicznego, badań dynamicznych (testy wirowania oraz odrzutu).

Norma określa również, dla różnych stosowanych materiałów minimalne grubości noży oraz wymaganą powierzchnię ich mocowania w głowicach. Określone są maksymalne tolerancje dla otworów do mocowania w piłach tarczowych (H8) oraz w narzędziach nasadzanych (H7), a także średnica, bicie czołowe (maksymalnie 0,02 mm) oraz odchyłki równoległości płaszczyzn czołowych piast narzędzi nasadzanych (również maksymalnie 0,02 mm).

podstawie przeprowadzonej Na analizy dostępnej literatury [1, 2, 6] i zebranych uwag praktycznych należy stwierdzić, że aby właściwie przygotować piłę tarczową do pracy, trzeba wykonać kilka czynności ujętych w określonych wymaganiach. Wszystkie one są niezmiernie istotne Z praktycznego punktu widzenia, jednak w rozważaniach szczególną uwagą zwrócono na te, które wpływają na wartość bicia pił. W szczególności mówią one, że:

- Należy przestrzegać zasad czystości powierzchni bocznych pił i uzębienia. Piła podczas cięcia swoją średnicą nie może wychodzić ponad cięty materiał więcej niż 10 mm. Jeżeli wychodzi więcej, może nastąpić jej przegrzanie. Piła straci naprężenie, będzie schodzić z linii cięcia. Piły nie wolno stawiać na zębach. Wiesza się ją lub kładzie na płasko.
- Piła powinna być dobrana do cięcia z uwzględnieniem rodzaju ciętego drewna, sposobu rozkroju: wzdłuż lub poprzecznie do włókien, wysokości ciętego drewna. Wiąże się to z odpowiednimi parametrami wymiarowymi i kątowymi piły, jak również kształtem uzębienia.
- Należy sprawdzić płaskość piły. Ma to na celu wyeliminowanie pił, które mają nadmierną krzywiznę i w czasie pracy mogłyby nastąpić tarcia boczne powierzchni piły o przecinany materiał.
- Ostrzenie uzębienia pił tarczowych nie może doprowadzić do powstawania na powierzchni natarcia i przyłożenia, jak również we wrębie zęba ostrych przejść i zapiłowań. Jeżeli do ostrzenia używa się ostrzarki mechanicznej, należy zwrócić uwagę na przegrzanie zębów.

W czasie ostrzenia trzeba dążyć do zapewnienia kształtu uzębienia zgodnie z pierwotnym zarysem nowej piły. Nie należy przerabiać uzębienia piły. W zarysie zęba szczególną uwagę zwrócić należy na odpowiedni kąt natarcia.

- Należy sprawdzić wielkości rozwarcia uzębienia. Zbyt małe rozwarcie uzębienia może powodować tarcie korpusu piły o przecinany materiał, doprowadzając do przypalania piły. Wielkość rozwarcia uzębienia zależy głównie od grubości piły. Należy pamiętać, że rozwierając zęby trzeba dokonywać wygięcia na 1/3 do 2/3 wysokości zęba. Podstawowe wielkości wychylenia zęba określa polska norma.
- Do mocowania pił stosować zalecane lub większe średnice tarcz dociskowych, zapewniające odpowiednia sztywność piły w czasie pracy. Zachować prawidłowe mocowanie piły na wale maszyny pomiędzy tarczami dociskowymi (piła nie może ślizgać się pomiędzy tarczami dociskowymi). Złe mocowanie prowadzi do przegrzania piły, przez co traci ona swoje naprężenie, a w skrajnych przypadkach może doprowadzić do rozerwania piły. Nie należy dokonywać w sposób dowolny otworów centralnych przeznaczonych do mocowania piły. Niefachowa przeróbka otworu prowadzi do niecentryczności piły (bicie promieniowe), utraty naprężenia wewnętrznego i "błądzenia piły" w czasie pracy. Piły po przeróbce otworu winny być przeostrzone na ostrzarkach mechanicznych z uwzględnieniem całego profilu zęba. W razie przeróbki otworu piła powinna być ponownie sprawdzona na bicie oraz bezwzględnie przeostrzona. Dla prawidłowej pracy piły wymagane jest stosowanie odpowiednich tarcz zaciskowych o jednakowej średnicy. Nie mogą one być pełne, muszą posiadać kołnierz od 10 do 18 mm oraz powinny być wolne od uszkodzeń mechanicznych - zadziorów.
- Dla pił tarczowych należy stosować szybkości obwodowe pił w zakresie 40 ÷ 70 m/s. Zwykle jest to 40 ÷ 60 m/s. Obniżanie tego zakresu staje się nieekonomiczne, natomiast przekraczanie granicy 70 m/s może prowadzić do przeciążenia piły, zniszczenia jej korpusu i spowodować zagrożenie dla bezpośredniej obsługi.

W przypadku wykorzystania pierścienia redukcyjnego musi on być dopasowany, by nie nastąpiło zwiększone bicie promieniowe.

 Należy sprawdzić, czy piła posiada wierzchołki zębów na jednej średnicy, aby obciążenie poszczególnych zębów było równomierne. Praktycznie można to sprawdzić dokonując pomiaru bicia promieniowego lub pośrednio, poprzez pomiar wysokości zębów przy ostrzeniu na profesjonalnych ostrzarkach do pił tarczowych.

# 3. OGÓLNA KONCEPCJA UKŁADU POMIAROWEGO

Proponowany układ pomiarowy oparty jest na wykorzystaniu technik wizyjnych i zaliczany jest do metod bezstykowych. W założeniu przyjęto, że uchwyt mocujący tarczę piły jest wzorcowy, tzn. nie wnosi żadnych błędów. Natomiast główne badania są skierowane na pomiar bicia promieniowego i bocznego piły. Szczegółowa analiza wymagań, które muszą spełniać piły tarczowe z węglikami spiekanymi pozwoliła określić zakresy pomiarowe parametrów węglików spiekanych stanowiące podstawę koncepcji układu pomiarowego. W szczególności układ pomiarowy powinien zapewniać pomiar:

- bicia promieniowego węglików spiekanych w zakresie 0 ÷ 1,0 mm,
- bicia bocznego (osiowego) węglików w zakresie 0 ÷ 2 mm,
- bicia bocznego tarczy mierzone pod wrębem zeba 0 ÷ 3 mm,
- błąd bezwzględny mniejszy od 0,01 mm.

Stanowisko pomiarowe składa się z układu mocującego piłę tarczową i układu kamer przekazujących wyniki pomiarów do odpowiednio oprogramowanego komputera. Widok stanowiska pomiarowego przedstawiony jest na rys. 1.



Rys. 1. Widok stanowiska pomiarowego

W związku z wykorzystaniem fotogrametrii bliskiego zasięgu w zakresie wstępnych badań przeanalizowano własności optyczne układu pomiarowego. Szczegóły układu przedstawiono na rys. 2. Końcowe wnioski ujęto w następujący sposób:

- a) Obraz optyczny nigdy nie jest wiernym odwzorowaniem przedmiotu. Powodem tego jest:
  - dyfrakcja światła na przysłonie aperturowej (ograniczająca rozdzielczość przyrządu),
  - filtracja optyczna związana ze skończonymi rozmiarami układu optycznego,
  - aberracje geometryczne wprowadzające zniekształcenia rzutu obserwowanego obiektu w płaszczyźnie obrazowej.

W przypadku występowania aberracji (aberracje geometryczne 3-go rzędu) w płaszczyźnie obrazowej obrazem np. punktu B nie jest punkt B' tylko zbiór punktów stanowiący obraz aberracyjny.



Rys. 2. Własności optyczne układu pomiarowego

b) Parametry sensora obrazowego: D = 1.75 mm, f = 3.5 mm,

j = 5.5 mm,rozdzielczość matrycy  $\rightarrow 640 \text{ x } 480.$ 

# c) Głębia ostrości:

Istotną rzeczą w procesie pomiarowym jest dobór głębi ostrości. W rozpatrywanym przypadku istotne jest dopasowanie parametrów układu optycznego do wymiarów zęba piły. Zależność opisująca głębię ostrości *Ag* wyraża się następująco

$$\Delta g_{\pm} = \frac{s}{\left|\frac{D \cdot f}{\Delta x \cdot z}\right| \pm 1}$$

gdzie:

D – średnica obiektywu,

 $\Delta x$  – wymiar piksela obrazu.

Z przeprowadzonych obliczeń dla wykonanego układu wynosi ona  $\Delta g \approx \pm lmm$  i jest porównywalna z rozmiarami geometrycznymi analizowanego obiektu (ząb piły).

#### d) Analiza zdolności rozdzielczej systemu

Zdolność rozdzielczą przyrządów optycznych ograniczają w głównej mierze zjawiska dyfrakcji światła na przysłonie aperturowej oraz aberracje.

W przypadku małych aberracji mówimy o przyrządzie ograniczonym dyfrakcyjnie. Liniową zdolność rozdzielczą  $r_A$  takiego przyrządu można wyznaczyć z zależności

$$r_A = 1,22 \cdot f \cdot \frac{\lambda}{D}$$

gdzie  $\lambda$  oznacza długość fali.

Dla wykonanego układu rozdzielczość dyfrakcyjna wynosi  $r_A \approx l \mu m$  co stanowi wartość o blisko jeden rząd mniejszą niż wymiary piksela matrycy obrazowej. Tym samym zastosowana optyka nie ogranicza rozdzielczości systemu pomiarowego.

W proponowanej metodzie (jak i w większości układów pomiarowych wykorzystujących elementy optyczne) możemy mieć do czynienia z następującymi aberracjami:

- sferyczną (pośrednio wpływającą na rozdzielczość systemu pomiarowego),
- astygmatyzmem (zniekształcającym obrazy obiektów oddalonych od osi optycznej),
- chromatyczną (możliwą do wyeliminowania przy zastosowaniu rejestracji obrazów w świetle monochromatycznym),
- dystorsją (spowodowaną różnym powiększeniem obrazu w funkcji odległości od osi optycznej). Wpływ dystorsji na zobrazowanie przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Wpływ dystorsji na zobrazowanie: a) przedmiot obserwacji (siatka), b) dystorsja typu "poduszka", c) dystorsja typu "beczka"

W przypadku rozpatrywanego układu pomiarowego najistotniejsze znaczenie może mieć dystorsja. Istnieje więc konieczność korekcji tego typu aberracji poprzez stosowanie optycznych układów ortoskopowych lub wyznaczenie "mapy dystorsji (funkcji dystorsji)" i uwzględnienie jej w algorytmach obliczeniowych.

#### 4. METODYKA POMIARÓW

W proponowanym modelu pomiarowym przyjmujemy, że jeden ząb, wybrany losowo, traktujemy jako pierwszy i w stosunku do tego zęba następują pomiary. Tak więc dla tego pierwszego zęba wynik pomiaru wynosi zero. Kolejne pomiary wykonujemy względem zęba pierwszego lub tzw. zerowego. Załóżmy, że drugi ząb jest niższy o 0,01 mm, trzeci ząb jest niższy o 0,03 mm, czwarty ząb jest niższy o 0,12 mm itd. Po uzyskaniu wszystkich wyników największa odległość od zęba zerowego określana będzie biciem promieniowym.

Zastosowana idea pomiarowa nawiązuje do mikroskopii optycznej wykorzystaniem Ζ obserwacji w jasnym polu. Ze względu na funkcjonalność realizowaną przez system pomiarowy (pomiar geometrii zęba) oraz konieczność zastosowania cyfrowego przetwarzania obrazów uzyskiwane rejestrogramy mają postać obrazów cieniowych. Schematyczny widok pola odczytowego przedstawia rys. 4, natomiast idee pomiarowa rys. 5.







Rys. 5. Idea pomiarowa bicia promieniowego i bocznego

Wyznaczanie poszukiwanych parametrów (wartość bicia promieniowego i bocznego) [7] realizowane jest w serii pomiarowej, złożonej z szeregu sesji pomiarowych oddzielnych dla każdego zęba i dla każdego rodzaju "bicia". Na pojedynczą sesję pomiarową składa się seria zdjęć "zęba".



Rys. 6. Seria zdjęć zęba dla bicia promieniowego i bicia bocznego

W wyniku analizy rejestrogramów metodami cyfrowego przetwarzania obrazów zostają w kolejnych krokach wyznaczone odpowiednie współrzędne obrazowe pozycji zęba  $(x_i, y_i)$  a w efekcie i funkcja  $f_{nr}$  opisująca trajektorię jego obrotu rys. 7.



Rys. 7. Wyznaczanie trajektorii obrotu zęba

W następnej kolejności określone zostają (poprzez porównanie z zębami odniesienia nr = 0) parametry charakterystyczne BX tj. bicie promieniowe BP i bicie boczne BB. Ogólną postać tzw. "bicia piły" przedstawia poniższa zależność

$$BX_{nr} = \frac{1}{i} \sum_{i} f_{nr}(x_{i}, y_{i}) - \frac{1}{j} \sum_{j} f_{0}(x_{j}, y_{j})$$

## 5. PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ

W trakcie badań (bicia promieniowego) piły typu 250x30x3,2/2,5; z = 80 GA-5 zastosowano metodę najmniejszych kwadratów do wyznaczenia promienia obrotu R na podstawie N pomiarów pozycji zęba  $(x_{i,}y_{i,})$ . Wychodząc z równania okręgu  $(x_{i} - x_{0})^{2} + (y_{i} - y_{0})^{2} = R^{2}$ gdzie:

R – promień obrotu zęba,

 $x_0, y_0 -$ środek obrotu zęba,

oraz wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów otrzymano

$$\begin{aligned} \varsigma &= \sum_{i=1}^{N} ((x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - R^2)^2 \\ \frac{\partial \varsigma}{\partial R^2} &= R^2 N - \sum_{i=1}^{N} x_1^2 + 2x_0 \sum_{i=1}^{N} x_i - Nx_0^2 - \sum_{i=1}^{N} y_i^2 + 2y_0 \sum_{i=1}^{N} y_i - Ny_0^2 = 0. \end{aligned}$$

Po przekształceniach ostateczny wzór na promień obrotu R przy N pomiarach zęba ( $x_{i,y_{i,j}}$ ) przyjmuje postać

$$R = \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^{N} x_{1}^{2} + \sum_{i=1}^{N} y_{i}^{2} - 2 \sum_{i=1}^{N} x_{i} x_{0} - 2 \sum_{i=1}^{N} y_{i} y_{0} + N x_{0}^{2} + N y_{0}^{2} \right).$$

Dane z całej serii pomiarowej zostają porównane ze sobą (porównanie wyników z kolejnych sesji z rezultatami uzyskanymi dla zęba odniesienia), co umożliwia wykreślenie rozkładu bicia piły w funkcji kolejnych jej zębów rys. 8.



Rys. 8. Wyniki bicia promieniowego

Widoczny na wykresie "trend" związany jest z przesunięciem rzeczywistej osi obrotu piły. Minimalizację powyższego zjawiska można uzyskać poprzez zastosowanie odpowiedniej procedury korygującej - rys. 9.



Zaproponowana metoda analizy danych minimalizuje błędy wnoszone przez:

- niedokładność pozycjonowania rejestratorów obrazu w stosunku do mechanizmu na którym zamocowana jest piła tarczowa,
- niedokładność wyznaczenia parametrów akwizycji obrazu (aktualne powiększenie, odległość do obserwowanego obiektu).

Uzyskane w trakcie badań wyniki pomiarów w warunkach statycznych pozwoliły na oszacowanie wartości bicia promieniowego rzędu 0,05 mm.

## 6. PODSUMOWANIE

Proponowana metoda jest rozwiązaniem zaliczanym do grupy bezkontaktowych metod pomiarów wymiarów geometrycznych. Nośnikiem informacji jest promieniowanie świetlne a (bezpośrednio) mierzonym parametrem jego natężenie. Ze względu na strukturę systemu pomiarowego jak i sam obiekt badań, rozwiązanie plasuje się w grupie pomiarów z zakresu fotogrametrii bliskiego zasięgu. Zastosowana idea pomiarowa nawiązuje do mikroskopii optycznej z wykorzystaniem obserwacji w jasnym polu.

Na podstawie przeprowadzonych badań należy stwierdzić, że analizowane problemy są złożone. W szczególności związane są one z opracowaniem uniezależniających całość metod procedury pomiarowej od wymogów znajomości geometrycznych parametrów poszczególnych i optycznych układu (np. położenia osi obrotu piły oraz jej zębów w stosunku do rejestratorów obrazowych, pola widzenia układu optycznego itp. [4, 5]. Problematyka przedstawiona w publikacji ma charakter ogólny. Nie wyczerpuje zagadnienia i może stanowić ramy do tworzenia opracowań szczegółowych mających zastosowanie w nauce i W przemyśle. Jednak na podstawie przeprowadzonych rozważań teoretycznych oraz potwierdzających je badań laboratoryjnych można stwierdzić, że:

- 1. Zastosowana optyka nie ogranicza rozdzielczości systemu pomiarowego.
- Uzyskane wstępne wyniki badań spełniają założone kryteria i jednocześnie wskazują na potrzebę prowadzenia dalszych badań nad tą metodą.

# LITERATURA

- Białas S.: Specyfika geometrii wyrobów podstawą zapewnienia jakości na etapie projektowania. VI Sympozjum klubu POLSKIE FORUM ISO 9000 "Metrologia w systemach jakości – 3". Kielce, 16 ÷ 18 październik 2000.
- [2] Gazdecki A.: Analiza MSA (Measurement System Analysis) na przykładzie przemysłu motoryzacyjnego. VI Sympozjum klubu POLSKIE FORUM ISO 9000 "Metrologia w systemach jakości – 3". Kielce, 16 ÷ 18 październik 2000.
- [3] Nocuń M., Ratajczyk E.: Współrzędnościowa technika pomiarowa w systemach jakości produkcji. VI Sympozjum klubu POLSKIE FORUM ISO 9000 "Metrologia w systemach jakości – 3". Kielce, 16 ÷ 18 październik 2000.
- [4] Ratajczyk E.: Procedury pomiarów przestrzennych i ich oprogramowanie komputerowe. II Szkoła – Konferencja "Metrologia wspomagana komputerowo". T. 3. Zegrze k/Warszawy, 22 ÷ 25 maja 1995.

- [5] Ratajczyk E.: Tendencje rozwoju współrzędnościowej techniki pomiarowej. VII Szkoła – Konferencja "Metrologia wspomagana komputerowo". T. 1. Waplewo, 17 ÷ 20 maja 2005.
- [6] Wilk A., Łazarz B., Madej H.: Diagnostyka wibroakustyczna przekładni zębatych. V Krajowa Konferencja "Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów". Ustroń, 13 ÷ 17 października 2003.
- [7] Żebrowska Łucyk S.: Sprawdzanie dokładności uniwersalnych przyrządów do pomiaru odchyłek kształtu i położenia. VI Sympozjum klubu POLSKIE FORUM ISO 9000 "Metrologia w systemach jakości – 3". Kielce, 16 ÷ 18 październik 2000.



Dr inż. Piotr BASZUN jest wieloletnim nauczycielem akademickim Instytutu Systemów Elektronicznych WAT. Bierze aktywny udział w pracach badawczych Zakładu. Jest autorem lub współautorem kilkudziesięciu artykułów i referatów w czasopismach oraz na konferencjach krajowych i zagranicznych.

Dr inż. Henryk KRÓL jest absolwentem Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej oraz Akademii Obrony Narodowej. Jego zainteresowania zawodowe koncentrują się wokół metod oceny systemów, а obecnie w szczególności systemów informacyjno - pomiarowych.



Dr inż. Marek PISZCZEK ukończył studia Wydziale na Elektroniki w 1995. Od 2003 jest pracownikiem naukowo - dydaktycznym Wydziału Techniki Wojskowej WAT. Jego zainteresowania zawodowe koncentrują się wokół zagadnień zakresu Z inżynierii informacji obrazowej.

# WYZNACZANIE BEZKOLIZYJNYCH DRÓG PRZESYŁANIA DANYCH W SIECI TELEINFORMATYCZNEJ O STRUKTURZE TYPU HIPERSZEŚCIANU

#### Jan CHUDZIKIEWICZ, Krzysztof MURAWSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Cybernetyki, Instytut Teleinformatyki i Automatyki, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa; e-mail: <u>j.chudzikiewicz@iar.wat.waw.pl</u>, <u>k.murawski@ita.wat.edu.pl</u>

#### Streszczenie

W referacie zaprezentowano metodę oraz bazujący na tej metodzie algorytm wyznaczania bezkolizyjnych ścieżek przepływu danych w sieci o strukturze hipersześcianu. Sieci teleinformatyczne o strukturze logicznej hipersześcianu mają możliwość adaptowania (rekonfigurowania) struktury logicznej sieci, do zaistniałych awarii lub wymaganych warunków samodiagnozowania się sieci. Należą one do klasy systemów tolerujących. Przedstawiono również, bazując na systemie operacyjnym klasy Windows®, narzędzia i mechanizmy wbudowane w system, które ułatwią sposób implementacji opracowanego algorytmu.

Słowa kluczowe: hipersześcian, samodiagnozowanie, systemy tolerujące błędy.

## DETERMINING A NON COLLISION DATA TRANSFER PATH IN HYPERCUBE TELECOMUNICATION NETWORK

#### Summary

In this paper author presents the method and the algorithm for determining a non collision data transfer path in hypercube computer network. The hypercube structures have properties of auto-reconfiguration of network structure depending on failures or on requiring conditions for auto-reconfiguration. Hypercube computer networks belong to the class of fault tolerant computer networks. More over, for Windows® operating systems, the tools and mechanism are presented which to makes implementation of the algorithm easier.

Keywords: hypercube, auto-diagnosis, faulty tolerance systems.

#### **1. WPROWADZENIE**

W systemach wielokomputerowych (wieloprocesorowych) zapewnienie odpowiedniej szybkości komunikacji, jest krytyczne z punktu widzenia efektywności ich działania. Nie mniej istotnym jest możliwość rekonfiguracji struktury takiego systemu do zaistniałych awarii tak, aby graf powstałą strukturę był spójny. opisujący Przykładem struktury spełniającej te wymagania, jest struktura hipersześcianu [9], [3]. Sieci strukturze n-wymiarowego logicznej 0 hipersześcianu należą do systemów klasy tolerujących błędy i charakteryzują się dużą złożonością dla n > 3. Sposób identyfikacji zaistniałych awarii zależny jest od zastosowanej metody diagnozowania [9], [5], [4], [3].

Problem przesyłania danych w systemach o strukturze hipersześcianu jest szeroko analizowany w literaturze przedmiotu. Między innymi Gordon i Stout przedstawiają metodę nazwaną przez nich "sidetracking" [7]. Metoda ta zakłada, że każdy z węzłów przechowuje informacje o stanie niezawodnościowym swoich sąsiadów. Informacja jest przesyłana przez losowo wybraną ścieżkę, która sąsiaduje z węzłem

będącym w stanie zdatności. W przypadku, gdy nie ma ścieżek sąsiadujących ze zdatnymi węzłami, informacja jest blokowana i przesyłana jest z powrotem do węzła, z którego pierwotnie była wysłana. Wada tej metody jest małe prawdopodobieństwo przesłania informacji dla określonej liczby niezdatnych wezłów w systemie oraz duże opóźnienie czasowe. Inna metoda zaproponowana przez Chena nosi nazwę "backtracking" [1]. Metoda ta zakłada konieczność przechowywania w przesyłanych danych informacji o kolejnych węzłach, które pośredniczyły w jej przesyłaniu. W przypadku, gdy dane dotrą do wezła, który sasiaduje z wezłami niezdatnymi, informacja ta jest wykorzystywana do zwrotnego przesłania danych do węzła wcześniejszego. Wadą rozwiazania wprowadzanie tego jest do przesyłanych danych nadmiarowej informacji oraz duże opóźnienia czasowe.

W niniejszym referacie przedstawiono metodę przesyłania danych w systemie o strukturze hipersześcianu, bazującą na wyznaczeniu pokrycia grafu opisującego daną strukturę. Metoda zakłada, że każdy z węzłów przechowuje informacje o stanie niezawodnościowym całego systemu. Ponadto w artykule zaprezentowano opracowany na potrzeby implementacji algorytmu w systemie Windows® sterownik pakietowy oraz omówiono mechanizmy wbudowane w system, które mogą w znacznym stopniu ułatwić realizację postawionego zadania.

## 2. POJĘCIA PODSTAWOWE

Niech  $Z^n$  oznacza zbiór *n*-wymiarowych wektorów binarnych. Oznaczmy:

$$(s_1, \dots, s_n) = \{ z \in Z^n : ((s_i \neq x) \Longrightarrow \\ \Rightarrow (z_i = s_i)) \land ((s_i = x) \Longrightarrow$$

 $\Rightarrow$  ( $z_i \in \{0, 1\}$ ) ( $s_i \in \{0, 1, x\}, 1 \le i \le n$ ),

gdzie x oznacza wartość nieokreśloną (0 lub 1). Z(s)-zbiór podsześcianów 0-wymiarowych

(zbiór wektorów 
$$z = (z_1, ..., z_n), (z_i \in \{0, 1\},$$

 $1 \le i \le n$ ) podsześcianu  $s (s \in S^n)$ ).

<u>Określenie 1.</u> *n*-wymiarowym hipersześcianem binarnym nazywamy graf zwykły  $G'(G' = = \langle E, U' \rangle, |E| = 2^n, |U'| = n \cdot 2^{n-1})$  o  $2^n$  węzłach, z których każdy opisany jest odpowiednim wektorem binarnym z  $(z = (z_1, ..., z_n),$  $z_i \in \{0, 1\}, 1 \le i \le n, z \in Z^n, |Z^n| = 2^n)$  oraz o  $n \cdot 2^{n-1}$  krawędziach, łączących te węzły, których opisujące je wektory odległe są o 1 według miary

Hamminga. Strukturę *n*-wymiarowego hipersześcianu binarnego będziemy dalej oznaczać przez  $H^n$ , a graf częściowy tej struktury przez  $H^n_t$ . Indeks *t* oznacza liczbę krawędzi grafu struktury  $H^n_t$ .

Dalej węzły grafu  $H^n$  będą reprezentować komputery (procesory), a jego krawędzie - linie transmisji danych między tymi komputerami (procesorami), które są incydentne z określoną krawędzia.

<u>Określenie</u> 2. Łańcuchem  $\tau$  o długości k  $(0 \le k \le 2^n)$  w  $H^n$  nazywamy spójny podgraf grafu  $H^n$ , zawierający k + 1 węzłów, z których tylko dwa są stopnia pierwszego.

Węzeł stopnia pierwszego łańcucha nazywamy biegunem tego łańcucha.

Niech  $Z(\tau)$  oraz  $B(\tau)$   $(B(\tau) \subseteq Z(\tau))$ oznaczają odpowiednio zbiór węzłów oraz biegunów łańcucha  $\tau$ .

Łańcuch  $\tau$  będziemy przedstawiać zarówno w postaci podgrafu  $\langle Z(\tau) \rangle H^n$  jak i w postaci zbioru  $S(\tau)$  podsześcianów 1-wymiarowych s ( $s \in S_1^n$ ) takiego, że:

 $[s \in S(\tau)] \Leftrightarrow [\exists z', z'' \in Z(\tau) : z' + z'' = s].$ 

<u>Określenie 3.</u> Mówimy, że łańcuchy  $\tau'$  i  $\tau''$  w  $H^n$ są silnie wzajemnie niezależne, jeżeli  $Z(\tau') \cap Z(\tau'') = \emptyset$ .

Określenie 4. Mówimy, zbiór że  $P (P = \{\tau_1, \dots, \tau_p\}, 1 \le p \le 2^{n-1})$  silnie wzajemnie łańcuchów niezależnych  $\tau_1,\ldots,\tau_n$ , jest pokryciem  $H^n$ , jeżeli  $\{Z(\tau_i): 1 \le i \le p\} = Z^n$ . <u>Określenie 5.</u> Mówimy, że pokrycie  $P \ (P \in \mathbf{P}_n)$ pokryciem jest klasy  $\boldsymbol{K}(\lambda_1^{\delta_1},\ldots,\lambda_a^{\delta_a}) \quad (\boldsymbol{K}(\lambda_1^{\delta_1},\ldots,\lambda_a^{\delta_a}) \in \boldsymbol{K}_n)$ jeżeli spełnione są następujące warunki:  $(|S(\tau_i)| = \lambda_i) \wedge (\delta(b'(\tau_i), b''(\tau_i)) =$ 

$$= \delta_i, \ \tau_i \in P, \ b'(\tau_i), \ b''(\tau_i) \in B(P), \ \lambda_i \in \lambda,$$
$$i = \{1, \dots, |P|\}$$

gdzie:

 $K_n$  - zbiór klas hipersześcianu  $H^n$ ,

$$P_n$$
 - zbiór pokryć  $H^n$ ,

 $Λ^a(b)$  (2 ≤ a ≤ b) - zbiór addytywnych a-członowych podziałów  $λ = (λ_1,...,λ_a)$ 

 $(\lambda \in \mathbf{\Lambda}^{a}(b), \lambda_{i} > \mathbf{0}, \mathbf{1} \le i \le a, \lambda_{i} \ge \lambda_{i+1},$ 

$$1 \le j \le a - 1$$
) liczby wierzchołków   
*b* hipersześcianu  $H^n$ ,

Odległość Hamminga między dwoma wektorami binarnymi  $b'(\tau_i)$  i  $b''(\tau_i)$ , będącymi biegunami łańcucha  $\tau_i$ , spełnia zależność:

$$\delta(b'(\tau_i), \ b''(\tau_i)) = \sum_{k \in \{1, \dots, n\}} (b'(\tau_i)_k \oplus b''(\tau_i)_k),$$

gdzie:  $b(\tau_i)_k$  - k-ta składowa wektora binarnego  $b(\tau_i)$ ,

# $\oplus$ - suma modulo 2.

## 3. METODA WYZNACZANIA BEZKOLI-ZYJNYCH ŚCIEŻEK PRZEPŁYWU DANYCH W SYSTEMIE O STRUKTU-RZE HIPERSZEŚCIANU

Metoda wyznaczania bezkolizyjnych ścieżek polega na wyznaczeniu zbioru możliwych pokryć struktury H<sup>n</sup> silnie wzajemnie niezależnymi łańcuchami prostymi. Efektem końcowym działania metody jest wyznaczenie wszystkich ścieżek pomiędzy elementami, które w danym momencie zamierzają realizować wymianę danych tak, aby nawzajem nie zakłócały one transmisji. Dla zobrazowania działania rozpatrzmy metody przykład wyznaczenia ścieżek pomiędzy dwiema parami elementów w strukturze  $H^3$ . Postać jednego z możliwych pokryć dwoma łańcuchami struktury  $H^3$  pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Przykład pokrycia |P| = 2struktury  $H^3$ 

W przedstawionym przykładzie zostało wyznaczone pokrycie dwoma łańcuchami prostymi grafu struktury  $H^3$ , umożliwiające bezkolizyjną wymianę danych pomiędzy węzłami  $(b_1, b'_1)$ i  $(b_2, b'_2)$ , dla których  $\delta(b_1(\tau_1), b'_1(\tau_1)) = 2$ ,  $|S(\tau_1)| = 4$  $\delta(b_2(\tau_2), b'_2(\tau_2)) = 2,$ oraz  $|S(\tau_2)| = 2$ . Wyznaczone pokrycie należy do klasy  $K(4^2, 4^2)$ . Dla przykładowej struktury metoda pozwala na wyznaczenie wszystkich 9 możliwych klas pokryć:  $K(5^1, 1^1)$ ;  $K(5^3, 1^1)$ ;  $K(4^2, 4^2)$ ;  $K(3^1, 3^1)$ ;  $K(3^3, 3^3); K(3^1, 1^1, 1^1); K(3^2, 1^1, 1^1); K(2^2, 2^2, 1^1);$  $K(1^1, 1^1, 1^1, 1^1)$ .

# 4. ALGORYTM WYZNACZANIA BEZKO-LIZYJNYCH ŚCIEŻEK PRZEPŁYWU DANYCH W SYSTEMIE O STRUKTU-RZE HIPERSZEŚCIANU

Wyznaczenie klas pokryć jest zadaniem złożonym, szczególnie dla  $n \ge 4$ , dlatego też należy w tym celu wspomóc się komputerem. Poniżej przedstawiono algorytm wyznaczania pokryć.

Oznaczenia:

L(z', z'') - zbiór łańcuchów łączących węzły z' oraz z",

 $Z(\tau_j)$  - zbiór węzłów tworzących łańcuch  $\tau_j$ ,

**P** - aktualnie wyznaczane pokrycie.

Algorytm rozpoczynamy od i = 1, czyli pierwszego łańcucha pokrycia.

# Krok 1.

Wybierz jako biegun początkowy łańcucha  $\tau_i$  nie wybrany węzeł  $z' \in Z^n \setminus Z(\tau_j), \tau_j \in P,$  $j = \{1, ..., i-1\}, i > 1$  o najmniejszej etykiecie. Określ zbiór  $Z_i, (Z_i = \{z'' \in Z^n \setminus Z(\tau_j) \cup z':$   $(\delta(z', z'') = \delta_i)$ ,  $\tau_j \in P$ ,  $j = \{1, ..., i-1\}, i > 1$ 

biegunów końcowych łańcucha  $\tau_{_{i}}.$ 

<u>Krok 2.</u>

 $\begin{array}{ll} Wyznacz & zbi\acute{or} & L(z', z'') & (L(z', z'') = \\ = \{\tau : | S(\tau) | = \lambda_i \}, \ \forall \ z'' \in Z_i ) & la\acute{n}cuch\acute{o}w \\ lqczqcych & węzły & z' & oraz & z'' & tak, \ aby: \\ (\forall \ \tau_j \in P : Z(\tau_j) \cap Z(\tau) = \emptyset, j = \{1, \dots, i-1\}, \\ i > 2). \end{array}$ 

Krok 3.

Pobierz łańcuch  $\tau$  ze zbioru łańcuchów dostępnych L(z', z'') i dodaj go do pokrycia **P**.  $L(z', z'') = L(z', z'') \setminus \tau$ .

Jeżeli i = a, to przejdź do kroku 4 w przeciwnym przypadku i = i+1 i przejdź do kroku 1.

Krok 4.

Sprawdź czy nie wyznaczono wcześniej pokrycia odpowiadającego pokryciu **P**.

$$\boldsymbol{P} \in \boldsymbol{K}(\lambda_{1}^{\delta_{1}},...,\lambda_{a}^{\delta_{a}}) \Leftrightarrow \neg \exists \boldsymbol{P}' \in \boldsymbol{K}(\lambda_{1}^{\delta_{1}},...,\lambda_{a}^{\delta_{a}}):$$
$$(B(\tau_{l}) \neq B(\tau_{k})) \land (Z(\tau_{l}) \neq Z(\tau_{k})),$$
$$\tau_{l} \in \boldsymbol{P}', \ \tau_{k} \in \boldsymbol{P}, \ l,k = \{1,...,a\}.$$

Jeżeli nie wyznaczono wcześniej pokrycia odpowiadającego pokryciu  $\mathbf{P}$ , to dodaj  $\mathbf{P}$  do zbioru  $\mathbf{P}_n$ . W przeciwnym przypadku odrzuć  $\mathbf{P}$ . Przejdź do kroku 5.

Krok 5.

Czy  $L(z', z'') = \emptyset$ . Jeżeli nie to przejdź do kroku 3 w przeciwnym przypadku, gdy i > 1, i = i - 1 powtórz krok 5. Jeżeli i = 1 sprawdź czy węzeł, który nie był jeszcze biegunem ma etykietę mniejszą od  $2^n$ . Jeżeli TAK to przejdź do kroku 1. Jeżeli NIE to przejdź do kroku 6.

# <u>Krok 6.</u>

Koniec działania algorytmu.

#### 5. IMPLEMENTACJA W SYSTEMIE WINDOWS®

Sieć komputerowa o strukturze hipersześcianu jest zaliczana do sieci typu punkt-punkt (rys. 2), co powoduje, że komunikacja pomiędzy komputerami, których odległość Hamminga jest większa niż 1, wymaga pośrednictwa innych komputerów.

Rozwiązanie takie wymaga zastosowania komputerów wyposażonych w *n*-interfejsów sieciowych, gdzie *n* jest wymiarem struktury zapewnić możliwość hipersześcianu. Aby wykorzystaniem komunikacji wszystkich Ζ interfejsów, należało opracować odpowiedni sterownik i włączyć go w architekturę sieciową systemu Windows® (rys. 3).



Rys. 2. Rozwiązanie komunikacji w sieci komputerowej o strukturze hipersześcianu

Architektura systemu Windows zakłada wykorzystanie dwóch poziomów uprzywilejowania, jak przedstawiono to na rys. 3: trybu użytkownika oraz trybu jądra [6], [10].



Rys. 3. Architektura systemu Windows klasy NT

W trybie użytkownika uruchamiane są aplikacje użytkowe. W naszym przypadku jest to system diagnostyczny nadzorujący poprawność działania całej struktury.

Specyfikacja interfejsu sterowników sieci (ang. *NDIS - Network Driver Interface Specification*) jest zrealizowana w Windows® jako biblioteka, która definiuje interfejsy między sterownikami poszczególnych warstw, dzięki czemu oddziela sterowniki sprzętowe (niskiego poziomu) od sterowników wyższych warstw takich jak warstwa transportowa. NDIS przechowuje również

informacje na temat stanu i parametrów sterowników sieciowych w tym wskaźników do funkcji, uchwytów i innych wartości.

NDIS wyróżnia następujące typy sterowników (patrz rys. 4):

- sterownik miniportu (ang.Miniport driver);
- sterownik pośredni (ang. Intermediate driver);
- sterownik protokołu (ang. Protocol driver).



Rys. 4. Typy sterowników NDIS

Sterownik miniportu (sterownik karty sieciowej) ma dwie podstawowe funkcje:

- zarządzanie kartą sieciową w tym wysyłanie i odbieranie danych;
- współpraca ze sterownikami wyższego poziomu, takimi jak sterowniki pośrednie czy sterowniki protokołu.

Sterownik miniportu komunikuje się z kartą sieciową i sterownikami wyższego poziomu poprzez funkcje z biblioteki NDIS. Biblioteka ta eksportuje zbiór funkcji (funkcje NdisXXX), który zawiera wszystkie funkcje systemu operacyjnego, wymagane przez sterownik karty sieciowej. Niemniej istotnym jest to, że sterownik karty sieciowej powinien udostępniać oddzielny zbiór funkcji przeznaczony dla biblioteki NDIS (funkcje Miniport*Xxx*).

Współpraca sterownika miniportu z biblioteką NDIS i sterownikiem wyższego poziomu realizowana jest zgodnie z następującymi zasadami:

Wysłanie pakietu przez sterownik protokołu powoduje wywołanie funkcji NdisXXX wyeksportowanej przez bibliotekę NDIS. NDIS przekazuje otrzymany pakiet do sterownika miniportu wywołując odpowiednią funkcję MiniportXXX wyeksportowaną przez sterownik miniportu, miniportu. Sterownik bedacy ostatnim elementem na drodze przesyłania pakietu, przekazuje go do karty sieciowej. Operacia przekazania pakietu pomiedzy

sterownikiem miniportu a kartą sieciową, realizowana jest poprzez wywołanie odpowiedniej funkcji NdisXXX przez sterownik.

Odebranie przez kartę sieciową pakietu do niej powoduje zaadresowanego wysłanie komunikatu o tym zdarzeniu do sterownika miniportu. Sterownik miniportu korzystając z funkcji biblioteki NDIS wymusza przesłanie odebranego pakietu z karty sieciowej do pamięci podręcznej sterownika miniportu. Kolejną czynnością jest wywołanie przez sterownik miniportu odpowiedniej funkcji NdisXXX, dzięki której sterownik wyższego poziomu zostanie poinformowany o otrzymanym pakiecie.

Sterownik pośredni stosowany jest w hierarchii pomiędzy sterownikiem miniportu a sterownikiem protokołu, dlatego komunikować musi się z dwoma sterownikami:

- Od strony niższej warstwy sterownik pośredni świadczy usługi sterownika protokołu poprzez wyeksportowanie funkcji ProtocolXXX. Funkcje te używane są przez NDIS do komunikacji, gdy sterownik miniportu przesyła informacje w górę stosu protokołów. Dla sterownika miniportu sterownik pośredni wygląda jak sterownik protokołu.
- Od strony wyższej warstwy sterownik pośredni świadczy usługi sterownika miniportu poprzez wyeksportowanie funkcji MiniportXXX, których używają sterowniki protokołu do komunikowania się z kartą sieciową. Dla sterownika protokołu sterownik pośredni wygląda jak sterownik miniportu.

Pomimo tego, że sterownik pośredni eksportuje zestaw funkcji MiniportXXX dla wyższych sterowników stosu sieciowego, nie zarzadza on fizycznie kartą sieciową, tworzy zaś wirtualne karty sieciowe, do których może zostać przyłączony sterownik protokołu. Gdy sterownik protokołu wysyła pakiet do sterownika pośredniego ten przesyła sterownika go do miniportu. przeciwnym kierunku sterownik miniportu W przesyła dane otrzymane z karty sieciowej do sterownika pośredniego, który następnie przesyła je do sterownika protokołu.

Sterowniki pośrednie używane są do:

- Translacji pakietów pomiędzy różnymi rodzajami mediów transmisyjnych.
   Przykładowo sterownik pośredni pomiędzy warstwą transportową Ethernet a sterownikiem miniportu ATM, przetwarza pakiety Ethernet na pakiety ATM i odwrotnie.
- Filtrowania pakietów. Przykładem takiego wykorzystania jest harmonogram pakietów. Moduł ten sprawdza priorytet pakietu wysłanego w dół stosu przez sterownik protokołu, lub w górę przez sterownik miniportu i ustala kolejność przesyłania pakietów ze względu na wartość priorytetu.

 Balansowania transmisją pakietów między większą ilością kart sieciowych. Dla sterownika protokołu udostępnia on pojedynczy wirtualny adapter, jednak ruch sieciowy kieruje na kilka kart sieciowych zwiększając prędkość przesyłania danych.

Sterownik protokołu to najwyżej położony w stosie NDIS sterownik i jest zarazem najniżej usytuowanym komponentem z zaimplementowanym protokołem sieciowym. Przykładem takiego sterownika jest sterownik TCP/IP lub IPX/SPX. Sterownik protokołu alokuje dla pakietu odpowiedni obszar w pamięci, kopiuje dane z aplikacji do przygotowanego pakietu i poprzez wywołanie funkcji NDIS przesyła go do karty sieciowej. Tworzy również interfejs dla przychodzących z karty sieciowej danych i przesyła je do aplikacji.

# 6. PODSUMOWANIE

Przedstawiony w referacie algorytm, pozwala na wyznaczenie możliwych, bezkolizyjnych ścieżek przesyłania zarówno komunikatów diagnostycznych informujących o stanie niezawodnościowym systemu, jak również testów oraz przetwarzanych danych. Algorytm bazuje na strukturze diagnostycznej systemu i umożliwia wybranie ścieżki, która nie będzie uwzględniała innych elementów realizujących w danym momencie transmisji oraz tych, które znajdują się w stanie niezdatności. Przyjęte założenie można rozszerzyć o elementy realizujące w danym momencie proces przetwarzania danych, ale wymaga to przyjecia dodatkowych, nie uwzględnionych w aktualnej wersji algorytmu, założeń.

W chwili obecnej prowadzone są pracę nad budową sieci eksperymentalnej, wykorzystującej różne typy interfejsów sieciowych, między innymi połączenia kablowe (karty Ethernet, standard USB) oraz bezprzewodowe (Wi-Fi, Bluetooth). Wykonanie takiej sieci pozwoli na praktyczną weryfikację założeń teoretycznych opracowanego algorytmu oraz sprawdzenie możliwości jego adaptacji, jeżeli sieć podlegać będzie procesowi "*lagodnej degradacji*".

# LITERATURA

- [1] Chen M.-S., Shin K. G.: Depth-first search approach for faulttolerant routing in hypercube multicomputers, IEEE Transactions Parallel and Distributed Systems, vol. 1, no. 2, str. 152-159, Apr. 1990.
- [2] Chiu G. M., Wu S. P.: A Fault-Tolerant Routing Strategy in Hypercube Multicomputers, IEEE Transactions on Computers, vol. 45, no. 2, str 143-155, february 1996.
- [3] Chudzikiewicz J.: Sieci komputerowe o strukturze logicznej typu hipersześcianu; Instytut Automatyki i Robotyki, Wydziału Cybernetyki WAT, Warszawa 2002.
- [4] Chudzikiewicz J.: Metoda wyznaczania m-optymalnych struktur opiniowania diagnostycznego dla sieci komputerowych typu hipersześcianu, V Krajowa Konferencja Diagnostyka Urządzeń i Systemów, Ustroń 2003.
- [5] Chudzikiewicz J.: Wyznaczanie m-diagnozowalnych struktur typu PMC w systemach o zwiększonej odporności na uszkodzenia, X Konferencja Systemów Czasu Rzeczywistego, Ustroń 2003.
- [6] Dokumentacja: *Microsoft Windows 2003 Driver Development Kit*, Microsoft 2003.
- [7] Gordon J. M., Stout Q. F.: *Hypercube message routing in the presence of faults*, Proc. Third Conf. on Hypercube Concurrent Computers and Applications, vol. 1, str. 318-327, Jan. 1988.
- [8] Korzan B.: Elementy teorii grafów i sieci. Metody i zastosowania, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1978.
- [9] Kulesza R.: *Podstawy diagnostyki sieci logicznych i komputerowych*, Instytut Automatyki i Robotyki, Wydział Cybernetyki WAT, Wydanie II, Warszawa 2000.
- [10] Oney W.: Programming the Microsoft Windows Driver Model, wydanie drugie, Microsoft Press 2003.



Jan CHUDZIKIEWICZ ukończył studia w 1993 na Wydziale Cybernetyki Wojskowej Akademii Technicznej uzyskując tytuł mgr. inż. w specjalności systemy komputerowe. W roku 2001 na tymże samym wydziale obronił prace doktorska uzyskując

tytuł dr inż. w specjalności diagnozowanie sieci komputerowych. Przez cały okres swojej pracy zawodowej związany z Wojskową Akademią Techniczną. W latach 1994-1998 współpracował z Przemysłowym Instytutem Elektroniki w zakresie projektowania systemów diagnostycznych dla układów cyfrowych. Obecnie jego zainteresowania koncentrują się wokół metod diagnozowania systemów komputerowych, sieci komputerowych i systemów tolerujący błędy.



Krzysztof MURAWSKI ukończył w 1997 studia na Wydziale Cybernetyki Wojskowej Akademii Technicznej uzyskując tytuł W specjalności mgr inż. systemy komputerowe. W roku 2002 samym na tymże wydziale obronił prace doktorską uzyskując tytuł dr

inż. w specjalności inżynieria systemów. Przez cały okres swojej pracy zawodowej związany z Wojskową Akademią Techniczną. W latach 2000-2001 odbył staż naukowy w George Mason University. Obecnie jego zainteresowania skupiają się wokół budowy i projektowania systemów komputerowych.

# OCENA STANU TECHNICZNEGO EKSPLOATOWANYCH AKUMULATORÓW ROZRUCHOWYCH

Mieczysław PLICH

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, mplich@it.pw.edu.pl

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę oceny stanu technicznego eksploatowanych akumulatorów rozruchowych. Zilustrowano procedurę diagnozowania pod kątem uściślenia kryteriów dotyczących stanu częściowej zdatności wybranej grupy badanych obiektów. Podano przykład monitorowania przebiegu charakterystyk wyładowania akumulatorów zasiarczonych.

Słowa kluczowe: diagnostyka, akumulator.

# THE EVALUATION OF THE TECHNICAL STATE OF EXPLOITED MOTIONAL BATTERIES

#### Summary

In the article the method of estimation of the technical state of motional batteries has been presented. The procedure of diagnosis has been discussed with focus on précising the criteria concerning the state of partial usefulness of a selected group of examined objects. One has provided an example of monitoring of steps of characterising the exploitation of batteries.

Keywords: diagnostics, battery.

# 1. WSTĘP

Uszkodzenie akumulatora stanowiącego w pojeździe samochodowym źródło energii elektrycznej, może spowodować niezdatność całego pojazdu. Zatem zagadnienie oceny jego stanu technicznego w czasie eksploatacji ma bardzo istotne znaczenie.

Istnieje wiele metod badania i diagnozowania akumulatorów takich jak: ogląd zewnętrzny – badanie organoleptyczne, sprawdzenie gęstości elektrolitu (dotyczy tylko akumulatorów konwencjonalnych) oraz pomiar napięcia przed i po obciążeniu akumulatora. Stosowane są również pasywne testy z wykorzystaniem dynamicznej konduktancji a także badania laboratoryjne przeprowadzane na specjalistycznych stanowiskach pomiarowych u producentów oraz ośrodkach naukowo-badawczych.

W artykule tym przedstawiono opracowaną metodę kompleksowej oceny stanu technicznego samochodowych akumulatorów [3] gdzie wyznacza się ich zdolność rozruchową jak i pojemność na podstawie odwzorowania przebiegu charakterystyk wyładowania prądem stuminutowym. Opracowana przez autora metoda pozwala na znaczne skrócenie czasu badania, a także umożliwia stwierdzenie czy i w jakim stopniu wystąpiły czynniki destrukcji eksploatowanego akumulatora.

W diagnozowaniu akumulatorów rozruchowych (kwasowo-ołowiowych) istnieje odmienny sposób kontroli i oceny stanu technicznego nowych wyrobów na końcu linii produkcyjnej i podczas ich eksploatacji.

Parametrem diagnostycznym, służącym do oceny stanu technicznego wyprodukowanego nowego akumulatora, jest napięcie wyładowania mierzone przy jego obciążeniu prądem zbliżonym do rozruchowego, którego wartość jest porównywana z wartością progową napięcia określoną przez wymagania normalizacyjne dla danego typu akumulatora. Na podstawie tego badania diagnostycznego jest dokonana ocena jakościowa: zdatny lub niezdatny.

Dokładna ocena diagnostyczna wymaga badania akumulatorów w laboratoriach wyposażonych w specjalistyczną aparaturę pomiarową głównie producenta, zgodnie z procedurami u i wymaganiami sprecyzowanymi w normach [8] a mianowicie: międzynarodowej IEC-95: obowiązującą we wszystkich krajach EWG -EN-60095; krajowej - PN, EN-600 95-1; oraz warunkach technicznych producentów pojazdów np. C752525 (Batterie's D'automobiles 12Volts Peugeot-Citroen 1999).

Dwa znaczące parametry diagnostyczne określają stan techniczny badanego akumulatora a mianowicie: zdolność rozruchowa i pojemność.

Badania zdolności rozruchowej u producenta na zgodność z wymaganiami zarówno polskich, jak i zagranicznych norm [8] dokonywane są najczęściej po umieszczeniu akumulatora w komorze chłodzącej przy wyładowywaniu go prądem I<sub>s</sub> zbliżonym do rozruchowego o wartości natężenia podanej w wymaganiach normalizacyjnych lub obciążeniu go prądem rozruchowym  $I_{cc}$  o wartości ustalonej przez producenta w określonym czasie mierzonym w sekundach do osiągnięcia wyznaczonej wartości napięcia końcowego  $U_{f.}$ 

Kolejny parametr jakim jest pojemność akumulatora w praktyce diagnostycznej wyznaczamy, mierząc daną metodą badawczą czas przy wyładowaniu akumulatora prądem określonym w wymaganiach normalizacyjnych.

Tradycyjna metoda pomiaru pojemności akumulatorów związana jest z trybem wyładowania akumulatora tzw. prądem dwudziestogodzinnym. Metoda ta jest bardzo czasochłonna ale charakteryzuje ją duża dokładność.

Na początku lat dziewięćdziesiątych w związku wdrożeniem do produkcji akumulatorów bezobsługowych wprowadzono nowe procedury i ujednolicono metody badań akumulatorów oraz normalizacyjne. wymagania Już w latach siedemdziesiątych wprowadzono w USA pojęcie pojemności rezerwowej, która określa użyteczność eksploatacyjną wynikającą z czasu, w którym akumulator zdolny jest dostarczyć energię elektryczną do kontynuowania jazdy w przypadku awarii alternatora. Pojemność ta wyrażona w minutach [9] przedstawia czas wyładowania akumulatora stałym pradem 25A do wyznaczonej wartości napięcia końcowego wyładowania.

Wynik pomiaru pojemności akumulatora zależy od wartości natężenia prądu wyładowania w tym przypadku, nieekwipotencjalny rozkład pola elektrycznego wyznacza wartość napięcia końcowego wyładowania.

Badania, które realizowano w ramach tematów własnych prac naukowo- badawczych [2, 3] przeprowadzone kolejno na akumulatorach konwencjonalnych, a następnie bezobsługowych doprowadziły do:

- wyznaczania wartości czasu wyładowania w pełni naładowanego akumulatora, (przyjęto t=100min) oraz wartości natężenia prądu wyładowania stuminutowego 1100,
- wyznaczenia współczynnika kp, charakterystycznego dla tej metody
- określenia wartości napięcia końcowego wyładowania Uf dla prądu stuminutowego.

Opracowaną metodę przyspieszonego wyładowania badanych akumulatorów prądem stuminutowym zweryfikowano [2, 3] i wykorzystano w procedurze diagnozowania akumulatorów do oceny ich stanu technicznego.

W literaturze diagnostycznej [6] nastąpiło odejście od używania pojęcia sprawności i nie sprawności dla określenia stanu technicznego obiektu. Ponieważ podstawowym badanego kryterium funkcjonowania urządzeń i obiektów jest ich zdolność do działania zgodnie z przeznaczeniem ich zdatności. tzn. stad zaproponowano trzystanową kwalifikację oceny obiektu [6]:

- obiekt jest niezdatny i nie działa,

- obiekt jest częściowo zdatny i z tego powodu w pewnych warunkach eksploatacji działa niepoprawnie,
- obiekt jest zdatny a więc działa poprawnie.

Diagnozowanie eksploatowanych samochodowych akumulatorów rozruchowych wymagało udoskonalania metod i procedur badawczych pozwalających również na sprecyzowanie przyczyn powstałej destrukcji obiektu i jego uszkodzeń.

# 2. OCENA STANU TECHNICZNEGO EKSPLOATOWANYCH AKUMULATO-RÓW SAMOCHODOWYCH

Ocenę stanu technicznego diagnozowanych akumulatorów oparto na systemie eksperckim, dla którego sformułowano algorytm, utworzono bazę danych i podano kryteria oceny.

Wśród wielu zastosowań systemów eksperckich znaczące miejsce zajmuje wspomaganie decyzji w zakresie diagnostyki obiektów technicznych. System ekspercki to program komputerowy, który wykonuje założone zadania o znacznych wymaganiach intelektualnych w sposób zbliżony do rozumowania eksperta w danej dziedzinie [1].

Problem kompleksowej oceny eksploatowanego akumulatora jest na tyle trudny, że do jego rozstrzygnięcia wykorzystano wiedzę i procedury rozumowania eksperta, w rozpatrywanym obszarze zainteresowań [7].

Struktura opracowanego systemu eksperckiego zawiera następujące podstawowe elementy: bazę danych i wiedzy oraz procedury: wnioskowania, objaśniania i sterowania dialogiem (procedury wejścia) a także procedury umożliwiające rozszerzenie i modyfikację wiedzy (pozyskiwanie wiedzy).

W bazie danych tego systemu umieszczono:

- informacje o badanych akumulatorach rozruchowych (parametry dla poszczególnych typów i grup),
- dane pomiarowe akumulatorów nowych i eksploatowanych,
- krzywe wzorcowe wyładowania U<sub>wz</sub>=f(t) akumulatorów nowych i eksploatowanych z podziałem na typy i grupy,
- przedziały ufności dla krzywych wzorcowych (istotna dolna granica),
- parametry graniczne dla akumulatorów nowych i eksploatowanych,
- procedurę uwzględniającą temperaturę akumulatora,
- informacje dotyczące genezowania (np. zasiarczanienie, przeładowanie, wady technologiczne) i prognozowania,
- algorytmy diagnozowania wstępnego i zasadniczego.

Oprócz tego umieszczono informacje (wiedzę) uzyskaną w wyniku gromadzenia doświadczeń przez autora.

Realizację tego zadania poprzedzało wykonanie szeregu badań eksperymentalnych na opracowanym

stanowisku badawczym [3]. Uzyskany w ten sposób materiał empiryczny posłużył do weryfikacji przedstawianej metody.

W opracowanym systemie głównym czynnikiem wymuszenia w trakcie badania jest zadana stuminutowa wartość natężenia prądu I<sub>w</sub>=I<sub>100</sub> przy wyładowaniu akumulatora w sposób ciagly do wartości napięcia końcowego wyładowania Uf Mierzone biegunach na akumulatora napięcie wyznacza przebieg charakterystyki U=f(t), ilustrowany graficznie w postaci rzeczywistej krzywej wyładowania.

wyniku przeprowadzonych W badań empirycznych uzyskano zbiór krzywych opisujących proces wyładowania akumulatora jako zmianv jego napięcia w funkcii czasu W prezentowanej metodzie ujeto opis procedury wyładowania w postaci krzywej wzorcowej (metoda opiera się na algorytmie aproksymacji wielomianowej krzywych wzorcowych, dla których punkty wyznaczono o regresję empiryczną). Pozwala to na określenie "odległości" między badaną krzywą rzeczywistą a krzywą stanowiącą wzorzec.

Opracowano dwa programy komputerowe. Pierwszy z nich o nazwie AKUTEST pozwala na;

- założenie aktualizację i administrowanie bazą danych,
- prezentację graficzną w postaci danych pomiarowych i wykresów,
- analizę statystyczną danych,
- ocenę stanu badanego akumulatora.
- Drugi program o nazwie APROKSY dokonuje:
- obróbki danych poprzez wyznaczanie punktów (węzłów) wielomianu aproksymacyjnego i dopuszczalnych odchyleń,
- obliczenie współczynników wielomianów dla zadanego stopnia i badanie ich istotnej różnicy od zera przy wyznaczaniu krzywych wzorcowych danej grupy akumulatorów.

Kolejną wielkością, która określa parametry badania jest napięcie końcowe wyładowania  $U_f$  stanowiące wartość graniczną dla określonego procesu wyładowania akumulatora. Wartość napięcia końcowego wyładowania może być zawarta w przedziale 9,5 V  $\leq U_f \leq$  9,9 V i zależy przede wszystkim od prądu wyładowania wywołującego określony spadek napięcia na rezystancji wewnętrznej akumulatora [2, 8]. Pośrednio wartość napięcia U<sub>f</sub> zależy również od sposobu i jakości wykonanych połączeń płyt i ogniw w akumulatorze.

Schemat procedury diagnozowania badanego akumulatora przedstawiono na rys. 1.

Przeprowadzona metoda organoleptyczną diagnoza wstępna ma na celu wyeliminowanie akumulatorów uszkodzonych mechanicznie.

W przypadku uzyskania pozytywnego wyniku wstępnej diagnozy, akumulator poddaje się badaniu zasadniczemu wg opracowanego algorytmu.



Rys. 1. Algorytmy diagnozowania zasadniczego eksploatowanego akumulatora samochodowego

Proces badania akumulatora przebiega w ten sposób, że w pierwszym okresie dwuminutowym jest sprawdzana zdolność rozruchowa, a następnie do końca czasu wyładowania jego pojemność.

Odwzorowany przebieg rzeczywistej krzywej wyładowania U=f(t) (jej kształt) [3, 5] pozwala wnioskować czy i w jakim stopniu wystąpiły symptomy uszkodzenia badanego akumulatora. Osiągana w pierwszym okresie czasu wyładowania ekstremalna wartość napięcia wyładowania U<sub>MIN</sub> określa zdolność rozruchową badanego akumulatora. Jeżeli wartość U<sub>MIN</sub> nie przekracza wartości granicznych linii brzegowej krzywej napięcia Ub=f(t2min) wyznaczającą dolną granicę przedziału ufności, to akumulator uznaje się za Natomiast, wartość jest zdatny. gdy ta przekroczona to akumulator kwalifikuje się jako niezdatny ilustrację graficzną tej diagnozy przedstawiono na rys. 2a.



Rys. 2. Zakresy oceny diagnostycznej: a) zdolności rozruchowej, b) pojemności

Mierzony w trakcie trwania tego procesu pomiarowego czas t(min) do osiągnięcia zadanej wartości napięcia końcowego U<sub>f</sub> wyznacza wskaźnik pojemności badanego akumulatora wyrażony w procentach pojemności znamionowej  $C_n$ . Akumulator jest **zdatny**, gdy wskaźnik pojemności jest większy od 70% $C_n$ , jeżeli jest zawarty w granicach między 50% $C_n$  a 70% $C_n$ akumulator ocenia się jako **częściowo zdatny**. Gdy wskaźnik ten jest mniejszy od 50% $C_n$  przyjmuje się, że akumulator jest **niezdatny**. Zakresy tej oceny diagnostycznej ilustruje rys. 2b.

Ostateczna diagnoza akumulatora brzmi zdatny, jeżeli jest on zdatny zarówno ze względu na zdolność rozruchową, jak i pojemność. Stan częściowo zdatny charakterystyczny jest jedynie dla akumulatorów eksploatowanych i występuje w przypadku zdatności ze względu na zdolność rozruchową i częściowej zdatności ze względu na pojemność.

W praktyce akumulatory tak sklasyfikowane mogą być dopuszczone warunkowo do eksploatacji w okresie letnim (temperatury dodatnie), ponieważ obniżenie temperatury otoczenia ma istotny wpływ na zmniejszenie pojemności akumulatora.

#### 3. PRZYKŁADY MONITOROWANYCH CHARAKTERYSTYK AKUMULATORÓW

Poniżej podano ilustrację graficzną monitorowanych charakterystyk wyładowania eksploatowanych akumulatorów dla oceny ich zdolności rozruchowej i pojemności.

Na wykresach przedstawiono kolejno przebiegi krzywej wyładowania rzeczywistego na tle krzywej wzorcowej w zaznaczonym linią przerywaną przedziale ufności, dla **zdatnego** eksploatowanego akumulatora - rys. 3 i 4, oraz **częściowo zdatnego** (zasiarczanionego) akumulatora - rys. 5 i 6.



Rys. 3. Charakterystyka oceny zdolności rozruchowej zdatnego akumulatora



Rys. 4. Charakterystyka oceny pojemności zdatnego eksploatowanego akumulatora



Rys. 5. Charakterystyka oceny zdolności rozruchowej częściowo zdatnego akumulatora



Rys. 6. Charakterystyka oceny pojemności częściowo zdatnego akumulator

# 4. WNIOSKI

Nowa konstrukcja i technologia produkowanych obecnie samochodowych akumulatorów bezobsługowych w obudowach hermetycznych, spowodowała, że uległa zmniejszeniu ich podatność diagnostyczna z punktu widzenia dotychczas stosowanych metod oceny ich stanu technicznego.

Przedstawiony tu sposób diagnozowania samochodowych akumulatorów rozruchowych umożliwia:

- ocenę stanu technicznego zarówno nowowyprodukowanych akumulatorów jak i w trakcie ich eksploatacji,
- znaczące (wielokrotne) skrócenie czasu badania z zachowaniem wymaganej zgodności diagnozy w stosunku do stosowanych laboratoryjnych procedur badawczych,
- kompleksowość oceny pozwalającą na dokonanie w pojedynczym procesie badawczym oceny dwóch parametrów stanu technicznego: zdolności rozruchowej i pojemności.

Monitorowanie charakterystyk wyładowania U=f(t) akumulatorów eksploatowanych, pozwala dodatkowo na prognozowanie i wnioskowanie co do przyczyn powstałej destrukcji obiektu, co wykazały badania przeprowadzone na grupie akumulatorów zasiarczanionych.

# 5. LITERATURA

- [1] Mulawka J. J.: *Systemy ekspertowe*; WNT, Warszawa 1996.
- [2] Plich M.: Komputerowy system badania i diagnozowania akumulatorów rozruchowych. Praca naukowo-badawcza. Wydział Transportu Politechniki Warszawskiej 1994.
- [3] Plich M.: Metoda oceny stanu technicznego samochodowych akumulatorów rozruchowych. Rozprawa doktorska; Wydział Transportu Politechnika Warszawska 2001.
- [4] Plich M.: Metoda diagnozowania akumulatorów samochodowych. Konferencja nt. Diagnostyka Samochodowa 2002. Rydzyna 2002.
- [5] Plich M.: Wybrana metoda badania przyczyn i skutków uszkodzeń samochodowych akumulatorów rozruchowych. XXXIII Szkoła Niezawodności – Szczyrk 2005.
- [6] Smalko Z.: Podstawy eksploatacji pojazdów; Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998.
- [7] Wawrzyński W.: System ekspercki w procesie diagnozowania środków transportu. VI Konferencja Naukowa "Problemy Niezawodności Transportu". Informator ITWL 343/97, Warszawa 1997, str. 259-266.
- [8] Wymagania normalizacyjne IEC 95-1; EN 60095-1; PN-EN 60095-1; C572525/99.
- [9] Ziętkiewicz Z.: Akumulatory samochodowe *i motocyklowe*. WKiŁ, Warszawa 1993.



Dr inż. Mieczysław PLICH zatrudniony na stanowisku Adiunkta w Zakładzie Eksploatacji Systemów Trakcyjnych Wyposażeń Elektryi cznych w Transporcie w Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej zajmując głównie się tematyką związaną elektrycznego

z badaniem źródeł zasilania elek pojazdów opracował i wdrożył:

- komputerowe stanowisko do badania charakterystyk alternatorów w Laboratorium Zakładu Elektrotechniki Motoryzacyjnej ELMOT Świdnica,
- trzy wersje prototypowych urządzeń do ładowania i wyładowywania akumulatorów w Centralnym Laboratorium Akumulatorów i Ogniw – CLAIO Poznań,
- stanowisko laboratoryjne do badania źródeł zasilania elektrycznego pojazdów w Laboratorium Wydziału Transportu PW,
- nową generację obciążalnika bipolarnego źródła mocy przeznaczonego do współpracy z komputerem IBM,
- komputerowy system badania i diagnozowania akumulatorów w Laboratorium Elektrotechniki Samochodowej Wydziału Transportu PW.

# PRZEGLĄD DESKRYPTORÓW AKUSTYCZNYCH W DZIEDZINIE CZASU UMOŻLIWIAJĄCYCH OCENĘ WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

Barbara KUCHARSKA

Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Instytut Elektroenergetyki, ul. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole, e-mail: <u>kubar@po.opole.pl</u>

#### Streszczenie

W artykule scharakteryzowano podstawowe deskryptory emisji akustycznej w dziedzinie czasu. Przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów wybranych deskryptorów EA. Oceniono przydatność poszczególnych parametrów do opisu zjawiska wyładowań niezupełnych.

Słowa kluczowe: deskryptory, emisja akustyczna, wyładowania niezupełne.

# REVIEV OF ACOUSTIC DESCRIPTORS IN THE DOMAIN OF THE ALLOWING EVALUATION OF PARTIAL DISCHARGE

#### Summary

In the paper basic acoustic descriptors in the domain of time were characterized. Examples of the measurements of different descriptors were presented. Usefulness of particular parameters for the analysis of partial discharges was estimated.

Keywords: descriptors, acoustic emission, partial discharge.

#### 1. WSTĘP

Jedna z podstawowych przyczyn przyspieszonej degradacji izolacji urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia (np. transformatorów dużej mocy) są wyładowania niezupełne (WNZ) [5]. Ich ocenę umożliwiają trzy metody: elektryczna, chromatografii gazowej i emisji akustycznej (EA). Pierwsza z metod, ze względu na duży wpływ zakłóceń elektromagnetycznych nie może być podczas stosowana normalnej eksploatacji urzadzenia. Ζ kolei poważnym problemem w metodzie chromatografii gazowej jest możliwość zafałszowania wyników pomiarów podczas pobierania i transportu próbek oleju. Detekcję, pomiar i lokalizację wyładowań niezupełnych podczas normalnej pracy urządzenia umożliwia metoda emisji akustycznej [5, 6]. W porównaniu z pozostałymi metodami jest mało wrażliwa na zakłócenia a aparatura pomiarowa jest stosunkowo prosta i dostępna [5]. Techniczne zastosowanie metody EA datuje się od początku lat osiemdziesiatych. Obecnie jest ona szeroko stosowana w transformatorach, przekładnikach wysokiego napięcia, kondensatorach energetycznych oraz w rozdzielnicach z SF6. Dla transformatorów o mocach powyżej 250 MVA ocena wyładowań niezupełnych metodą EA jest obligatoryjna.

Prace prowadzone nad metodą EA skupiają się między innymi na doskonaleniu techniki pomiarowej oraz na doborze wskaźników (deskryptorów), które najpełniej charakteryzowałyby szkodliwość mierzonych WNZ [1, 2, 3].

W technice izolacyjnej przydatność różnych deskryptorów do oceny WNZ określa ich związek ze stopniem degradacji izolacji [5]. W wielu pracach dotyczących tej problematyki przyjmuje się, że wielkością najlepiej charakteryzującą mierzone jest największa amplituda zdarzenia WNZ akustycznego lub ciągu zdarzeń, która decyduje o szkodliwości wyładowań. Jednak takie podejście że traci powoduje, się wiele informacji przenoszonych przez sygnał akustyczny. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie innych wskaźników, możliwych do zastosowania w opisie impulsów emisji akustycznej pochodzacych od WNZ

# 2. DESKRYPTORY EMISJI AKUSTYCZNEJ

W pracy [4] wprowadzono rozróżnienie między sygnałem emisji akustycznej (EA) a impulsem EA. Przez sygnał EA rozumie się wielkość występująca w źródle emisji. Pod pojęciem impulsu emisji rozumie się wielkość rejestrowaną w punkcie odbioru. Związek między sygnałem a impulsem emisji jest określony przez funkcję przejścia. Tylko prostych układach fizycznych, w których W charakterystyki częstotliwościowe wszystkich elementów między źródłem EA a przetwornikiem są płaskie, sygnały i impulsy EA nie różnią się jakościowo. Wymaganie to spełnione jest rzadko, głównie ze względu na rezonansowe własności ośrodków. W dielektrykach i układach izolacyjnych, rozróżnienie między sygnałem EA w punkcie generacji WNZ, a impulsem w punkcie odbioru jest istotne, gdyż przestrzeń propagacji sygnałów charakteryzuje się własnościami rezonansowymi. Zjawisko komplikuje się tym bardziej, im bardziej złożony jest układ izolacyjny i geometria mierzonego obiektu [6].

Podstawowe wielkości charakteryzujące impuls EA można podzielić na dwie grupy:

- deskryptory w dziedzinie czasu,

- deskryptory w dziedzinie częstotliwości.

W niniejszej pracy przedstawione zostaną deskryptory z pierwszej grupy.

# 2.1. Deskryptory emisji akustycznej w dziedzinie czasu

W dziedzinie czasu podstawowymi deskryptorami impulsów EA są pochodne przebiegów czasowych (rys.1):

- amplituda maksymalna A<sub>max</sub>,

- czas narastania T<sub>1</sub>,
- czas trwania T<sub>2</sub>.

Inne znaczące parametry impulsu to pochodne energii:

- RMS amplitudy A<sub>rms</sub>,
- współczynnik szczytowy amplitudy W{x(t)}:

$$W\{x(t)\} = \frac{A_{max}}{A_{rms}}$$

- energia impulsu E:

$$\mathsf{E} = \int_{0}^{\mathsf{T}} \mathsf{x}^{2}(\mathsf{t}) \mathsf{d}\mathsf{t}$$
 (2)

(1)



Rys. 1. Przebieg impulsu EA w funkcji czasu i jego parametry. Próg dyskryminacji PD, amplituda maksymalna  $A_{max}$ , czas narastania  $T_1$ , czas trwania impulsu  $T_2$ 

Do grupy podstawowych deskryptorów EA należą również pochodne zmian w czasie:

- suma zliczeń amplitud EA, przekraczających przyjęty próg dyskryminacji impulsów (ΣΕΑ),
- tempo zliczeń amplitud EA, przekraczających przyjęty próg dyskryminacji impulsów, w jednostkowym czasie pomiaru (EA/Δt),
- suma zdarzeń akustycznych, przekraczających przyjęty próg dyskryminacji zdarzeń (ΣN),
- tempo zdarzeń akustycznych, przekraczających przyjęty próg dyskryminacji (N/Δt).

Na rys. 2 i 3 przedstawiono poglądowo sposób określania  $\Sigma EA$ ,  $EA/\Delta t$ ,  $\Sigma N$  i  $N/\Delta t$ .

Deskryptory przedstawione na rys. 2 i 3 zależą od przyjętego progu dyskryminacji Upd. Wartość progu dyskryminacji zależy od warunków metrologicznych, zakłóceń zewnętrznych i stosowanej aparatury pomiarowej.



Rys. 2. Poglądowe przedstawienie sposobu określania sumy i tempa zliczeń EA

Wielokrotne pomiary powyższych deskryptorów, dla rosnących progów dyskryminacji Upd, prowadzą do nowych parametrów, będących rozkładami amplitudowymi mierzonych wielkości. Można w ten sposób określić:

- rozkład amplitudowy sumy zliczeń:

$$\Delta (\sum EA) =$$

$$= \{f_i = \sum EA(U_{pdi}) - \sum EA(U_{pd}); i = 1, 2, ...n\}$$
(3)

- rozkład amplitudowy tempa zliczeń:

$$\Delta(EA/\Delta t) = \{f_i = EA/\Delta t (U_{pdi+1}) - EA/\Delta t (U_{pdi}); i - 1, 2, ...n\}$$
(4)

- rozkład amplitudowy sumy zdarzeń ΣN :

$$\Delta(\Sigma N) = \{f_i = \Sigma N(U_{pdi+1}) - \Sigma N(U_{pdi}); i = 1,2,...n\}$$
  
- rozkład amplitudowy tempa zdarzeń N/ $\Delta t$ : (5)

$$\Delta(\mathsf{N}/\Delta t) = \left\{ \mathsf{f}_{\mathsf{i}} = \mathsf{N}/\Delta t(\mathsf{U}_{\mathsf{pdi+1}}) - \mathsf{N}/\Delta t(\mathsf{U}_{\mathsf{pdi}}); \mathsf{i} = 1, 2, \dots n \right\}$$
(6)


określania sumy i tempa zdarzeń akustycznych

Scharakteryzowane powyżej deskryptory impulsów EA, zależnie od warunków pomiarowych i charakteru mierzonego zjawiska mogą być przedstawiane jako funkcje siły, ciśnienia, temperatury, napięcia elektrycznego lub innej wielkości fizycznej. Przez przetworzenie impulsów EA można uzyskać tak zwane "zaawansowane deskryptory EA" [4]. Zaawansowane deskryptory impulsów EA opisują albo własności charakterystyczne dla zastosowania EA, bądź opisują źródło EA. Pod względem zastosowania deskryptorów opisujących zagadnienie ilościowo, można zjawiska związane z zastosowaniem EA podzielić na następujące grupy :

- monitorowanie i testowanie urządzeń lub materiałów (badanie ma na celu porównanie bieżących danych pomiarowych z danymi przyjętymi za wzorcowe, przy czym konieczne jest przyjęcie wartości krytycznych określonego deskryptora),
- przewidywanie czasu życia materiałów i urządzeń (konieczna jest znajomość modelu niszczenia badanego materiału i odpowiedni dobór deskryptora),
- rozróżnianie źródeł EA (w przypadku występowania wielu źródeł EA, konieczne jest badanie kompleksowe kształtu impulsów tzw. "pattern recognition", umożliwiające identyfikację źródeł) [7].

# 3. PRZYKŁADOWE WYNIKI POMIARÓW DESKRYPTORÓW AKUSTYCZNYCH

## 3.1. Maksymalna amplituda sygnałów

Podstawowe znaczenie w pomiarach WNZ metodą EA ma maksymalna amplituda sygnału akustycznego pochodzącego od wyładowań. Wynika to z bezpośredniego związku tego deskryptora ze stanem fizycznym dielektryka oraz łatwości pomiaru. Jako maksymalną amplitudę sygnału EA przyjmuje się największą amplitudę pojedynczego impulsu (rys. 1) lub ciągu impulsów (rys. 5).



Rys. 4. Oscylogramy WNZ: a) sporadycznych, o dużych amplitudach i małej energii b) ciągłych, o małych amplitudach i dużej energii [5]

Znaczenie maksymalnej amplitudy polega na jej fizykalnej korelacji z zagrożeniem układu izolacyjnego w przypadku WNZ o dużej intensywności. W pracy [5] stwierdzono bezpośredni związek maksymalnej amplitudy z ładunkiem pozornym Qp wyładowań. Deskryptor A<sub>max</sub> nadaje się przede wszystkim do charakterystyki WNZ o dużych amplitudach.



Rys. 5. Sposób określania maksymalnej amplitudy ciągu impulsów od WNZ

#### 3.2. Tempo i suma zliczeń emisji akustycznej

Przykładowe przebiegi tempa zliczeń i sumy zliczeń amplitud EA obrazuje rys.6. Do generacji WNZ wykonano układ modelowy, w którym uzyskiwano wyładowania powierzchniowe. Impulsy EA emitowane przez wyładowania tego typu odbierano hydrofonem firmy Brüel-Kjear. Były one wzmacniane, a następnie przekazywane do analizatora Dema 100 i wizualizowane a następnie rejestrowane przy użyciu komputera.



Rys. 6. Tempo (a) i suma (b) zliczeń EA generowanych przez powierzchniowe WNZ, U=20 kV (71,4% Up)

Oba deskryptory są uzależnione od napięcia generacji WNZ. Wadą obu tych deskryptorów jest to, że nie są związane bezpośrednio ani z energią, ani z częstotliwością sygnału. Są natomiast silnie uzależnione od przyjętego progu dyskryminacji. Stąd wielkości te są przydatne przede wszystkim do opisu dynamiki zjawiska WNZ, bądź do oceny porównawczej wyładowań występujących w danym obiekcie.

#### 3.3. Tempo i suma zdarzeń emisji akustycznej

Do pomiarów tempa i sumy zdarzeń EA wykorzystano układ Dema 100. Pomiary przeprowadzono dla WNZ generowanych w pęcherzykach gazowych, przemieszczających się w oleju izolacyjnym. Przykładowe przebiegi deskryptorów przedstawiono na rys. 7. Podobnie jak tempo zliczeń amplitud, również te deskryptory WNZ. obrazują częstość występowania W mniejszym stopniu niż tempo i suma zliczeń EA zależą od przyjętego poziomu dyskryminacji. Na wartość tych deskryptorów duży wpływ ma napięcie generacji WNZ. Tempo i suma zdarzeń akustycznych wykazuja lepsza korelację z rzeczywistą czasu trwania zdarzenia akustycznego. W literaturze najczęściej przyjmuje się, że czas trwania pojedynczego zdarzenia akustycznego zwiazanego z WNZ wynosi 200÷1500µs.



Rys. 7. Tempo (a) i suma (b) zdarzeń EA generowanej przez WNZ występujące w pęcherzykach gazowych, U= 20kV (71,42 % Up)

## 3.4. Deskryptor Arms

Deskryptor A<sub>rms</sub> definiuje się jako pierwiastek ze średniej kwadratów chwilowej wartości sygnału elektrycznego przetworzonego przez przetwornik z sygnału akustycznego emitowanego przez wyładowanie niezupełne. Deskryptor ten opisuje następujący wzór

$$A_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}} \int_{0}^{T} u_{(t)}^{2} dt$$
(7)

gdzie:

u(t) - chwilowa wartość sygnału napięciowego, przetworzonego z sygnału akustycznego,

T – przedział całkowania.

Deskryptor A<sub>rms</sub> mierzono dla WNZ występujących na cząstkach o nieokreślonym potencjale. Wykorzystano w tym celu aparaturę Dema 100. Przykładowy przebieg tego deskryptora w funkcji czasu, przedstawiono na rys. 8.

Deskryptor A<sub>rms</sub> stanowi sumę energii sygnału elektrycznego, ma więc bezpośredni, jakościowy związek z EA mierzonych WNZ. Na wartość tego parametru nie ma wpływu poziom dyskryminacji. Zerowy poziom A<sub>rms</sub> wyznaczają szumy własne aparatury pomiarowej. Deskryptor jest natomiast uzależniony od przyjętego przedziału całkowania.



Rys. 8. Deskryptor A<sub>rms</sub> WNZ występujących na cząstkach o nieokreślonym potencjale, U=18kV (94,73%Up)

#### 3.5. Rozkład amplitudowy

Sygnały EA od WNZ można również scharakteryzować za pomocą rozkładu (widma) amplitudowego. Pod tym pojęciem rozumie się zależność miedzy częstotliwością występowania impulsów EA od WNZ, amplitudzie 0 przekraczającej wartość przyjętego progu dyskryminacji PD, a progiem dyskryminacji. Definicja ta odpowiada klasowaniu impulsów powyżej przyjętego poziomu. Rozróżnia się impulsy dodatnie i ujemne. Za impuls dodatni przyjmuje się impuls wywołany WNZ, w czasie którego elektrony kieruja sie od elektrody ujemnej w kierunku dielektryka stałego. Jeżeli elektrony przepływają od dielektryka stałego w kierunku elektrody dodatniej powstaja impulsy ujemne. Zdefiniowanie impulsów dodatnich i ujemnych pozwala na wyznaczenie rozkładów obu biegunowości. Ich pomiar umożliwia np. aparatura typu Dema.

Na kształt widma amplitudowego EA od WNZ zasadniczy wpływ ma napięcie generacji wyładowań. Wzrost napięcia powoduje wzrost częstotliwości występowania impulsów i wzrost ich amplitud. Duży wpływ ma również czas oddziaływania napięcia na dielektryk - wraz z wydłużeniem czasu oddziaływania napięcia może dojść, w pewnych warunkach, do samowygaszenia się wyładowań. Parametry rozkładu amplitudowego są również uzależnione od przestrzeni propagacji (a tym samym od tłumienia) impulsów EA. Celem określenia rozkładów amplitudowych EA od WNZ w izolacji papierowo-olejowej, wykonano odpowiednie pomiary, generując wyładowania powierzchniowe. Mierzono rozkłady dla dodatniej i ujemnej polaryzacji impulsów. Czas zliczania impulsów przyjmowano na poziomie 3, 10, 30, 60 i 1000 min. Pomiary przeprowadzano przy różnych napięciach generacji WNZ. Przykładowy rozkład amplitud impulsów dodatnich, przy napięciu generacji U=25kV, przedstawiono na rys. 9.

Rozkłady uzyskane dla różnych napięć generacji WNZ pokazano na rys. 10. Porównanie widm impulsów dodatnich i ujemnych uwidacznia rys. 11.



Rys. 9. Rozkłady amplitudowe EA od WNZ przeliczone z wartości 3, 10, 30, 60 i 1000 – minutowych na wartości jednominutowe, napięcie generacji U=25kV



Rys. 10. Rozkłady amplitudowe EA od WNZ impulsów dodatnich dla dwóch napięć generacji (21kV i 25kV)



Rys. 11. Rozkłady amplitudowe EA od WNZ impulsów dodatnich i ujemnych dla napięcia generacji 25kV

# 4. PODSUMOWANIE

Z przeglądu literatury na temat deskryptorów EA wynika, że do opisu impulsów EA mogą być stosowane podstawowe deskryptory w dziedzinie czasu oraz deskryptory zaawansowane.

doborze deskryptorów Przy ΕA dla charakterystyki procesu generacji WNZ należy brać pod uwagę ich sens fizyczny, przewidywany związek ze stopniem degradacji dielektryka i możliwości metrologiczne. Z tego punktu widzenia znaczenie wśród deskryptorów podstawowe w dziedzinie czasu mają : maksymalna amplituda, Arms, tempo zliczeń oraz tempo zdarzeń EA w dziedzinie czasu.

Badania nad deskryptorami w dziedzinie czasu skupiają się na zastosowaniu ich zarówno do lokalizacji, jak i do oceny szkodliwości WNZ. Deskryptor Arms ma ścisły związek z aktywnością akustyczną procesu generacji WNZ, a tym samym z energią i szkodliwością WNZ występujących transformatorze. Tempo w badanym EA charakteryzuje przede wszystkim chwilowe zmiany intensywności generowanych WNZ. Deskryptor ten dobrze nadaje się do charakterystyki stabilności i równomierności procesu generacji WNZ. Ocenę stabilności i równomierności występowania WNZ, przy ustalonym napięciu generacji WNZ, można przeprowadzić przez wizualizację deskryptora N/At. Deskryptor N/At podaje dokładniejsza informację o tych cechach procesu generacji WNZ, niż deskryptor  $EA/\Delta t$ . Miedzy tymi dwoma deskryptorami istnieje ścisłe podobieństwo i w niektórych warunkach moga być stosowane paralelnie. Wszystkie deskryptory EA uzyskuje się wskutek elektronicznego przetworzenia sygnałów czasowych napięcia odbieranych na wyjściu przetwornika. Ze względu na to, że między źródłem a przetwornikiem istnieje kanał akustyczny, mierzone deskryptory nie dają informacji o bezwzględnej wartości parametrów źródła. Stąd w obiektach rzeczywistych zasadnicze znaczenie mogą mieć pomiary porównawcze.

# LITERATURA

- [1] Gacek Z., Szadkowski M., Duda D., Witos F., Maźniewski K., Poszukiwanie kompleksowej metody pomiaru, identyfikacji i lokalizacji WNZ w wysokonapięciowych układach izolacyjnych, Przegląd Elektrotechniczny Konferencje, nr 9, 2004.
- [2] Liu Y., Chen L., Bin Q., "Partial Discharge (PD) Acoustic Wave Propagation in Power Transformers," EPRI, Ed. San Antonio, TX, 2001.
- [3] Okamoto T., Kato T., Yokomizu Y., Suzuoki Y., Tanaka T., "PD characteristics as a stochastic process and its integral equation under sinusoidal voltage," IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, vol. 8, pp.82-90, 2001.
- [4] Ranachowski J., Malecki I.: Emisja akustyczna. Źródła, metody, zastosowania, IPPT PAN, Warszawa 1994.
- [5] Skubis J. : Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych. IPPT PAN, Warszawa, 1993.
- [6] Skubis J.: Akustyczne techniki lokalizacji wyładowań niezupełnych. Transformatory w eksploatacji. Energetyka zeszyt VI. 04.2005. s.73-76.
- [7] Witos F., Urbańczyk M., Opilski A., Olech W., Groszko M.: O potrzebie stosowania metody "pattern recognition" do lokalizacji wnz. Konferencja Transformator - 95, Koszalin 1995.



Dr inż. **Barbara KUCHARSKA** jest pracownikiem Instytutu Elektroenergetyki, Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej

# PROGNOZOWANIE RESZTKOWEJ MIARY EKSPLOATACJI MŁYNA WENTYLATOROWEGO Z WYKORZYSTANIEM SIECI NEURONOWYCH

Maciej TABASZEWSKI

Politechnika Poznańska, Instytut Mechaniki Stosowanej Ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, <u>Maciej Tabaszewski@put.poznan.pl</u>

## Streszczenie

Praca zawiera opis metodologii prognozowania czasu resztkowego (czasu do awarii) dla młyna wentylatorowego MWk-16. Ze względu na krótki czas pracy młyna wentylatorowego pomiędzy naprawami (krótkie krzywe życia) oraz duży rozrzut długości tych krzywych, prognoza przewidywanego czasu do awarii w oparciu o zebrane dane stanowi bardzo istotną przesłankę do podejmowania decyzji eksploatacyjnych. W celu rozwiązania przedstawionego problemu w pracy rozpatrzono dwie koncepcje struktur sieci neuronowych.

Słowa kluczowe: prognozowanie czasu resztkowego, sieci neuronowe.

#### FORECASTING OF RESIDUAL TIME OF MILLING FANS BY MEANS OF NEURAL NETWORKS

#### Summary

The paper concerns methodology of forecasting of residual time (time to breakdown) of milling fan MWk-16. As the time between breakdowns of the fan is very short (short live curves) and variable, forecasting of life time based on collected data gives very important information which can be used in making decisions concerning machine operation. In order to solve the problem two structures of neural networks were considered.

Keywords: forecasting of residual time, neural networks.

# **1. WPROWADZENIE**

Młyny wentylatorowe urządzeniami są przemiałowymi samowentylujacymi, które bez oddzielnego wentylatora zasysają czynnik suszący i transportują mieszankę pyłowo-powietrzną do palników kotła energetycznego [1]. Rozdrobnienie oraz suszenie węgla prowadzone jest w celu właściwego spalania mieszanki zapewnienia pyłowo-powietrznej w kotle. Elementem roboczym młyna jest koło bijakowe, które zbudowane jest z dwóch tarcz, do których zamocowane są płyty rozbijające węgiel (bijaki). Jedna z tarcz osadzona jest na piaście wału, druga ma kształt pierścienia, dzięki czemu możliwe jest osiowe zasysanie medium. Koło bijakowe młyna wentylatorowego pełni zatem dodatkowo rolę koła wentylatorowego wytwarzającego jednocześnie podciśnienie i nadciśnienie. Dzięki takiemu rozwiązaniu podciśnienie powoduje zasysanie medium a nadciśnienie wydmuchiwanie suszącego, mieszanki pyłowo powietrznej przez palniki szczelinowe do paleniska. Do suszenia wegla stosowane jest gorace powietrze, spaliny lub mieszanina spalin i powietrza.

Podstawową przyczyną przerw w eksploatacji młynów wentylatorowych jest zużycie cierne elementów zespołu mielącego. W wyników procesu kruszenia i mielenia węgla następuje ścieranie elementów mielących. Stopniowemu ścieraniu ulegają zarówno płyty koła bijakowego jak i płyty opancerzenia korpusu (płyty progowe i obwodowe). Najintensywniej zużywają się płyty bijakowe. Wynika to z dużej prędkości obwodowej bijaka, dynamicznego charakteru oddziaływań płyty z węglem oraz podwyższonej temperatury panującej w komorze młyna - ok. 150 °C [1]. Czynnikiem poprawna niekorzystnie wpływającym na eksploatację młyna i ograniczającym trwałość pozostałych jego podzespołów jest nierównomierność zużywania się płyt bijakowych. Dochodzi niekiedy do dużych różnic w ubytku masy pomiędzy poszczególnymi płytami (na skutek ścierania jak i w wyniku pęknięć i wykruszania się fragmentów płyt). Asymetria rozkładu masy do prowadzi niewyrównoważenia wirnika. Konsekwencją niekorzystnych oddziaływań dynamicznych może być obniżenie trwałości węzłów łożyskowych. Niewyważenie może także powodować zmęczenie materiału całej struktury młyna w szczególności zaś wału, co w skrajnym przypadku może prowadzić do jego pekniecia.

W tablicy 1 zamieszczono zakresy trwałości elementów kruszących młynów wentylatorowych. Duże rozpiętości trwałości płyt w głównej mierze zależą od jakości węgla. Tablica 1. Zakresy trwałości elementów zespołu mielącego młynów wentylatorowych [2]

Element	trwałość	trwałość
	minimalna	maksymalna
	[h]	[h]
płyty	500	900
bijakowe		
płyty	700	1200
progowe		
płyty	2000	7000
obwodowe		

Ze względu na duży rozrzut trwałości płyt bijakowych (patrz tabela 1), oraz małe jej wartości (najczęstsza przyczyna postojów), prognoza czasu resztkowego do awarii staje się bardzo istotną przesłanką do podejmowania optymalnych decyzji eksploatacyjnych.

Drugim elementem ulegającym zużyciu choć w innym przedziale czasu eksploatacji są łożyska toczne układu łożyskowania wału koła bijakowego [1]. Trwałość łożysk szacowana jest na kilka tysięcy godzin. Zatem teoretycznie ich wymiana przypada na kilka cykli wymiany elementów zespołu mielącego. W rzeczywistości trwałość węzłów w dużej mierze zależy od oddziaływań dynamicznych związanych nie tylko z procesem mielenia. ale jak wczesnej wspomniano niewvważeniem koła bijakowego z oraz poprawnością osiowania wałów silnika i wirnika młyna.

Omawiany typ młyna stosowany jest w jednej z elektrociepłowni w Polsce. Zainstalowany tam system diagnostyczny obejmuje ciągłym dozorem wentylatorowych on-line sześć młynów diagnostyczny wspomnianego typu. System dokonuje rejestracji wartości skutecznej prędkości drgań w paśmie normowym 10-1000Hz oraz nastawionych przez obsługę wartości: pierwszego alarmu i wartości granicznej symptomu. Pomiary dotyczą trzech punktów rozmieszczonych w węzłach łożyskowych (dwa na młynie, radialnie (Ł1) i osiowo (Ł2A), jeden na silniku - Ł3). Dotychczasowa praca systemu pozwoliła na zbudowanie bazy danych zawierającej ok. 30 pełnych krzywych życia co stanowi podstawę do opracowania metody wyznaczania czasu resztkowego do awarii. Wspomniane krzywe życia dotycza tylko punktów pomiarowych zwiazanych z młynem (patrz rys. 1).

## 2. WYZNACZENIE RESZTKOWEJ MIARY EKSPLOATACJI W OPARCIU O SIECI NEURONOWE

Wczesne wykrywanie uszkodzeń może zapobiec zatrzymaniu pracy systemu, uszkodzeniu podzespołów, a nawet nagłej awarii pociągającej za sobą wysokie straty materialne [5]. Znajomość resztkowego czasu do awarii w momencie narastania uszkodzeń niewątpliwie może zostać wykorzystana do racjonalnego podejmowania decyzji dotyczących terminu niezbędnych prac obsługowych [6].



Rys. 1. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w węzłach łożyskowych młyna MWk 16 [4]

Metody bezpośredniego szacowania czasu resztkowego w oparciu modele niezawodności symptomowej zaproponował Cempel (patrz np. [3]). Proponowane modele niezawodności symptomowej zostały zbudowane na bazie procesora energii, który matematycznie opisywany jest funkcjami rosnącymi asymptotycznie, o gwałtownym narastaniu wartości symptomu w miarę zbliżania się do awarii. W obserwowanych trendach krzywych życia młynów wentylatorowych raczej nie udało się zaobserwować takich zachowań. Rejestrowane krzywe życia wykazują raczej charakter trendu wielomianowego, wykładniczego lub kwadratowowykładniczego (patrz [7]). Stąd zrezygnowano z zastosowania tej metody w tym przypadku.

W celu rozwiązania problemu prognozowania czasu resztkowego do awarii w oparciu o dane zbierane przez wspomniany system nadzoru młyna wentylatorowego można stosować podejście oparte o aproksymację danych pomiarowych składających się na krzywą życia za pomocą wybranego modelu matematycznego (np. modelu regresyjnego, wyrównywania wykładniczego, trendu pełzającego itp.) i jednostronną ekstrapolację w przyszłość poza przedział obserwacji. Jeżeli na podstawie przyjętego modelu nie można bezpośrednio oszacować czasu resztkowego, to można przynajmniej stwierdzić, czy zadanym horyzoncie prognozy wystapi w przekroczenie wartości granicznej czy nie. Można wiec odpowiedzieć na pytanie czy czas resztkowy jest mniejszy od zadanego horyzontu prognozy, a jeżeli jest, to iteracyjnie znaleźć jego wartość badając dla jakich wartości miary eksploatacji nastąpi przekroczenie wartości granicznej. Niestety takie podejście może wymagać zastosowania modeli adaptacyjnych prognozowania lub metod śledzenia błędów prognozy ze względu na fakt, że przyjęty początkowo model może stać się nieadekwatny w miare napływu nowych danych pomiarowych [8].

Kolejną możliwość zaproponowaną tutaj stanowi zastosowanie sieci neuronowych do procesu prognozowania czasu resztkowego. Możliwe są co najmniej dwa podejścia. Pierwsze z nich, podobnie jak poprzednio, opiera się na zasadzie aproksymacji dostępnego zbioru danych odpowiednim modelem sieci neuronowej, a następnie ekstrapolacji poza obszar obserwacji. Taka sieć z neuronami sigmoidalnymi w warstwie ukrytej oraz neuronem liniowym W warstwie wyjściowej, ma odwzorowywać wejście w postaci miary eksploatacji  $\Theta$  w wyjście w postaci obserwowanego symptomu. W ten sposób można sieć nauczyć aproksymować krzywą życia. Mając model w postaci wytrenowanej sieci można zasymulować wartości symptomu dla różnych wartości miar eksploatacji O. Wartości symptomu można z kolej porównać z jego wartościa graniczną. Tak więc w metodzie tej oszacowanie resztkowej miary eksploatacji  $\Delta \Theta_N$  na podstawie danych zgromadzonych do chwili  $\Theta_N$  odbywa się poprzez iteracyjne poszukiwanie wartości tej miary  $\Theta > \Theta_N$ , dla której następuje przekroczenie założonej wartości symptomu S<sub>1</sub> (patrz rys. 2).



Rys.2. Schemat zastosowanej sieci neuronowej i idea szacowania resztkowej miary eksploatacji na podstawie pomiarów zgromadzonych do chwili  $\Theta_N$ oraz przyjętej wartości granicznej S<sub>1</sub>(metoda 1)

Niestety sieć taką należy uczyć indywidualnie dla każdej krzywej choćby ze wzgledu na duży rozrzut trwania okresów od naprawy do naprawy (długości krzywych życia). Wykorzystanie sieci neuronowych ma tę zasadniczą zaletę, że w miarę napływu nowych danych pomiarowych sieć można "dotrenować" co przy odpowiedniej elastyczności sieci zapobiega w pewnym stopniu dezaktualizacji modelu prognostycznego [4]. Dotrenowanie jest tu rozumiane jako uruchomianie procesu trenowania z wartościami wag uzyskanymi z poprzedniego trenowania, a nie uzyskiwanymi np. w sposób losowy. Oczywiście stoi za tym założenie, że nowo napływające dane nie zmienią charakteru w sposób bardzo gwałtowny. Z badań autora w przypadku aproksymacji krzywych życia takie podejście sprawdza się (patrz np.[4]).

Innym podejściem jest zastosowanie sieci do bezpośredniego określania wartości czasu

resztkowego na podstawie kilku wartości symptomu zaobserwowanych ostatnio (rys. 3).



Rys. 3. Schemat sieci neuronowej pozwalającej na odtwarzanie resztkowej miary eksploatacji  $\Delta \Theta_N$ w zależności od wartości obserwowanego symptomu S w chwili  $\Theta_N$  i *n* poprzednich chwilach (metoda 2)

Liczba uwzględnionych wartości symptomu determinuje ilość neuronów w warstwie wejściowej i jest sprawą arbitralną. Ogólnie większa liczba wartości pozwala na eliminację wpływu chwilowych fluktuacji wartości symptomu, natomiast zbyt duża liczba tych wartości może powodować pogorszenie właściwości uogólniających sieci. Tutaj również zastosowano sieć z sigmoidalną warstwą ukrytą i wyjściem liniowym. Sieć uczono natomiast na życia podstawie kilkunastu krzywych oraz testowano zdolność uogólniania na podstawie nieprezentowanych danych. Prognoza sprowadza się do podania na wejście sieci najaktualniejszych wartości symptomu.

#### 3. ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW

Na rys. 4a przedstawiono przykładową krzywą życia młyna wentylatorowego dla punktu Ł1 wraz z naniesionymi wartościami pierwszego alarmu i wartością graniczną symptomu ( $V_{RMS} \approx 7mm/s$ ) ustalonymi przez obsługę. Widać zresztą, że moment wyłączenia obiektu został zignorowany lub też wartość graniczną ustalono na zbyt niskim poziomie. Nie ma to jednak żadnego znaczenia w przyjętej tutaj metodologii. Kolejne rys. 4b i 4c przedstawiają modele aproksymacyjne uzyskane za pomocą wspomnianej wcześniej sieci neuronowej (metoda 1) na tle dostępnych w danym momencie danych pomiarowych.



kys. 4. Przykładowa krzywa zycia (a) i wybrane aproksymacje (b,c) uzyskane za pomocą sieci neuronowej z rysunku 2 (metoda 1)

Wyraźny staje się tutaj problem z jakim spotkać się można wykorzystując tę metodę. W początkowej fazie (rys. 4b) nie sposób trafnie przewidzieć ostatecznego charakteru zachowania symptomu, co powoduje błędne prognozy czasu przekroczenia wartości granicznej symptomu. Widać to zresztą wyraźnie na rys. 5, który ukazuje błąd prognozy *ex-post* wartości miary eksploatacji odpowiadającej chwili przekroczenia wartości granicznej symptomu.



Rys. 5. Błąd prognozy dla krzywej życia z rys.4a uzyskany za pomocą sieci neuronowej (metoda 1)

Błąd ten zdefiniowano następująco:

$$\varepsilon = 100 \frac{\Theta'_g - \Theta_g}{\Theta_g} [\%], \qquad (1)$$

natomiast względną wartość miary eksploatacji, dla której buduje się prognozy (oś odciętych na rys. 5) jako:

$$\tau = 100 \frac{\Theta_g - \Theta_N}{\Theta_g} [\%], \qquad (2)$$

gdzie:  $\Theta_g$  – wartość miary eksploatacji dla której następuje przekroczenie wartości granicznej,  $\Theta'_g$  – oszacowanie tej miary uzyskane za pomocą sieci,  $\Theta_N$  – wartość miary eksploatacji w chwili sporządzania prognozy.

Na rys. 5 widać, że prognozy stają się sensowne dopiero od pewnej chwili gdy następuje faza przyspieszonego zużycia i wartość symptomu zaczyna wyraźnie rosnąć. Dla prezentowanego przykładu zaczyna się to od ok. ostatnich 12% długości krzywej życia. Od tego momentu prognoza jest dość precyzyjna i dla wartości mniejszych niż wspomniane 12% błąd prognozy wartości  $\Theta_g$  nie przekracza 3%. Wartość stała błędu na poziomie 120% widoczna na rys. 5 przed tym momentem wynika z przyjętego algorytmu i założenia pewnego ograniczenia wartości szacowanego czasu  $\Theta_g$ . Wskazuje ona ogólnie na zupełnie chybione prognozy.

Formalnie, prognozowaną wartość resztkowej miary eksploatacji formułowaną w chwili  $\Theta_N$  wyznaczyć można na podstawie prostego przeliczenia:

$$\Delta \Theta'_N = \Theta'_g - \Theta_N, \qquad (3)$$

gdzie:  $\Theta'_g$  – prognozowana wartość miary eksploatacji dla, której stwierdzono przekroczenie wartości granicznej symptomu, oraz  $\Theta_N$  wartość miary eksploatacji, dla której formułuje się prognozę.

Należy zaznaczyć, że istotny wpływ ma tutaj założony, dopuszczalny błąd uczenia sieci. Ogólnie lepiej dopasowany model pozwala na uzyskanie mniejszych błędów oszacowania czasu do awarii. Należy także rozsądnie dobierać liczbę neuronów w warstwie ukrytej sieci. Zbyt duża liczba neuronów spowoduje zanik zdolności uogólniania i zbyt dosłowne odwzorowanie chwilowych fluktuacji symptomu, a to bardzo mocno odbija się na jakości prognozy czasu resztkowego omawianą metodą.

Przykładowe wyniki uzyskane na podstawie danych przeznaczonych do testowania (nie prezentowanych sieci podczas uczenia) i dotyczące drugiej z omawianych metod zaprezentowano na rys. 6.



Rys .6. Błąd oszacowania czasu do osiągnięcia wartości granicznej symptomu uzyskany siecią z rys. 3 (metoda 2). Rysunek sporządzono z podobną rozpiętością skali co rys. 5 w celu możliwości ich porównania

Z rys. 6 wynika, że metoda ta daje wcześniej, niż poprzednio omawiana, sensowne oszacowania czasu  $\Theta_g$ . Niestety nawet w przedziale 5% czasu przed  $\Theta_g$  zdarzają się prognozy z błędami większymi niż 5%, a więc takie które można uważać za bezużyteczne. To że prognozy takie są bezużyteczne wynika z faktu, że w tych przypadkach czas pozostały do awarii jest krótszy niż ten wynikający z prognozy. Dodatkowo w odróżnieniu od metody 1, prognoza nie dostarcza w miarę stałego oszacowania  $\Theta_g$  w miarę zbliżania się do awarii. Przyczyną może być problem zbioru trenującego zawierający dość różniące się pod względem dynamiki wzrostu symptomu i długości krzywe życia.

Ostatecznie więc nasuwa się pewne rozwiązanie będące kombinacją obu metod. Początkowo należałoby wykorzystywać obie metody równolegle i póki metoda pierwsza nie powala na oszacowanie czasu  $\Theta_g$  (czyli nie ma jeszcze przyspieszonej fazy narastania symptomu) można w przybliżeniu szacować ten czas metodą drugą. W momencie pojawienia się stabilnych oszacowań  $\Theta_g$  uzyskanych pierwszą metodą można zacząć opierać się na nich.

# 4. PODSUMOWANIE

Przedstawione metody wyznaczania resztkowej wartości miary eksploatacji uzupełniają się wzajemnie i pozwalają na planowanie odpowiednich napraw młynów wentylatorowych, co ma istotne znaczenie praktyczne. Z dotychczasowych badań można wywnioskować, że w granicach ok. 10% czasu do wystąpienia przekroczenia wartości granicznej można osiągnąć błędy oszacowania tego czasu mniejsze niż 5%, co w przypadku braku dodatkowych założeń uważa się za prognozę dobrej jakości. Dodatkowo, co jest niezmiernie ważne, oszacowania czasu resztkowego stają się stabilne co do wartości. W wielu przypadkach osiągnieto dużo lepsze rezultaty. Dotyczy to szczególnie pierwszej z omawianych metod. Drugą należy potraktować jako uzupełnienie dla wypracowania wcześniejszej, bardziej przybliżonej prognozy. W przypadku metody drugiej istotny może się okazać dobór zbioru uczącego. Metoda ta bazuje na trenowaniu sieci w oparciu o cały zbiór krzywych życia. Należy więc zapewnić taki zbiór krzywych aby sieć zdobyła możliwości uogólniania. Z kolei pewną wadą metody pierwszej jest konieczność uczenia sieci indywidualnie dla każdej krzywej życia.

Należy zwrócić uwagę, że przedstawione metody nie zawsze da się zastosować dla innego typu obiektów i wnioski nie mają charakteru ogólnego. Młyny wentylatorowe są obiektami nie podlegającymi zmianom parametrów roboczych podczas pracy. Dodatkowo, w zasadzie, podlegają jednemu typowi zużycia, które uwidacznia się w rejestrowanym symptomie (praktycznie we wszystkich krzywych życia symptom nie zawiera informacji o innych). Symptom ten charakteryzuje się ponadto w miarę monotonicznym wzrostem związanym z narastaniem niewyrównoważenia. Ogólnie jest to sytuacja nieczęsto spotykana w praktyce. Stąd przedstawiona analiza może być ograniczona jedynie do omawianych obiektów.

# LITERATURA

- 1. Paczkowski Z.: Diagnostyczne badania identyfikacyjne młyna wentylatorowego MWk-16, Praca Magisterska Politechnika Poznańska, WBMiZ - Poznań 1999.
- 2.Kilarski J., Jura. S., Studnicki A., Suchoń J., Możliwość zwiększenia trwałości elementów mielących w młynach MWK, Zeszyty naukowe Politechniki Opolskiej, Politechnika Opolska, Opole 1998.
- Cempel C., Natke H. G, Yao J. P. T.: Symptom -Based Reliability for Critical Operating Systems, Intern, Workshop on Damage Assessment, Pescara - Italy, May 1995.
- 4. Tabaszewski M. i inni: Metodologia prognozowania dla potrzeb automatycznych systemów diagnostycznych w przemyśle, sprawozdanie z projektu badawczego 5T07 B03924, Politechnika Poznańska, Instytut Mechaniki Stosowanej, 2006
- Korbicz J. i inni: Diagnostyka procesów, Modele sztucznej inteligencji, Zastosowania, WNT, Warszawa 2002, rozdz. 9.
- Zółtowski B.: *Podstawy diagnostyki maszyn,* Wydawnictwo Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1996, rozdz. 10.3
- Cempel C.: Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn, WNT, Warszawa, 1982, 50-56, rozdz. 4.5.
- Tabaszewski M.: Metody doboru modeli prognostycznych w automatycznych systemach diagnostycznych, Diagnostyka, PTDT Warszawa 2004, vol. 30/2 125-128.



Dr Maciej inż. TABASZEWSKI jest adiunktem w Instytucie Stosowanej Mechaniki Politechniki Poznańskiej. Jego zainteresowania dotyczą metod prognozowania stanu maszyn w tym także wykorzystania metod sztucznej inteligencji w procesie modelowania miar sygnałów

diagnostycznych, pomiarów wielkości mechanicznych, programowania obiektowego dla potrzeb narzędzi cyfrowej analizy sygnałów.

# POMIARY ENERGII PROMIENIOWANIA SKRAJNEGO NADFIOLETU

Janusz MIKOŁAJCZYK, Zbigniew BIELECKI Instytut Optoelektroniki, Wojskowa Akademia Techniczna ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, fax.+48 22 666 89 50, <u>jmikolajczyk@wat.edu.pl</u>

#### Streszczenie

W pracy omówiono system detekcji promieniowania skrajnego nadfioletu. Umożliwia on pomiar energii impulsów promieniowania w zakresie długości fal  $(13,5 \pm 0,5)$  nm. Przeprowadzone analizy i badania miały na celu określenie możliwości odniesienia wyników uzyskanych w tym zakresie długości fal do pasma  $(13,5 \pm 0,13)$  nm. W pracy zaprezentowano wyniki pomiaru widma promieniowania emitowanego ze źródła laserowo-plazmowego z ksenonową tarczą gazową dla różnych warunków wytwarzania plazmy. Na podstawie rezultatów otrzymanych za pomocą wzorcowego przyrządu E-Mon wyznaczono wartość tzw. skalibrowanej czułości widmowej systemu, która umożliwia odniesienie wyników pomiarów do pasma  $(13,5 \pm 0,13)$  nm.

Słowa kluczowe: optoelektronika, detekcja sygnałów optycznych, pomiary energii, promieniowanie EUV, nanolitografia.

#### ENERGY MEASUREMENT OF EXTREME ULTRAVIOLET RADIATION

#### Summary

The paper presents the IOE detection system for energy measurement of EUV radiation. The system measures energy of radiation pulses within the wavelength range of  $(13,5 \pm 0,5)$  nm. The described analyses and experiments determine possibilities of reference of results obtained from the system to the spectral range of  $(13,5 \pm 0,13)$  nm. The changes of radiation spectrum emitted from a laser-plasma source with xenon gas-puff target are presented. The results obtained from the standard E-Mon meter make it possible to determine a calibrated sensitivity of the IOE detection system within the wavelength range of  $(13,5 \pm 0,13)$  nm.

Keywords: optoelectronics, detection of optical signals, energy measurement, EUV radiation, nanolithography.

# 1. WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój mikroelektroniki jest istotnym czynnikiem wpływającym na opracowanie nowych systemów litograficznych. Wymiary struktur półprzewodnikowych wytwarzanych w tej technice zależą w głównej mierze od długości fali promieniowania optycznego oraz właściwości zastosowanych układów optycznych [1]. Obecnie prowadzone sa badania nad rozwojem systemów litograficznych z zastosowaniem promieniowania o długości fali 13,5 nm. W celu uzyskania dużej rozdzielczości tych systemów minimalizuje się szerokość widmową tego promieniowania. Normą światowa stał się zakres długości fal określony przedziałem  $(13,5 \pm 0,13)$  nm.

Istotnym zagadnieniem jest rozwój układów diagnostycznych umożliwiających pomiar energii promieniowania w tym zakresie długości fal. W praktyce, tak wąskie pasmo widmowe mierzonego promieniowania, wymaga zastosowania bardzo czułych układów detekcji lub układów stosujących tzw. współczynniki kalibracji.

Do pomiaru energii promieniowania z zakresu EUV są stosowane systemy pomiarowe zbudowane w oparciu o kamery CCD z siatkami dyfrakcyjnymi, detektory półprzewodnikowe z filtrami promieniowania z zakresu EUV oraz komercyjne przyrządy detekcyjne.

W przypadku zastosowania kamer CCD wyznaczenie energii promieniowania jest możliwe na podstawie znajomości liczby zliczeń jej matrycy, uwzględnieniu charakterystyki czułości widmowej kamery, zdolności rozdzielczej siatki oraz jej współczynnika odbicia lub transmisji [2]. System ten jest drogi oraz nie pozwala na pracę z dużą częstotliwością. Umożliwia natomiast obserwację rozkładu widmowego promieniowania w pewnym zakresie długości fal.

Zastosowanie detektorów półprzewodnikowych, zwłaszcza fotodiod. znacznie upraszcza а procedurę wyznaczenia wartości mierzonej energii [3]. Najczęściej sygnał wyjściowy z tych fotodiod obserwuje się na ekranie oscyloskopu. Energię promieniowania wyznacza się na podstawie znajomości wartości ładunku generowanego w detektorze, charakterystyki czułości widmowej detektora oraz współczynnika transmisji zastosowanego układu optycznego.

Obecnie na świecie istnieje również nieliczna grupa specjalizowanych przyrządów służących do pomiaru energii promieniowania EUV. Stosowane są w nich najczęściej detektory półprzewodnikowe. Parametry przykładowych przyrządów przedstawiono w tabeli 1 [4, 5].

Tab. 1. Param	etry przykła	dowych	przyrząd	ów
stosowanych do	pomiaru ene	rgii pron	nieniowa	nia

Producent	Fly-Circuit 2 Holandia	E-Mon Niemcy
Rodzaj detektora	fotodioda SXUV 100	fotodioda AXUV100
Rodzaj układu optycznego	zwierciadło wklęsłe lub płaskie	dwa zwierciadła płaskie
Szerokość pasma widmowego BW	2,5%	3,3%
Dokładność pomiaru energii	6%	<10%

Przy ich konstruowaniu kierowano się głównie dokładnością pomiaru energii w określonym zakresie długości fal. Pomiary energii przeprowadzone przy użyciu tych przyrządów wymagają dodatkowej analizy widma detektowanego promieniowania przy uwzględnieniu parametrów ich stopni wejściowych.

#### 2. SYSTEM DETEKCJI IOE

Analizując dostępne na rynku układy detekcyjne można zauważyć, że brak jest zintegrowanych systemów współpracujących ze źródłem promieniowania EUV. Oprócz tego konstrukcja tych układów jest rozbudowana i wymaga odpowiednich warunków użytkowych. Większość z nich nie jest również wyposażona w elementy służące do automatyzacji pomiarów.

Celem pracy było skonstruowanie systemu detekcji, który spełniłby powyższe wymagania.

System detekcji IOE składa się ze zwierciadła wielowarstwowego, detektora oraz układu przetwarzania sygnałów [6].

Budowę systemu przedstawiono na rys. 1. W skład układu optycznego wchodzi filtr absorpcyjny oraz zwierciadło wielowarstwowe umieszczone w specjalnej konstrukcji mechanicznej. Promieniowanie EUV po przejściu przez układ optyczny jest następnie przetwarzane w detektorze na sygnał elektryczny. W opracowanym systemie detekcji zastosowano skalibrowaną fotodiodę krzemową serii AXUV firmy International Radiation Detectors Inc. Sygnał wyjściowy z detektora podano na wejście przedwzmacniacza ładunkowego. Amplituda sygnału wyjściowego przedwzmacniacza jest proporcjonalna do ładunku generowanego w fotodiodzie. Układ przetwarzania sygnału służy do przekształcania sygnału analogowego na postać cyfrową. Wynik pomiaru jest zobrazowany na wyświetlaczu. Układ ten ma również możliwość wysyłania danych pomiarowych do komputera za pomocą interfejsu RS 232C.



Rys. 1. Konstrukcja systemu detekcji IOE

Przy wyznaczeniu wartości energii istotne jest określenie pasma widmowego mierzonego promieniowania. Wpływ pasma widmowego zostaje uwzględniony przy określeniu charakterystyki czułości widmowej układu detekcji. Czułość ta jest jednym z najistotniejszych parametrów uwzględnianych przy bezwzględnych pomiarach energii promieniowania. Jest ona wyrażona jako

$$S(\lambda) = \frac{I_{ph}}{P_{ph}(\lambda)}, \qquad (1)$$

gdzie  $I_{ph}$  jest sygnałem prądowym wytworzonym w detektorze pod wpływem padającego na jego powierzchnię promieniowania o mocy  $P_{ph}$ .

Czułość widmowa systemu detekcji IOE jest określona przez charakterystykę współczynnika odbicia zwierciadła oraz czułość widmową zastosowanego detektora.

Na rys. 2 przedstawiono wypadkową charakterystykę czułości widmowej systemu detekcji ozn. jako *S*<sub>*IOE*</sub>.



Rys. 2. Charakterystyka czułości widmowej systemu detekcji IOE (S<sub>IOE</sub>)

Wynika z niej, że system mierzy promieniowanie w zakresie długości fal  $(13,5 \pm 0,5)$  nm.

# 3. SKALIBROWANA CZUŁOŚĆ WIDMOWA

Dokładne badania i analiza widma promieniowania generowanego w źródle laserowoplazmowym z tarczą gazową oraz parametrów systemu detekcji dają możliwość odniesienia wyników pomiarów energii wykonanych w paśmie  $(13,5 \pm 0,5)$  nm do pasma  $(13,5 \pm 0,13)$  nm.

Zakładając izotropowość promieniowania emitowanego ze źródła, ładunek generowany w detektorze określony jest jako

$$Q_{ph} = \Omega \int_{0}^{\infty} E(\lambda) S_{IOE}(\lambda) d\lambda$$
 (2)

gdzie  $\Omega$  jest kątem bryłowym mierzonego promieniowania.

Na tej podstawie, energię promieniowania EUV w zakresie  $(13,5\pm0,13)$  nm można obliczyć ze wzoru

$$E_{(13,5\pm0,13)\,\text{nm}} = \int_{(13,5\pm0,13)\,\text{nm}} E(\lambda)d\lambda =$$
$$= \frac{Q}{\Omega \int_{0}^{\infty} I(\lambda)S_{IOE}(\lambda)d\lambda}$$
(3)

gdzie  $I(\lambda)$  funkcja opisująca rozkład widmowy emitowanego promieniowania unormowany do jedności

$$\int I(\lambda) d\lambda = 1.$$
(4)  
(13,5±0,13)nm

Oznaczając skalibrowaną czułość widmową systemu detekcji IOE jako

$$S_{S_{IOE}} = \int_{0}^{\infty} I(\lambda) S_{IOE}(\lambda) d\lambda , \qquad (5)$$

energię w paśmie  $(13,5 \pm 0,13)$  nm można obliczyć ze wzoru

$$E_{2\%} = \frac{Q_{ph}}{\Omega \ k_{IOF}} \ . \tag{6}$$

Skalibrowana czułość widmowa systemu detekcji zależy od parametrów jego elementów składowych, jak również od rozkładu widma detekowanego promieniowania

Z doniesień literaturowych wynika, że rozkład widmowy emitowanego promieniowania może zależeć od parametrów związanych z punktem pracy źródła. Punkt pracy źródła laserowo-plazmowego z tarczą gazową definiuje warunki generacji plazmy w źródle. Warunki te mogą dotyczyć m.in. czasów opóźnienia otwarcia dysz zaworu z gazami względem impulsu laserowego, intensywności promieniowania lasera Nd:YAG, położenia ogniska laserowego względem osi tarczy gazowej, ciśnienia w komorze źródła, ciśnienia w pojemnikach gazowych z ksenonem i helem.

Emisja promieniowania EUV odbywa się w wyniku naświetlenia tarczy gazowej wysokoenergetycznym promieniowaniem laserowym, które wytwarza plazmę [7]. Natężenie promieniowania EUV docierającego do układu detekcji zależy od ww. warunków pracy źródła oraz położenia kątowego powierzchni detektora względem osi wiązki lasera Nd:YAG, odległości układu detekcyjnego od źródła i składu chemicznego tarczy gazowej. Zakres widmowy generowanego promieniowania zależy od składu chemicznego gazów zastosowanych w tarczy gazowej.

Na rys. 3 przedstawiono przykładową charakterystykę intensywności promieniowania EUV w źródle z ksenonową tarczą gazową w dwóch rozpatrywanych zakresach długości fali.



Rys. 3. Przykładowa charakterystyka intensywności prom. EUV

Do analiz widma zastosowano obrazy uzyskane ze spektrometru z siatką odbiciową 1200 linii/mm oraz kamery CCD firmy Roper [8]. Fotografię stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Fotografia stanowiska

Przykładowy obraz widma promieniowania EUV uzyskanego za pomocą spektrometru przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Obraz widma

Występuje duża zgodność charakterystyki eksperymentalnej z charakterystyką otrzymaną w wyniku pomiarów oraz podawaną w literaturze rys. 6 [9].



Rys. 6. Widmo promieniowania dla tarczy ksenonowej

Przeprowadzona analiza widma i pomiary energii umożliwiły porównanie wyników pomiarów otrzymanych za pomocą systemu detekcji IOE z wynikami uzyskanymi za pomocą wzorcowego przyrządu Emon. Istotnym elementem badań było wyznaczenie rozkładu energii promieniowania EUV w dwóch zakresach długości fal:  $(13,5 \pm 0,5)$  nm (ozn. *BW*<sub>7%</sub>) oraz (13,5±0,25) nm (ozn. *BW*<sub>3%</sub>). Pasma te są określone przez charakterystyki widmowe elementów optycznych stosowanych w przyrządzie Emon oraz systemie detekcji IOE.

Na rys. 7 przedstawiono charakterystyki współczynnika odbicia zwierciadeł wielowarstwowych zastosowanych w wyżej wymienionych układach detekcji.



Rys. 7. Charakterystyki widmowe współczynników odbicia zwierciadeł

Na podstawie skalibrowanej czułości widmowej przyrządu Emon oraz sygnałów zmierzonych za pomocą systemu detekcji IOE wyznaczono współczynnik kalibracji ozn.  $W_{IOE}$ . Współczynnik ten definiuje się jako

$$W_{IOE} = \frac{E_{(13,5\pm0,5)nm}}{E_{(13,5\pm0,25)nm}} , \qquad (7)$$

gdzie:  $E_{(13,5\pm0,5)nm}$  jest energią zmierzoną w paśmie (13,5±0,5) nm, natomiast  $E_{(13,5\pm0,25)nm}$  jest energią zmierzoną w paśmie (13,5±0,25) nm.

Współczynnik ten umożliwia jednocześnie wyznaczenie skalibrowanej czułości widmowej systemu detekcji dla pasma  $(13,5 \pm 0,13)$  nm

$$k_{IOE} = S_{Emon} \ W_{IOE} \ . \tag{8}$$

Badania zostały zweryfikowane za pomocą spektrometru poprzez pomiar widma promieniowania emitowanego ze źródła laserowoplazmowego. Ze względu na brak charakterystyki kalibracyjnej spektrometru, wyniki podawane są w wartościach względnych intensywności. Zostały one odniesione do liczby zliczeń poszczególnych pikseli matrycy CCD.

W badaniach z zastosowaniem spektrometru, stosunek energii  $W_{IOE}$  został wyznaczony przez całkowanie charakterystyk wypadkowych intensywności promieniowania, jakie uzyskano w wyniku wymnożenia kolejno charakterystyk układów optycznych przyrządu E-Mon oraz systemu detekcji IOE z charakterystyką widmową tarczy ksenonowej.

Przykładową charakterystykę wypadkową intensywności promieniowania uwzględniającą widmo emitowane z ksenonowej tarczy gazowej i charakterystyki zastosowanych układów optycznych przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Charakterystyki wypadkowe intensywności mierzonego promieniowania

# 4. SKALIBROWANA CZUŁOŚĆ WIDMOWA SYSTEMU DETEKCJI IOE

Badania widma promieniowania emitowanego ze źródła laserowo-plazmowego miały na celu wyznaczenie wartości współczynnika  $W_{IOE}$ , który wpływa na wartość skalibrowanej czułości widmowej systemu detekcji IOE. Wartość tego współczynnika zależy od warunków generacji plazmy tzn.:

- czasów opóźnienia otwarcia dysz zaworu względem impulsu laserowego (W<sub>i</sub>),
- intensywności promieniowania lasera  $Nd:YAG(W_E)$
- położenia ogniska promieniowania laserowego względem osi tarczy gazowej (W<sub>Y</sub>),
- ciśnienia w komorze źródła promieniowania (WP),

ciśnienia w pojemnikach gazowych z ksenonem i helem (W<sub>p</sub>).

W przedstawionej pracy przeanalizowane zostały przykładowo jedynie wyniki dotyczące wyznaczenia wpływu zmian ciśnienia w pojemniku z ksenonem na kształt widma promieniowania emitowanego ze źródła. Na rys. 9 przedstawiono kształty widma dla różnych wartości ww. ciśnienia.



Rys. 9. Wpływ zmian kształtu widma promieniowania EUV emitowanego ze źródła

Na podstawie otrzymanych charakterystyk wyznaczono stosunek intensywności promieniowania w dwóch pasmach widmowych tzn.  $BW_{7\%}$  oraz  $BW_{3\%}$ . Otrzymaną wartość stosunku intensywności porównano z wartością stosunku energii zmierzonej za pomocą przyrządu E-Mon oraz systemu detekcji IOE. Na rys. 10 przedstawiono charakterystyki obrazujące wpływ zmian ciśnienia w pojemniku z ksenonem na wartość intensywności, energii oraz wyznaczony ich stosunek.



Otrzymane przebiegi zmian wartości stosunku energii i intensywności pokrywają się w szerokim zakresie zmian ciśnienia w pojemniku z ksenonem dla pomiarów przy użyciu spektrometru oraz przyrządu E-Mon i systemu detekcji IOE. Wartość współczynnika kalibracji wyniosła 1,92±0,13. Można zatem przyjąć, że przy zmianach ciśnienia w pojemnikach z ksenonem, współczynnik kalibracji przyjmuje wartość stałą.

Podobne pomiary przeprowadzono w celu wyznaczenia wpływu zmian pozostałych warunków generacji plazmy na wartość współczynnika kalibracji.

Przeprowadzone badania wykazały, że wartość średnia stosunku zmierzonych energii za pomocą przyrządu E-Mon i systemu detekcji IOE wyniosła  $1,82 \pm 0.06$ .

Na rys. 11 przedstawiono zestawienie współczynników kalibracji  $W_X$  wyznaczonych w powyższych badaniach.



W przypadku optymalnego punktu pracy źródła uzyskania maksymalnej intensywności (tzn. emitowanego promieniowania w zakresie EUV) wartość współczynnika kalibracji wyniosła  $W_{IOE}(opt) = 1,79 \pm 0,03$ . Zmiana parametrów punktu pracy źródła i przyjęcie stałej wartości parametru spowodować  $W_{IOE}$ może powstanie błedu w określeniu energii promieniowania w paśmie BW = 2%, którego wartość wynieść może nawet 14 %.

Powyższe wyniki badań pokazały, że największe różnice wartości współczynników  $W_{IOE}$  otrzymanych ze spektrometru oraz z przyrządów pomiarowych istnieją przy zmianach położenia osi zaworu względem ogniska wiązki laserowej (12 %), ciśnienia ksenonu w komorze źródła (9,5 %) oraz czasu opóźnienia dyszy zaworu z ksenonem (8,8 %). Różnice dla pozostałych parametrów punku pracy źródła wynoszą maksymalnie 4 %.

Analizując odchylenie standardowe wartości poszczególnych współczynników  $W_X$  największe rozbieżności tego parametru otrzymano dla zmian ciśnienia ksenonu w komorze laserowej oraz energii lasera Nd:YAG. Dlatego w tych dwóch przypadkach sugerowane jest zastosowanie w systemie detekcji funkcji aproksymujących lub macierzy współczynników  $W_E$  lub  $W_{PXe}$ .

# 5. PODSUMOWANIE

Wartość skalibrowanej czułości widmowej systemu detekcji IOE ( $k_{IOE}$ ) wyniosła ( $0,291 \pm 0,024$ ) A/W.

Jednak w przypadku zmiany warunków pracy źródła należy odnieść się do odpowiednich współczynników  $W_X$  wyrażonych w postaci wartości średnich, funkcji liniowych lub odpowiednich macierzy.

Wartość skalibrowanej czułości widmowej  $k_{IOE}$  jest większa od wartości podawanej dla przyrządu E - Mon. Zastosowanie zwierciadła wielowarstwowego o większej połówkowej szerokości współczynnika odbicia spowodowało względne zwiększenie czułości układu. Jednak w tym przypadku konieczne jest także dokładniejsze uwzględnienie kształtu widma mierzonego sygnału.

Powyższe analizy stwarzaja możliwość rozszerzenia zdolności pomiarowych systemu detekcji IOE. Mogą się one odnosić do pomiaru energii emitowanej ze źródeł laserowo-plazmowych z zastosowaniem innych tarcz. Wymagałoby to przeprowadzenia podobnych procedur umożliwiających wyznaczenie skalibrowanej czułości widmowej dla rozpatrywanych tarcz gazowych np. tlenu, argonu itp.

Autorzy artykulu składają podziękowania Panu prof. dr hab. inż. Henrykowi Fiedorowiczowi za umożliwienie przeprowadzenia badań.

Powyższa praca jest wynikiem realizacji projektu badawczego Nr 0004/T00/2005/29

# LITERATURA

- Lawes R. A., *Future trends in high-resolution lithography*, Applied Surface Science, t.154–155, str..519–526, 2000.
- [2] Arkhipov N., Bakhtin V., Kurkin S., Safronov V., Toporkov D., Vasenin S., Zhitlukhin A., Rockett P., Hunter J., *Absolute* VUV spectroscopy of an eroding graphite target using a calibrated CCD camera, Journal of Nuclear Materials, t.266-269, str. 751-753, 1999.
- [3] Cross-Calibration of Extreme Ultraviolet (EUV) Energy Sensors, International SEMATECH Technology Transfer #04024498A-TR http://www.sematech.org /docubase/ document/ 4498atr.pdf.
- [4] Bijkerk F., Stuik R., Bruineman C.: Flying Circus 2 a concerted effort in EUV source development, EUVL Source Workshop, ISMT, Santa Clara, 2002.
- [5] Materiały Jenoptik Jena Mikrotechnik GmgH, www.jo-mikrotechnik.com.
- [6] Bielecki Z., Mikołajczyk J., Rakowski R., Wojtas J.: Measuring system for radiation pulses from gas-puff laser-plasma source, Proc. SPIE, t. 6189, str. 300 – 305. 2006.
  - [7] Fiedorowicz H., Bartnik A., Szczurek M., Daido H., Sakaya N. et. al., *Investigation* of soft X-ray emission from a gas puff target

*irradiated with a Nd:YAG laser*, Optics Communications, t. 163, wyd. 1-3, str.103-114, 1999.

- [8] http://architect.www.comm.com/Uploads/Princ eton/Documents/sx1300b.pdf.
- [9] Tanuma H., Ohashi H., Shibuya E., Kobayashi N., Okuno T., Fujioka S., Nishimura H., Nishihara K., EUV emission spectra from excited multiply charged xenon ions produced in charge-transfer collisions, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 235, str. 331–336, 2005.



Dr hab. inż. Zbigniew **BIELECKI**, profesor nadzwyczajny WAT. Zajmuje się zagadnieniami dotyczącymi detekcji sygnałów optycznych i projektowania niskoszumowych układów przetwarzania sygnałów. Jest autorem i współautorem ponad 130 publikacji z zakresu techniki podczerwieni i detekcji sygnałów optycznych. Członek SEP i SPIE oraz przewodniczący Zespołu Roboczego przy PKOpto.

Mgr inż. Janusz MIKOŁAJCZYK, asystent w Zakładzie Systemów Optoelektronicznych Instytutu Optoelektroniki WAT. Specjalizuje się w detekcji sygnałów optycznych, zwłaszcza w zakresie miękkiego promieniowania X oraz nadfioletu. Dodatkowo w jego obszarze zainteresowań naukowych są zautomatyzowane systemy pomiarowe

# POMIARY PORÓWNAWCZE DESKRYPTORA AKUSTYCZNEGO A<sub>rms</sub> DLA RÓŻNYCH FORM WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH, WYSTĘPUJĄCYCH W UKŁADACH IZOLACYJNYCH TRANSFORMATORÓW

Barbara KUCHARSKA

Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Instytut Elektroenergetyki, ul. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole, e-mail: <u>kubar@po.opole.pl</u>

Streszczenie

W artykule scharakteryzowano deskryptor emisji akustycznej A<sub>rms</sub>. Przedstawiono układ do generacji różnych form wyładowań niezupełnych. Pokazano przykładowe wyniki pomiarów deskryptora. Oceniono przydatność tego deskryptora do opisu zjawiska wyładowań niezupełnych.

Słowa kluczowe: deskryptor Arms, emisja akustyczna, wyładowania niezupełne, izolacja.

## COMPARATIVE MEASURMENTS OF ACOUSTIC DESCRIPTORS FOR VARIOUS FORMS OF PARTIAL DISCHARGES OCCURING IN THE INSULATION SYSTEMS OF TRANSFORMERS

Summary

In the paper the acoustic descriptor Arms was characterized. The system generating various forms of partial discharges was presented. Examples of the results of measurements of descriptor were shown. Usefulness of the descriptor for the analysis of partial discharges were estimated.

Keywords: descriptor Arms, acoustic emission, partial discharge, insulation.

# 1. WSTĘP

Jednym z najważniejszych i najdroższych systemu elektroenergetycznego są elementów transformatory. Przyczyna uszkodzenia ich izolacji mogą być między innymi wyładowania niezupełne (WNZ). Znaczne koszty ponosi się nie tylko, gdy transformator musi być poddany remontowi, ale również wówczas, gdy trzeba go wyłączyć w celu przeprowadzenia pomiarów. Stad, w przypadku dużych jednostek diagnostyka powinna być podczas normalnei przeprowadzana pracy urządzenia. Nie wszystkie metody diagnostyczne można wówczas zastosować. Jedną z metod, która umożliwia pomiary (głównie detekcję i lokalizację WNZ) na pracującej jednostce, jest metoda emisji akustycznej (EA) [3, 4, 8]. Jej główną zaletą jest stosunkowo mała wrażliwość na zakłócenia oraz prosta i dostępna aparatura pomiarowa. Obecnie metoda EA może być stosowana w transformatorach mocy a także w przekładnikach wysokiego napięcia, energetycznych kondensatorach oraz w rozdzielnicach z SF6. Podstawowym problemem w przypadku metody EA jest odpowiedni dobór wskaźników, które nie tylko umożliwią detekcję czy zlokalizowanie występujących w układzie izolacyjnym wyładowań, ale pozwolą również na ocenę ich intensywności i stopnia zagrożenia izolacji [3, 7].

Parametrem, który może spełnić te wymagania jest deskryptor  $A_{rms}$ , będący pierwiastkiem ze średniej kwadratów sygnału elektrycznego przetworzonego z sygnału akustycznego [2, 5]. Jego wzór można przedstawić w postaci:

$$A_{\rm rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} u^2(t) dt}$$
(1)

gdzie:

u(t) - wartość chwilowa sygnału napięciowego przetworzonego z sygnału akustycznego, T - stała czasowa.

Deskryptor jako suma energii mierzonego sygnału elektrycznego, ma bezpośredni związek z poziomem emisji akustycznej mierzonych wyładowań niezupełnych. Jest zatem również związany ze szkodliwością WNZ. Jego wartość jest zdeterminowana przez przedział i stałą całkowania. Ważną zaletą jest niezależność od poziomu dyskryminacji i szumów własnych aparatury pomiarowej [6].

## 2. UKŁAD GENERACJI I POMIARU WNZ

Wyładowania niezupełne były generowane za pomocą odpowiednio przygotowanych iskierników umieszczonych w kadzi z olejem izolacyjnym. Dzięki temu symulowano różne formy wyładowań niezupełnych występujących w rzeczywistych układach izolacyjnych [3]. Zastosowane układy umożliwiały czterech elektrod generowanie podstawowych typów WNZ takich jak: powierzchniowe, w oleju, w pęcherzykach gazowych oraz na cząstkach o nieokreślonym potencjale przemieszczających się w oleju. Do zasilania układu wykorzystano wysokie napięcie 0 częstotliwości sieciowej, uzyskiwane z transformatora probierczego. Do odbioru sygnałów zastosowano przetwornik stykowy firmy Brüel-Kjear. Sygnał z przetwornika był wstępnie wzmacniany przez przedwzmacniacz, a następnie przekazywany do analizatora emisji akustycznej DEMA 100. Mierzone sygnały były doprowadzane do karty pomiarowej w komputerze a następnie rejestrowane, co umożliwiało ich późniejszą wizualizację.

Do generacji WNZ oraz pomiaru i rejestracji deskryptora  $A_{rms}$  zastosowano układ, którego schemat obrazuje rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy układu pomiarowego: P - przetwornik pomiarowy, PW-przedwzmacniacz, DEMA- analizator emisji akustycznej, K- komputer, D-drukarka

# 3. PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ

W przedstawionym na rys. 1 układzie, wykonano pomiary deskryptora  $A_{rms}$  dla generowanych czterech podstawowych form wyładowań niezupełnych :

- powierzchniowych,
- w oleju,
- w pęcherzykach gazowych,

- na cząstkach o nieokreślonym potencjale przemieszczających się w oleju.

Pomiary wykonano dla zakresu napięć generacji WNZ - począwszy od napięcia początkowego  $U_0$ , aż do napięcia przebicia  $U_p$ , przy zmianie napięcia co 1kV. Czas trwania każdego pomiaru wynosił 1s, pomiary wykonywano w serii po 120. Każdą serię pomiarów powtarzano pięciokrotnie.

Na rys. 2 przedstawiono przykładowe przebiegi deskryptora Arms WNZ generowanych w oleju dla napięć 18, 26 i 27 kV (64,2; 92,3; 96,4 % U<sub>p</sub>). typu wyładowań, przy W przypadku tego napięciach bliskich Uo wyładowania pojawiają się rzadko, ale mierzony deskryptor przyjmuje duże wartości. przebiegów czasowych Ζ zarejestrowanych dla wyższych napięć generacji (bliskich U<sub>p</sub>) wynika, że deskryptor przyjmuje wówczas zbliżone wartości w poszczególnych przedziałach czasowych i jego przebieg jest dosyć stabilny.

Na rys. 3 zobrazowano wybrane przebiegi deskryptora  $A_{rms}$  WNZ generowanych w pęcherzykach gazowych przemieszczających się w oleju, dla napięć 20, 26 i 27 kV (74,1; 92,3; 96,4 % U<sub>p</sub>). Wyładowania te mają ustabilizowany przebieg dopiero przy najwyższym napięciu, bliskim przebiciu układu. Przy napięciach niższych wyładowania pojawiają się w tylko w niektórych przedziałach czasowych a mierzony wówczas deskryptor charakteryzuje się dużymi wartościami.









Rys. 2. Deskryptor A<sub>rms</sub> WNZ występujących w oleju

Wyładowania powierzchniowe, dla których mierzony deskryptor przedstawiony jest na rys. 4, nie mają stabilnego przebiegu w całym zakresie napięcia. Dla niższych napięć generacji wyładowania pojawiają się w bardzo nielicznych przedziałach czasowych. Wynika to z ich specyfiki. Tego typu wyładowania występują rzadko ale charakteryzują się dużą energią, co wiąże się z powstawaniem wówczas iskier ślizgowych. Cechą charakterystyczną wyładowań powierzchniowych jest to, że mimo znacznej energii pojedynczych wyładowań średnia wartość mierzonego deskryptora jest mała w porównaniu z wyładowaniami generowanymi w oleju i pęcherzykach gazowych przemieszczających się w oleju.



Rys. 3. Deskryptor A<sub>rms</sub> WNZ występujących w pęcherzykach gazowych

Na rys. 5 pokazano przykładowe przebiegi deskryptora Arms WNZ generowanych na cząstkach o nieokreślonym potencjale dla napięć 8, 14 i 18 kV (42,1; 73.7; 89,47 % U<sub>n</sub>). Mierzony tym przypadku deskryptor rejestrowany jest w każdym przedziale czasowym począwszy od napięcia zapłonu. Wartości parametru Arms w poszczególnych przedziałach W czasowych niewielkie, porównaniu sa z pozostałymi trzema formami wyładowań. Ponadto mimo, że WNZ na cząstkach o nieokreślonym potencjale występują w sposób ciągły średnia wartość badanego deskryptora jest niewielka.



Rys. 4. Deskryptor Arms WNZ powierzchniowych

Na rys. 6 porównano średnie wartości deskryptora  $A_{rms}$  generowanych czterech form WNZ. W celu ich porównania napięcie generacji przedstawiono w procentach w odniesieniu do napięcia przebicia.

#### 4. PODSUMOWANIE

Zarejestrowane przebiegi czasowe pozwalają na ocenę intensywności występowania wyładowań niezupełnych w układzie izolacyjnym. Deskryptor A<sub>rms</sub> jest czułym parametrem, charakteryzującym chwilowe zmiany procesu generacji WNZ a także ich stabilność i równomierność występowania. Wizualizacja przebiegów czasowych pozwala sprawdzić czy WNZ występują w sposób ciągły, czy też dochodzi do nich tylko w niektórych przedziałach czasowych. Równoczesna ocena chwilowych wartości deskryptora i jego wartości średnich daje możliwość stwierdzenia, jaki jest poziom energii wyładowań, a tym samym ocenić ich szkodliwość dla układu izolacyjnego.

Ze względu na skomplikowaną budowę technicznych układów izolacyjnych, występuje w nich znaczne tłumienie sygnałów akustycznych na drodze źródło – przetwornik pomiarowy [3, 8]. W związku z tym, wykorzystanie deskryptora A<sub>rms</sub> w takich układach, jest możliwe na zasadzie porównania bieżących wyników pomiarów deskryptora z wynikami badań urządzenia nowego lub bezpośrednio po remoncie, stanowiących swoisty wzorzec ( tzw. "print finger").











## LITERATURA

- Markalous S. M., Grossmann E., Feser K.: Online acoustic PD-measurements of oil/paper- insulated transformers- methods and results, 13th International Symposium on High Voltage, Delft, Netherlands, 2003.
- [2] Ranachowski J., Malecki I.: Emisja akustyczna. Źródła, metody, zastosowania, IPPT PAN, Warszawa 1994.
- [3] Skubis J.: Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych. IPPT PAN, Warszawa, 1993.
- [4] Skubis J.: Akustyczne techniki lokalizacji wyładowań niezupełnych. Transformatory w eksploatacji. Energetyka zeszyt VI. 04.2005. s.73-76.
- [5] Witos F., Gacek Z.: Badanie wyładowań niezupełnych w transformatorach elektroenergetycznych metodą kalibrowanej emisji akustycznej on-line. Transformatory w eksploatacji. Energetyka zeszyt VI. 04.2005. s.78-81.
- [6] Witos F., Malecki I.: Deskryptory emisji akustycznej. Prace IPPT PAN nr 39/1993, Warszawa, 1993.
- [7] Witos F., Urbańczyk M., Opilski A., Olech W., Groszko M.: O potrzebie stosowania metody "pattern recognition" do lokalizacji wnz. Konferencja Transformator - 95, Koszalin 1995.
- [8] Liu Y., Chen L., Bin Q.,: Partial Discharge (PD) Acoustic Wave Propagation in Power Transformers, EPRI, Ed. San Antonio, TX, 2001.



Dr inż. **Barbara KUCHARSKA** jest pracownikiem Instytutu Elektroenergetyki, Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej.

# METODA BADANIA DIAGNOSTYCZNEGO ŁOPATKI MASZYNY WIRNIKOWEJ W WARUNKACH STACJONARNYCH Z WYKORZYSTANIEM ANALIZY SYGNAŁÓW AKUSTYCZNYCH

#### Adam KOTOWSKI

Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Robotyki ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok, tel. 085 746 92 24, adamk@pb.edu.pl

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono przejście od sygnałów odpowiedzi akustycznej łopatki maszyny wirnikowej zarejestrowanych w warunkach stacjonarnych na wymuszenie impulsowe zadane w dwóch punktach i wyznaczenie parametrów diagnostycznych powiązanych ze stanem technicznym łopatki. W tym celu wykorzystano funkcję autokorelacji i gęstości widmowej mocy w postaci analitycznej. Parametry diagnostyczne wyznaczono na podstawie ilorazu gęstości widmowych mocy sygnałów odpowiedzi akustycznej łopatki przy wzbudzeniu łopatki w dwóch punktach. Wyniki przedstawiono dla czterech symulowanych uszkodzeń łopatki.

Słowa kluczowe: łopatka maszyny wirnikowej, diagnostyka, analityczny opis sygnałów.

# DIAGNOSTIC INVESTIGATION METHOD OF ROTOR ENGINE BLADE IN STATIONARY CONDITIONS WITH USE OF ACOUSTIC SIGNAL ANALYSIS

#### Summary

The paper presents transition from acoustic response signals of a rotor-engine blade at impulse forcing at two fixed points registered in stationary conditions to diagnostic parameters connected with the technical condition of the blade. For this purpose the auto-correlation and the power spectral density function in the analytical form has been applied. Diagnostic parameters have been determined on the basis of the quotient of power spectral density of acoustic response signals of blade during the blade excitation at two points. The results have been presented for four simulated damages of blade.

Keywords: rotor engine blade, diagnostics, analytical description of signals.

# **1. WPROWADZENIE**

Żywotność i bezpieczeństwo pracy silników lotniczych zależy od stanu technicznego łopatek. Urwanie się pojedynczej łopatki prowadzi do zniszczenia maszyny i katastrof. Stąd dużo uwagi poświęca się niezawodności i diagnostyce łopatek wirnikowych.

Diagnostyka łopatek maszyn wirnikowych realizowana jest obecnie z wykorzystaniem metody prądów wirowych, metody ultradźwiękowej, metody rentgenowskiej, defektoskopii kolorowej i luminescencyjnej, metody opartej na analizie sygnału efektu Barkhausena oraz metody wibroakustycznej.

W pracy przedstawiono metodę diagnozowania łopatki wirnikowej w warunkach stacjonarnych przy impulsowo zadanym wymuszeniu w dwóch punktach i rejestracji dwóch sygnałów odpowiedzi akustycznej tak pobudzonej do drgań łopatki. Taka odpowiedź niesie ze sobą informację o złożonych drganiach własnych a analiza sygnału tej odpowiedzi pozwala uzyskać wyrażone liczbowo parametry powiązane z jej stanem technicznym. Do analizy sygnału akustycznego wykorzystano tu funkcję korelacji własnej i funkcję gęstości widmowej mocy przetwarzając te funkcje i ich parametry na liczbowo wyrażone dwadzieścia cztery parametry nowo zdefiniowanej funkcji wyznaczonej ze stosunku gęstości widmowych mocy dwóch sygnałów odpowiedzi łopatki pobudzonej w dwóch ściśle określonych punktach. Parametry ilorazu tych funkcji są informacją diagnostyczną, której znamienną cechą jest to, że wynika ona z dwóch mierzalnych sygnałów wyjściowych.

Dotychczasowe badania diagnostyczne łopatki wykazały, że istnieją przynajmniej dwa miejsca wzbudzenia łopatki do drgań gwarantujące zadowalający stopień dopasowania znanych i nieskomplikowanych funkcji analitycznych do przebiegów funkcji korelacji własnej rzeczywistych sygnałów odpowiedzi badanej łopatki dzięki czemu możliwe jest wyznaczenie parametrów wyjściowych i ich procentowych zmian odwzorowujących zmiany stanu technicznego łopatki maszyny wirnikowej poddanej badaniu.

#### 2. OPIS METODY

#### 2.1. Podstawy metody

Metoda bazuje na funkcji  $A_{PI,P2}^2$  wyznaczanej z ilorazu gęstości widmowych mocy opisujących analitycznie sygnały akustyczne pochodzące od wzbudzenia łopatki do drgań w dwóch szczególnych punktach łopatki położonych na części wypukłej jej pióra.

Funkcja ta bazuje na analitycznej postaci funkcji gęstości widmowej mocy wyznaczanej z funkcji analitycznej opisującej przebieg korelacji własnej zarejestrowanego sygnału wibroakustycznego.

Wiadomo, że pomiędzy funkcjami gęstości widmowej mocy sygnału wyjściowego y(t) i wejściowego x(t) obiektu zachodzi związek w postaci [1]:

$$\left|G(j\omega)\right|^{2} = \frac{S_{yy}(\omega)}{S_{xx}(\omega)} \tag{1}$$

Oznaczając:

$$A^2 = \left| G(j\omega) \right|^2 \tag{2}$$

przy impulsowym pobudzeniu łopatki w dwóch punktach  $P_1$  i  $P_2$  otrzymuje się:

$$A_{PI}^{2} = \frac{S_{yy}^{PI}}{S_{xx}^{PI}}; A_{P2}^{2} = \frac{S_{yy}^{P2}}{S_{xx}^{P2}}$$
(3)

Zakłada się, że warunki otoczenia panujące przy kolejnych impulsowych pobudzeniach są niezmienne ( $S_{xx}^{P1} = S_{xx}^{P2}$ ). Wskazuje się zatem na nową informację diagnostyczną w postaci parametrów funkcji (4):

$$A_{PI,P2}^{2} = \frac{A_{PI}^{2}}{A_{P2}^{2}} = \frac{S_{yy}^{PI}}{S_{xx}^{PV}} \cdot \frac{S_{xx}^{P2}}{S_{yy}^{P2}} = \frac{S_{yy}^{PI}}{S_{yy}^{P2}} \quad (4)$$

Funkcja  $A_{PI,P2}^2$  cechuje się tym, że wyznaczana jest na podstawie dwóch sygnałów wyjściowych  $y_1(t)$  i  $y_2(t)$  przy pobudzeniu łopatki w dwóch punktach:  $P_1$  i  $P_2$ .

Relacja przyczynowo-skutkowa pomiędzy uszkodzeniami a parametrami funkcji  $A^2_{PI,P2}$  wskazuje na powiązanie obserwowanych sygnałów akustycznych ze zmianą stanu technicznego pióra łopatki.

#### 2.2. Analityczny opis sygnałów

wykorzystania możliwość Z uwagi na oprogramowania komputerowego do procesu krzywych dopasowywania zaproponowano wyznaczenie parametrów funkcji korelacji własnej (amplitudy, częstotliwości i tłumienia składowych harmonicznych) sygnału akustycznego będącego odpowiedzią łopatki na impulsowo zadane wymuszenia. Przyjęto sparametryzowana postać funkcji korelacji w następującej formie:

$$R_{xx}(\tau) = \sum_{i=1}^{n} a_i \cos(c_i \tau) e^{-b_i \tau} \qquad (5)$$

Parametry  $a_i$ ,  $b_i$  oraz  $c_i$  w zależności (5) są parametrami powiązanymi ze stanem technicznym badanej łopatki.

Na podstawie analitycznego zapisu funkcji korelacji własnej sygnału wibroakustycznego y(t) wyznacza się własną gęstość widmową mocy  $S_{yy}(\omega)$  [1],[2],[3],[4],[7]:

$$S_{yy}(\omega) = \int_{0}^{T} R_{yy}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$$
 (6)

gdzie: T - okres obserwacji sygnału.

Kolejno, na podstawie (5) i (6), wyznacza się sparametryzowaną postać analityczną gęstości widmowej mocy własnej (*s*-zmienna zespolona,  $s = j\omega$ ,  $j^2 = -1$ , n – liczba składowych harmonicznych):

$$S_{yy}(\omega) = \sum_{i=1}^{n} \frac{A_i e^{(-Ts)} (B_i + C_i \cdot s) + D_i \cdot s + E_i}{s^2 + F_i \cdot s + G_i}$$
(7)

gdzie:

$$A_{i} = a_{i}e^{-ib_{i}}, B_{i} = c_{i}\sin(Tc_{i}) - b_{i}\cos(Tc_{i}),$$
  

$$C_{i} = -\cos(Tc_{i}), D_{i} = a_{i}, E_{i} = a_{i}b_{i}, F_{i} = 2b_{i},$$
  

$$G_{i} = b_{i}^{2} + c_{i}^{2}.$$

Na podstawie (7) oraz przy następujących warunkach [5]:

- przebieg korelacji własnej sygnału odpowiedzi akustycznej łopatki przy zadaniu wzbudzenia w punkcie P<sub>1</sub> posiada tylko dwie główne (dominujące) składowe harmoniczne opisujące ten przebieg;
- przebieg korelacji własnej sygnału odpowiedzi akustycznej łopatki przy zadaniu wzbudzenia w punkcie P<sub>2</sub> posiada tylko jedną główną (dominującą) składową harmoniczną opisującą ten przebieg,

wyznacza się funkcję gęstości widmowej mocy  $S_{vv}^{P1}$ 

i  $S_{yy}^{P2}$  dla pobudzenia łopatki do drgań w punkcie  $P_1$  i  $P_2$ :

$$S_{yy}^{PI} = \frac{e^{-sT} \left( s^3 L_{e3}^{PI} + s^2 L_{e2}^{PI} + s L_{e1}^{PI} + L_{e0}^{PI} \right)}{s^4 + s^3 S_3^{PI} + s^2 S_2^{PI} + s S_1^{PI} + S_0^{PI}} + \frac{+s^3 L_{e1}^{PI} + s^2 L_{e1}^{PI} + s L_{e1}^{PI} + L_{e0}^{PI}}{s^4 + s^3 S_3^{PI} + s^2 S_2^{PI} + s S_1^{PI} + S_0^{PI}}$$

$$S_{yy}^{P2} = \frac{e^{-sT} (s L_{e1}^{P2} + L_{e0}^{P2}) + L_1^{P2} s + L_0^{P2}}{s^2 + s S_1^{P2} + S_0^{P2}}$$
(9)

oraz ostatecznie otrzymuje się zależność (10):

$$A_{Pl,P2}^{2} = \frac{e^{-sT} \left( s^{5} P_{l} + s^{4} P_{2} + s^{3} P_{3} + s^{2} P_{4} + s P_{5} + P_{6} \right) +}{e^{-sT} \left( s^{5} M_{l} + s^{4} M_{2} + s^{3} M_{3} + s^{2} M_{4} + s M_{5} + M_{6} \right) +} \cdots + \frac{s^{5} P_{7} + s^{4} P_{8} + s^{3} P_{9} + s^{2} P_{10} + s P_{11} + P_{12}}{+s^{5} M_{7} + s^{4} M_{8} + s^{3} M_{9} + s^{2} M_{10} + s M_{11} + M_{12}}$$
(10)

Działaniem zmierzającym do otrzymania liczbowo wyrażonych parametrów funkcji (10) -P<sub>1</sub>..P<sub>12</sub> i M<sub>1</sub>..M<sub>12</sub>, jest dopasowanie krzywych funkcji korelacji opisanych analitycznie dla przebiegów czasowych uzyskanych z pomiarów. Proces ten realizuje się przez odpowiednie oprogramowanie komputerowe z funkcją dopasowywania krzywych. W efekcie otrzymujemy liczbowo wyrażone parametry funkcji analitycznej i współczynnika determinacji, określającego zgodność (podobieństwo) przebiegu funkcji korelacji z doświadczenia do krzywej analitycznej.

#### 3. POMIAR I ANALIZA SYGNAŁÓW ODPOWIEDZI AKUSTYCZNEJ ŁOPATKI

#### 3.1. Stanowisko pomiarowe

Badania łopatki wirnikowej zrealizowano na stanowisku, w którego skład wchodzi następująca aparatura kontrolno-pomiarowa (rys. 1):

- system akwizycji i analizy sygnałów wibroakustycznych (system PULSE firmy Brüel&Kjær),

 mikrofon pola swobodnego z przedwzmacniaczem (Brüel&Kjær),

- młotek udarowy (ENDEVCO),
- kalibrator dźwięku (Brüel&Kjær),
- akcesoria (statyw mikrofonowy, przewody).









Rys. 1. Stanowisko pomiarowe: a) widok ogólny (1- komputer, 2 – moduł wejść systemu akwizycji danych, 3 – mikrofon z przedwzmacniaczem,
4 – praska hydrauliczna); b) układ mikrofon-łopatka

#### 3.2. Wzbudzenie łopatki

Łopatkę wzbudza się młotkiem udarowym (rys. 2) w szczególnych punktach położonych na części wypukłej jej pióra –  $P_1$ ,  $P_2$  (rys. 3) [5].



Rys. 2. Młotek udarowy



Rys. 3. Punkty wzbudzenia łopatki do drgań

W przypadku badanej łopatki (łopatka I. stopnia sprężarki osiowej silnika lotniczego SO-3) punktami wzbudzenia impulsowego są:

 punkt położony na powierzchni wypukłej w odległości 35 mm (ok. 1/3 długości pióra) od górnej krawędzi zamka łopatki – punkt P<sub>1</sub>,

- punkt położony na powierzchni wypukłej w odległości 55 mm (ok. 1/2 długości pióra) od górnej krawędzi zamka łopatki – punkt P<sub>2</sub>.

# 3.2. Wydzielanie obserwowanego fragmentu akustycznego sygnału łopatki

Wydzielanie obserwowanego fragmentu akustycznego sygnału łopatki wprowadza się w celu wyodrębnienia takiego fragmentu sygnału, aby fragment ten dobrze odwzorowywał naturalne zachowanie się łopatki po wzbudzeniu jej do drgań (wybrzmiewanie). Dodatkowo uzyskuje sie kilkukrotnie mniejszy rozmiar wektora danych w porównaniu do całego zarejestrowanego sygnału. Wybiera się ten fragment, który umożliwia najlepsze jego dopasowanie do ustalonej postaci analitycznej funkcji korelacji własnej (rys. 4). O ile w przypadku sygnału odpowiedzi łopatki na jej wzbudzenie w punkcie P<sub>2</sub> nie zauważa się zdecydowanych zmian to jednak zmiana położenia wydzielanego fragmentu dla odpowiedzi łopatki od wymuszenia w punkcie P1 wykazuje zdecydowane zmiany. Efekt ten pokazano na przykładzie widm funkcji korelacji (rys. 5).





Rys. 5. Widma wydzielonych fragmentów akustycznego sygnału łopatki: a) fragmentu A z rys.2, b) fragmentu B z rys.2 (od lewej widmo przy wzbudzeniu łopatki w punkcie P<sub>1</sub>, widmo przy wzbudzeniu łopatki w punkcie P<sub>2</sub>)

# 3.3. Komputerowa analiza sygnałów

Na podstawie numerycznej postaci zarejestrowanego i wyselekcjonowanego sygnału wibroakustycznego dokonuje się przekształcenia go do postaci przebiegu korelacji własnej. Przekształcenie to może być realizowana na dowolnej platformie programowej, ale jednak tak, aby otrzymać funkcję korelacji przyjmującą wartości z unormowanego zakresu  $\langle -1,+1 \rangle$ .

Na podstawie wyznaczonych przebiegów funkcji korelacji własnej sygnału odpowiedzi akustycznej łopatki przeprowadzono operację dopasowywania do nich funkcji analitycznych. Działanie to pozwala na wyznaczanie wartości parametrów funkcji analitycznej odpowiedniej do opisu przebiegu eksperymentalnej funkcji korelacji własnej.

Dopasowanie krzywych a jednocześnie wyznaczenie parametrów funkcji korelacji możliwe było przy wykorzystaniu specjalistycznego oprogramowania *Origin* firmy OriginLab.

# 4. BADANIE WPŁYWU ZMIAN WARUNKÓW WYKONANIA BADAŃ NA ZMIANY PARAMETRÓW FUNKCJI A<sup>2</sup><sub>P1,P2</sub>

Jaklo zmiany warunków wykonania badań określa się:

- zmianę nacisku zamocowania łopatki,

- zmianę odległości mikrofon-łopatka.

#### 4.1. Zmiana nacisku zamocowania łopatki

Dla badanej łopatki zbadano wpływ zmian nacisku uchwytu zamocowania łopatki (zmiana warunków zamocowania) na zmiany parametrów diagnostycznych określonych funkcją  $A_{PI,P2}^2$ . Za "wzorcowe" warunki otoczenia uznano nacisk 3,0±0,1T i odległość czoła mikrofonu od krawędzi wierzchołka łopatki 5±0,1cm (rys. 1.b).

Pomiary wykonano w warunkach "wzorcowych" oraz przy zamocowaniu łopatki z naciskiem zamocowania 2,6 $\pm$ 0,1T i 3,4 $\pm$ 0,1T przy ustalonej i stałej odległości czoła mikrofonu od krawędzi wierzchołka łopatki wynoszącej 5 $\pm$ 0,1cm.

Na podstawie przebiegów i uwzględniając założenia do wyznaczenia funkcji  $A_{PI,P2}^2$  zauważa się, że przy wartości nacisku w zamocowaniu łopatki 2,6±0,1T otrzymany sygnał odpowiedzi łopatki pobudzonej do drgań w punkcie  $P_1$  jest najmniej stabilny w sensie powtarzalności i nie spełnia założeń do wyznaczenia funkcji  $A_{PI,P2}^2$  w oparciu o opis funkcji korelacji własnej funkcją dwóch składowych harmonicznych.

Wyniki dla przypadku zmiany nacisku zamocowania łopatki z  $3,0\pm0,1$  T na  $3,4\pm0,1$  T przedstawiono w postaci procentowych zmian parametrów funkcji  $A^2_{P1,P2}$  (rys. 6).



Z analizy zmian parametrów funkcji  $A_{PI,P2}^2$ wywołanych zmianą warunków zamocowania łopatki wynika, że zmiana poziomu nacisku zamocowania łopatki w uchwycie (w ograniczonym zakresie) wywołuje zmianę parametrów funkcji  $A_{PI,P2}^2$  w uogólnionym zakresie ±20%.

#### 4.2. Zmiana odległości mikrofon-łopatka

W celu zbadania wpływu zmiany odległości czoła mikrofonu od wierzchołka wzbudzanej do drgań łopatki wykonano pomiary w warunkach "wzorcowych" (nacisk zamocowania wynosi 3,0±0,1 T, odległość czoła mikrofonu od krawędzi wierzchołka łopatki 5±0,1 cm) oraz przy dwóch ustawieniach mikrofonu: odległość czoła mikrofonu od krawedzi wierzchołka łopatki 4,0±0,1cm oraz 6,0±0,1cm przy stałym poziomie nacisku zamocowania łopatki 3±0,1T.

Zatem można stwierdzić, że odchylenie procentowych zmian parametrów funkcji  $A_{PI,P2}^2$ wywołane zmianą odległości mikrofon-łopatka (w zakresie 1cm) od wartości poprawnej, pomijając parametr M<sub>1</sub> i M<sub>3</sub>, wynosi w przybliżeniu ±20 % (rys. 7).



Rys. 7. Odchylenie procentowych zmian parametrów funkcji  $A^2_{PI,P2}$  od zmiany odległości mikrofon-łopatka

# 5. SYMULOWANE USZKODZENIA ŁOPATKI

Dla czterech badanych łopatek ustalono następujący zbiór ich uszkodzeń:

- uszkodzenie U<sub>1</sub> (łopatka nr 1): deformacja mechaniczna krawędzi spływu przy podstawie (rys. 8.a),
- uszkodzenie U<sub>2</sub> (łopatka nr 2): nacięcie krawędzi natarcia przy podstawie (rys. 8.b),
- uszkodzenie U<sub>3</sub> (łopatka nr 3): nacięcie krawędzi natarcia w okolicy wierzchołka pióra łopatki (rys. 8.c),
- uszkodzenie  $U_4$  (łopatka nr 4): zmiana stanu łopatki wywołana wygrzaniem przy chłodzeniu z piecem.



Rys. 8. Uszkodzenia łopatek: a)  $U_1$ , b)  $U_2$ , c)  $U_3$ 

Dla uszkodzenia  $U_2$ ,  $U_3$  względne położenie oraz względna głębokość nacięcia wynosi odpowiednio (długość pióra łopatki 103mm, średnia szerokość pióra łopatki 36,3mm):

U<sub>2</sub>: względne położenie 7,8 %, względna głębokość 13,8 %;

U<sub>3</sub>: względne położenie 77,7 %, względna głębokość 8,3 %.

# 6. WYNIKI BADAŃ

Na podstawie wartości parametrów funkcji korelacji własnych  $R_{yy}^{Pl}$  i  $R_{yy}^{P2}$  wyznaczono ostatecznie wartości parametrów funkcji  $A_{Pl,P2}^{2}$ przed i po wprowadzeniu uszkodzeń. Procentowe zmiany tych parametrów w relacji łopatka uszkodzona – łopatka nieuszkodzona, dla kolejnych łopatek, przedstawiono na rys. 9÷12.







P1 P3 P5 P7 P9 P11 M1 M3 M5 M7 M9 M11 Rys. 10. Procentowe zmiany parametrów funkcji  $A_{PI,P2}^2$  w relacji łopatka uszkodzona – łopatka nieuszkodzona uszkodzonej łopatki nr 2 w postaci

nacięcia krawędzi natarcia przy podstawie



Rys. 11. Procentowe zmiany parametrów funkcji  $A^2_{PI,P2}$  w relacji łopatka uszkodzona – łopatka nieuszkodzona uszkodzonej łopatki nr 3 w postaci nacięcia krawędzi natarcia przy w okolicy wierzchołka pióra





Wiedząc, że maksymalne zmiany od otoczenia odpowiednio wynoszą: od zamocowania ±20 %, od ustawienia mikrofonu ±20 % (za wyjątkiem parametru  $M_1$  (56 %) i  $M_3$  (80 %)), to zmiany parametrów w zakresie ±40 % w procesie diagnozowania nie będą brane pod uwagę.

Do skutecznej identyfikacji symulowanych uszkodzeń kolejnych łopatek (łopatka nr 1, 2, 3 i 4) należy zatem używać następujących zbiorów parametrów funkcji  $A^{2}_{P1,P2}$ :

- dla U<sub>1</sub>: P<sub>2</sub>, P<sub>4</sub>, P<sub>5</sub>, P<sub>6</sub>, P<sub>11</sub>, P<sub>12</sub>, M<sub>5</sub>, M<sub>6</sub>, M<sub>11</sub>, M<sub>12</sub>,

- dla U<sub>2</sub>:  $P_1$ ,  $P_3$ ,  $P_5$ ,

- dla U<sub>3</sub>: P<sub>4</sub>, P<sub>6</sub>,

- dla U<sub>4</sub>: P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub>, P<sub>6</sub>.

# 7. WNIOSKI

Na podstawie wyznaczonych zmian parametrów funkcji  $A^2_{P1,P2}$  (parametrów diagnostycznych) można wykryć zmianę stanu technicznego łopatki wirnikowej. Można też poszczególnym zmianom parametrów przypisać odpowiadające im typowe uszkodzenia, które w procesie eksploatacji nie powodują jeszcze katastroficznego urwania łopatek.

Ważnym problemem rozwiązanym w pracy to ustalenie procentowych poziomów zmian dla każdego z parametrów od zmian warunków wykonania badań (otoczenia) co pozwala określić ważność danego parametru w ocenie stanu technicznego badanej łopatki. Przekroczenie ustalonego progu z uwzględnieniem uogólnionego poziomu zmian od otoczenia tylko jednego spośród wszystkich parametrów lub kilku wybranych określić łopatki pozwala precyzyjnie stan (identyfikować poszczególne uszkodzenia). W celu poprawy dokładności proponowanej metody diagnozowania zamiast uogólnionego można poziomu zmian parametrów od otoczenia, uwzględniając zmiany wszystkich parametrów (z wyjątkami), zastosować dodatkowo indywidualne progi przekroczeń procentowych zmian parametrów funkcji  $A^2_{PI,P2}$  wynikające z wpływu otoczenia na poszczególne parametry.

Stwierdza się również, że zmiany parametrów diagnostycznych są znaczące i dla niektórych parametrów sięgają kilkuset procent. Określają one jednoznacznie zmianę stanu technicznego łopatki.

# LITERATURA

- [1] Baskakow Ś. I.: Sygnały i układy radiotechniczne, PWN, Warszawa, 1991.
- [2] Cempel Cz.: Wibroakustyka stosowana, PWN, Warszawa, 1989.
- [3] Cholewa W., Moczulski W.: Diagnostyka techniczna maszyn, Skrypty Uczelniane Politechniki Śląskiej Nr 1758, Gliwice, 1993.
- [4] Lindstedt P.: Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy, Wydaw. Nauk. ASKON, Warszawa, 2002.
- [5] Lindstedt P., Kotowski A.: Basics for innovations in vibroacoustic diagnostics of transport machines rotor blades, The Archives of Transport, Vol. XVI, No 4., 2004, pp. 47-61.
- [6] Engel Z.: Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem, PWN, Warszawa, 2001.
- [7] Szabatin J.: Podstawy teorii sygnałów, WKiŁ, Warszawa, 2000.
- [8] Żółtowski B., Ćwik Z.: Leksykon diagnostyki technicznej, Wydaw. Uczel. ATR, Bydgoszcz, 1996.



Adam mgr inż. **KOTOWSKI** (ur. 1974 r.): 1999 r. - ukończone studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej; asystent Katedrze W Automatyki Robotyki i Wydziału Mechanicznego PB. Zainteresowania: analiza wibroakustyka, sygnałowa, automatyka.

Praca została sfinansowana przez Politechnikę Białostocką w ramach funduszy pracy statutowej S/WM/3/06.

# DIAGNOZOWANIE WYCIEKÓW METODĄ SŁABYCH INTERAKCJI MIĘDZYOBIEKTOWYCH NA PRZYKŁADZIE RUROCIĄGU MODELOWEGO

#### Paweł OSTAPKOWICZ

Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Robotyki 15-351 Białystok, ul. Wiejska 45C, <u>ostad@pb.bialystok.pl</u>

#### Streszczenie

Praca dotyczy diagnozowania wycieków z rurociągów. Rurociągi są obiektami trudnymi do diagnozowania, zwłaszcza w stanie z wyciekiem. Powstaje zatem problem polepszania ich podatności diagnostycznej, która ma zasadniczy wpływ na skuteczność realizowanej działalności diagnostycznej. Pokazano, że polepszenie podatności diagnostycznej rurociągów można osiągnąć dzięki nowej opracowanej metodzie, umownie nazwanej metodą słabych interakcji międzyobiektowych. Metoda ta polega na pozyskiwaniu nowej cennej informacji diagnostycznej. Informacją tą są sygnały interakcji, wynikające z pracy obiektu badawczego (korektora) – dołączonego do badanego (diagnozowanego) rurociągu. W pracy przedstawiono wyniki eksperymentalnej weryfikacji proponowanej metody, przeprowadzonej na stanowisku badawczym z rurociągiem modelowym.

Słowa kluczowe: rurociągi, diagnozowanie wycieków, podatność diagnostyczna.

# LEAK DETECTION BASED ON THE METHOD OF WEAK INTEROBJECT INTERACTIONS FOR EXAMPLE PIPELINE MODEL STATION

#### Summary

This work concerns diagnosing of leaks from pipelines. Pipelines are difficult objects to diagnosing, especially in state with leak. Therefore, there is a problem of improving their diagnostic susceptibility, which has significant influence on the efficacy of the executed diagnostic activity. There is shown that is possible improving diagnostics susceptibility thanks to a new elaborated method, conventionally named the method of weak interobject interactions. This method consists in acquiring piece of new valuable diagnostic information, which are signals of interactions, resulted from work a testing object (corrector) – specially joined to a tested (diagnosed) pipeline. In this work the results experimental verification of proposed method, conducted on special pipeline model station are presented.

Keywords: pipeline, leak detection, diagnostic susceptibility.

# 1. WSTĘP

Diagnozowanie nieszczelności i wycieków stanowi istotne zagadnienie eksploatacji wielu obiektów technicznych. Szczególnego znaczenia nabiera w przypadku takich obiektów jak rurociągi, a zwłaszcza te typu przesyłowego.

Spośród wielu rozwiązań powszechne zastosowanie na rurociągach znalazły głównie metody oparte o wykorzystanie standardowych sygnałów pomiarowych wewnętrznych parametrów przepływu (ciśnienia, natężenia przepływu i temperatury), określane w literaturze jako metody wewnętrzne.

Należy mieć jednak na uwadze, że praktyczna realizacja takiego procesu diagnozowania wycieków jest problemem złożonym i skomplikowanym, a to ze względu m.in. na duże rozmiary rurociągów oraz złożoną dynamikę procesu tłoczenia. Na skuteczność diagnozowania istotny wpływ ma ponadto podatność diagnostyczna badanego obiektu, która jest ściśle powiązana z możliwością pomiaru dostępnej informacji diagnostycznej.

Jeżeli zatem, w dotychczasowej działalności diagnostycznej zakłada się, że ocena stanu eksploatowanych obiektów związana jest jedynie z sygnałami diagnostycznymi, które są bezpośrednio z nimi (z ich działaniem) związane – oznacza to, że często pojawia się niedobór informacji powodujący zmniejszenie skuteczności diagnozowania. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku diagnozowania wycieków z rurociągów przy użyciu metod wewnętrznych (opartych o sygnały diagnostyczne bezpośrednio wynikające z pracy obiektów). Potwierdzają to uzyskiwane wyniki, gdzie dla istniejących rozwiązań (metod) diagnozowania możliwe jest identyfikowanie jedynie znacznych wycieków i lokalizowanie ich ze zgrubną dokładnością. Powstaje zatem problem polepszania podatności diagnostycznej rurociągów.

Efektywnym sposobem polepszania podatności diagnostycznej rurociągów może być nowa opracowana metoda, nazwana metodą słabych interakcji międzyobiektowych. Idea proponowanej metody zakłada pozyskiwanie nowych sygnałów diagnostycznych (informacji diagnostycznej), które nie są z obiektem (jego działaniem) bezpośrednio związane. Dzięki tej nowej informacii diagnostycznej zaistniała realna możliwość zwiększenia skuteczności diagnozowania wycieków, realizowanego dotychczasowymi metodami.

## 2. METODA SŁABYCH INTERAKCJI MIĘDZYOBIEKTOWYCH

#### 2.1. Idea metody

Proponowana metoda opiera się na wykorzystaniu zasad funkcjonowania układów korekcyjnych stosowanych w automatyce.

Zgodnie z zasadami automatyki, działanie wielu złożonych obiektów technicznych (w tym rurociągów), w praktyce może być opisane – transmitancją [3, 7, 9].

Oznacza to, że dla takich obiektów można otrzymać następującą zależność:

$$Y = H Z \tag{1}$$

gdzie: H – transmitancja obiektu; Z – transformata zakłócenia z wynikającego z oddziaływania otoczenia na obiekt; Y – transformata sygnału wyjściowego (użytkowego) y obiektu.

Analizując wzór (1) nietrudno dojść do wniosku, że praktycznie rzecz biorąc zmiany dostępnego sygnału Y mogą wynikać ze zmian stanu technicznego obiektu opisanego parametrami transmitancji H i/ lub ze zmian oddziaływania otoczenia na obiekt, reprezentowanego tu przez Ζ. Taka właśnie sytuacja sygnał iest charakterystyczna dla niepodatnych diagnostycznie obiektów technicznych (w tym rurociągów) diagnosta dysponuje jednym równaniem z dwiema niewiadomymi, zatem problem diagnozowania niemożliwy takiego obiektu staje się do jednoznacznego rozwiazania.

Na rys. 1 pokazano ten sam obiekt techniczny z dołączonym elementem korekcyjnym – korektorem (o transmitancji  $G_K$ ). Przy poprawnym dobraniu i dołączeniu do badanego obiektu, korektor będzie reagował na każdą zmianę parametrów konstrukcyjnych obiektu (wynikającą z zaistniałych uszkodzeń lub jego zużycia) odpowiednią zmianą funkcjonowania (przebiegu i kształtu sygnału  $M_K$ ). Stąd na podstawie badania tylko zmian funkcjonowania korektora możliwa staje się ocena różnorodnych zmian zachodzących w obiekcie.

Zgodnie z zasadami automatyki dla układu (rys. 1) otrzymuje się następujące relacje między sygnałami:

$$Y = (Z - M_K)H$$
  

$$M_K = (W - Y)G_K,$$
(2)

które po przekształceniach można doprowadzić do postaci:

$$Y = ZH - WG_{K}H + YG_{K}H$$
  
$$M_{K} = WG_{K} - ZG_{K}H + M_{K}G_{K}H$$
 (3)



Rys. 1. Układ z badanym obiektem o transmitancji H i dołączonym korektorem o transmitancji  $G_K$ : W – transformata wartości zadanej;  $M_K$  – transformata sygnału wyjściowego z korektora (sygnał słabej interakcji – oddziaływania  $G_K$  na H); Z – transformata zakłócenia wynikającego z oddziaływania otoczenia na obiekt; Y – transformata sygnału wyjściowego (użytkowego) obiektu

Wyznaczając H z (2) i po podstawieniu do (3) uzyskuje się zależność (4) opisującą zakłócenie Z działające na obiekt (którym w tym przypadku jest wyciek) w funkcji dostępnych sygnałów:  $Y, W, M_K$ .

$$Z = \frac{G_{K}(G_{K}W^{2} - YW - YM_{K} - WM_{K} + YM_{K})}{G_{K}W - G_{K}Y - M_{K}}$$
(4)

Zgodnie z powyższą zależnością i po uwzględnieniu, że sygnałem zadanym do korektora W jest wartość sygnału wyjściowego Y w chwili poprzedniej, zakłócenie (wyciek) może być identyfikowany bez znajomości transmitancji obiektu H, która wskutek powstałego uszkodzenia uległa zmianie i jest nieznana.

## 2.2. Koncepcja praktycznej realizacji metody

Praktyczna realizacja proponowanej metody polega na dołączeniu na początku i końcu diagnozowanego rurociągu dwóch korektorów badawczych o odpowiednio dobranych transmitancjach  $G_{IK}$  i  $G_{2K}$ . Dodatkowo dopuszcza się rozmieszczenie kilku takich korektorów wzdłuż rurociągu. Ich liczba będzie zależna m.in. od wielkości rurociągu. Schemat rurociągu z dołączonymi korektorami pokazano na rys. 2.

Schemat rozwiązania konstrukcji korektorów przedstawia rys. 3. Układy pomiarowe korektorów mierzą fluktuację przepływu pomiędzy badanym obiektem a korektorem. Pomiar ten dokonywany jest na elemencie typu kryza z użyciem czujnika różnicy ciśnień. Nastawa punktu pracy korektora (dostrajanie do sygnału z rurociągu) realizowana jest poprzez odpowiedni dobór: średnicy kryzy pomiarowej, przepony, ciśnienia w zasobniku, średnicy kryzy w kanale do zasobnika powietrznego.

Taka konstrukcja korektora powoduje znaczącą rekcję (zadziałanie korektora) w przypadku pojawienia się takich zjawisk, jak towarzyszące wyciekom zjawisko rozchodzenia się fal rozprężeniowych ciśnienia, szczególnie zaś fal o wyraźnie widocznych czołach, co ma miejsce w odniesieniu do nagle, jak i też tych nieco wolniej pojawiających wycieków.



Rys. 3. Schemat konstrukcji korektora: *I* – komora z cieczą; 2 – komora z powietrzem;
3 – przepona; 4 – kanał pomiarowy;
5 – kryza pomiarowa; 6 – czujnik różnicy ciśnień; 7 – kanał do zasobnika powietrza

Według przyjętych założeń, w oparciu o pozyskane sygnały słabych interakcji zostaną opracowane nowe procedury diagnozowania wycieków. Procedury te mają stanowić uzupełnienie już istniejących procedur bazujących na sygnałach ciśnienia, i mają być ukierunkowane na wykrywanie i lokalizowanie wycieków.

# 3. EKSPERYMENTALNA WERYFIKACJA METODY SŁABYCH INTERAKCJI MIĘDZYOBIEKTOWYCH

# 3.1. Harmonogram prac

W przypadku metody słabych interakcji międzyobiektowych podjęto decyzję, że jej eksperymentalna weryfikacja zostanie przeprowadzona w warunkach laboratoryjnych na stanowisku badawczym z rurociągiem modelowym.

Przyjęto, że sam przebieg weryfikacji będzie zgodny z ogólnymi zasadami diagnostyki, i obejmie etap zarówno badania diagnostycznego (pozyskiwanie sygnałów słabych interakcji), jak i etap wnioskowania diagnostycznego (ocenę możliwości zastosowania nowo pozyskanych sygnałów diagnozowania symulowanych do wycieków).

Co się tyczy harmonogramu prac w zakresie badania diagnostycznego, to został on określony następująco:

- budowa stanowiska badawczego z rurociągiem modelowym,
- opracowanie konstrukcji korektorów (kształt, wielkość, sposób podłączenia do rurociągu modelowego),
- zamontowane dwóch korektorów badawczych, po jednym na początku i na końcu rurociągu modelowego,
- dostrojenie korektorów do pracy rurociągu modelowego,
- przeprowadzenie badań z symulowanymi wyciekami (kilkuetapowych).

Po zrealizowaniu wyżej wymienionych zadań przystąpiono do weryfikacji metody (pozyskanych sygnałów słabych interakcji) w zakresie wnioskowania diagnostycznego.

# 3.2. Stanowisko badawcze

Schemat stanowiska badawczego pokazano na rysunku 4. Zasadniczym elementem stanowiska jest rurociąg modelowy o średnicy 34 mm i długości 380 m, którego widok przedstawiono na rys. 5.



Rys. 4. Schemat stanowiska badawczego: 1 – rurociąg modelowy; 2 – pompa o zmiennym wydatku; 3, 4 – zbiorniki; 5, 6 – stacje zaworów regulacyjnych; 7 – zawór regulacyjny małego biegu; 8 – zawór regulacyjny upustu



Rys. 5. Widok rurociągu modelowego i zamontowanych korektorów

Rurociąg modelowy, podobnie jak rzeczywiste obiekty wyposażono w odpowiednie standardowe przyrządy i przetworniki, umożliwiające pomiar ciśnienia, natężenia przepływu i temperatury. Przy czym pomiar tych wielkości dokonywany jest na wlocie i wylocie rurociągu, a w przypadku ciśnienia dodatkowo w czterech punktach wzdłuż jego długości.

Korektory badawcze do wywoływania sygnałów słabych interakcji zostały zamontowane na początku i na końcu rurociągu, w bliskim sąsiedztwie punktów pomiaru ciśnienia.

Informacje na temat poszczególnych urządzeń pomiarowych i ich lokalizacji zestawiono w tabeli 1.

Na bazie zastosowanych przetworników zbudowano komputerowy system pomiarowy. System działa w trybie off-line. Końcowym jego elementem (torów pomiarowych systemu) jest karta pomiarowa o zakresach wejść: 0÷10 V, -5÷5 V, dokładności: 0,16 % zakresu dla poszczególnego wejścia, max. częstotliwości próbkowania: do 100 kHz na jeden kanał pomiarowy.

Tab. 1.	Charakterystyki standardowych urządzeń
	pomiarowych i korektorów badawczych

	Wsnółrzedna		
Rodzaj urządzenia	wadhuż		
/charakterystyka	wzdiuz		
,	rurociągu [m]		
PRZETWORNIKI	$P_1 = 1$		
CIŚNIENIA	$P_3 = 75$		
	$P_4 = 141$		
zakres pomiar.: 0÷10 [bar]	$P_5 = 281$		
dokładność: 0,1 [%] zakresu	$P_6 = 355$		
	$P_2 = 378$		
PRZEPŁYWOMIERZE	$Q_1 = -6$		
ELEKTROMAGNETYCZNE	$Q_2 = 382,2$		
zakres pomiar.: 0÷200 [l/min]			
dokładność: 0,2 [%] zakresu			
KOREKTORY	$M_{K1} = -3$		
BADAWCZE	$M_{K2} = 379,2$		
czujniki różnicy ciśnień:			
MK1			
zakres pomiar.: -0,5÷0,5 [bar]			
dokładność: 0,2 [%] zakresu			
MK2			
zakres pomiar.: -0,2÷0,5 [bar]			
dokładność: 0,2 [%] zakresu			
MANOMETRY	$Pm_1 = -4$		
	$Pm_2 = 380,2$		
zakres pomiar.: 0÷16 [bar]			
dokładność 1 [%] zakresu			
TERMOMETRY	$T_1 = 7,5$		
	$T_2 = 382,8$		
dokładność: 0,5 [°C]			

# 3.3. Badania diagnostyczne z symulowanymi wyciekami

Zgodnie z przyjętym programem badań, po optymalnym dostrojeniu zamontowanych na rurociągu modelowym korektorów, przeprowadzono kilka serii eksperymentów diagnostycznych z symulowanymi wyciekami.

Prezentowane w pracy wyniki dotyczą zasadniczej serii badań, przeprowadzonej przy następujących warunkach pracy rurociągu:

- stabilnym ustalonym przepływie medium,
- 90 % wydatku pompy,
- dławieniu przepływu na końcu rurociągu;

oraz niżej określonych nominalnych wartościach parametrów przepływu:

- ciśnieniu na wlocie rurociągu około 5,7 bar,
- ciśnieniu na wylocie rurociągu około 2,2 bar,
- natężeniu strumienia około 95 l/min,
- temperaturze medium w przedziale 19÷24,5 °C.

Badania w tej serii obejmowały symulowanie wycieków o wielkościach 1÷8 % nominalnego natężenia przepływu, w pięciu wybranych punktach rurociągu modelowego o współrzędnych: 115, 155, 195, 235, 275 m. Przy czym były to wycieki nagłe, zadawane poprzez bardzo szybkie otwarcie zaworu kranika upustowego.

### 3.4. Nowo pozyskane sygnały diagnostyczne – sygnały słabych interakcji międzyobiektowych

Przykładowe przebiegi nowych sygnałów diagnostycznych – sygnałów słabych interakcji, uzyskane dla 2 % i 4 % wielkości wycieków, symulowanych w punktach o współrzędnych 115 i 275 m pokazano na rysunkach 6÷9. Dodatkowo, celem porównania, na każdym z rysunków przedstawiono przebiegi standardowych sygnałów ciśnienia

i natężenia przepływu (zmierzone w najbliższym sąsiedztwie punktów zamontowania korektorów).

W trakcie przeprowadzonych badań diagnostycznych ustalono, że pozyskiwanie sygnałów słabych interakcji jest łatwe do realizacji, a dołączenie do rurociągu korektorów nie wpływa na poprawność funkcjonowania samego rurociągu.

Ponadto dokonana analiza sygnałów słabych interakcji, oparta na ich porównaniu z sygnałami ciśnienia – potwierdziła, że cechuje je pełna wiarygodność.

# 3.5. Możliwość zastosowania sygnałów słabych interakcji międzyobiektowych w diagnostyce wycieków z rurociągów

Celem weryfikacji pozyskanych sygnałów słabych interakcji w zakresie wnioskowania diagnostycznego jest ocena możliwości ich zastosowania w diagnostyce wycieków do realizowania określonych zadań, tj.: wykrywania, lokalizowania lub szacowania wielkości powstałego wycieku. Na rys. 6-9 przedstawiono przebiegi czasowe zarejestrowanych sygnałów.











Rys. 8. Przebiegi sygnałów  $m_{\rm K1},\,m_{\rm K2},\,p_1,\,p_2,\,Q_1,\,Q_2$ dla 2 % wycieku zadanego na 275 m





Zasadniczym elementem takiej weryfikacji było opracowanie odpowiednich procedur i technik przetwarzania sygnałów słabych interakcji, zawierających odpowiednie algorytmy detekcyjne, które pozwalałyby na jak najszybsze wykrywanie wycieków, i o jak najmniejszej wielkości. Weryfikację przeprowadzono w oparciu o następujące założenia:

- porównanie wyników (czasów wykrycia symulowanych wycieków<sup>1</sup>) uzyskanych przy użyciu sygnałów słabych interakcji z wynikami uzyskanymi przy użyciu sygnałów ciśnienia i natężenia przepływu,
- wykrywanie symulowanych wycieków jedynie w oparciu o sygnały pomiarowe z dwóch urządzeń (czujników) rozmieszczonych na początku
  - i końcu rurociągu,
- próbkowanie sygnałów z częstotliwością 100 Hz,
- ustalenie wartości progu alarmowego dla poszczególnych porównywanych sygnałów w sposób zapewniający niewystępowanie alarmu dla stanów bez wycieku (w całej rozpatrywanej serii przeprowadzonych badań),
- możliwość użycia dotychczas wykorzystywanych procedur detekcji wycieków lub ich modyfikacja,
- uwzględnienie występowania zakłóceń zaszumienie porównywanych sygnałów szumem gaussowskim o odchyleniu standardowym równym 0,2 % i 0,5 % wielkości zakresu pomiarowego, i wynikająca stąd konieczność zmiany przyjętych progów alarmowych.

Uzyskane wyniki (czasy wykrycia symulowanych wycieków) dla przypadku użycia sygnałów ciśnienia  $Q_1$  i  $Q_2$  zamieszczono w tabeli 2. Przy czym zastosowano dotychczas wykorzystywaną procedurę [1], opartą o:

- filtrowanie rekursywne sygnałów, określane w literaturze przez *recursive averaging with fading memory (exponential smoothing)*; gdzie przyjęta nastawa współczynnika korekcyjnego dla filtra wynosiła  $\alpha$ =0,995,
- funkcje korelacji residuów sygnałów, obliczane rekursywnie dla poszczególnych przesunięć czasowych  $\tau=1...\tau_{max}$ ; gdzie przyjęta nastawa współczynnika korekcyjnego dla filtra wynosiła  $\beta=0,900$ , a przesunięcia  $\tau_{max}=100$  sec,
- sumę obliczonych funkcji korelacji dla zakresu przesunięcia czasowego opisanego przez τ<sub>max</sub>, która gdy przekroczy wartość progu alarmowego informuje o pojawieniu się wycieku.

Uzyskane wyniki (czasy wykrycia symulowanych wycieków) dla przypadku użycia sygnałów ciśnienia  $p_1$  i  $p_2$  zamieszczono w tabeli 3.

Natomiast w tabeli 4 przedstawiono wyniki (czasy wykrycia symulowanych wycieków) uzyskane dla przypadku użycia sygnałów słabych interakcji  $m_{K1}$  i  $m_{K2}$ .

Przy czym w odniesieniu do sygnałów ciśnienia, i sygnałów słabych interakcji zastosowano następującą opracowaną procedurę, opartą o:

- filtrowanie rekursywne sygnałów; gdzie przyjęto identyczne nastawy współczynników korekcyjnych dla filtrów α=0,995,
- obliczanie maksimum funkcji korelacji residuów sygnałów dla zakresu przesunięcia czasowego  $\tau_{max}$ ; gdzie przyjęto  $\tau_{max}=100 \ sec$ ,
- filtrowanie rekursywne obliczonych maksimów funkcji korelacji, która gdy przekroczy wartość progu alarmowego informuje o pojawieniu się wycieku; gdzie przyjęte nastawy współczynników korekcyjnych dla filtrów wynosiły  $\gamma$ =0,900.

Czasy wykrycia symulowanych wycieków zamieszczone w tabelach zostały podane w sekundach, a fakt braku wykrycia określonej wielkości wycieku oznaczono przez "–". Każda z tabel zawiera ponadto informacje o przyjętych wartościach progów alarmowych, zapewniających niewystępowanie alarmu w stanach bez wycieku (w całej rozpatrywanej serii przeprowadzonych badań).

Analiza wyników (czasów wykrycia symulowanych wycieków i wielkości wykrywanych wycieków) potwierdza, że przy użyciu sygnałów słabych interakcji  $m_{K1}$  i  $m_{K2}$  możliwe jest prowadzenie zadawalająco skutecznej działalności diagnostycznej w kierunku wykrywania wycieków.

Co istotne, w odróżnieniu od dotychczas stosowanych sygnałów ciśnienia i natężenia przepływu, sygnały słabych interakcji są bardziej odporne na zakłócenia i wynikającą stąd konieczność zmiany wartości progów alarmowych. W przypadku zaszumienia sygnałów słabych interakcji wartości progów alarmowych nie uległy zmianie, gdzie dla porównania w przypadku sygnałów ciśnienia i natężenia przepływu po identycznym ich zaszumieniu wartości progów alarmowych należało zmienić na kilkukrotnie większe. Jak pokazano w tabelach 2 i 3, samej wartości progów zastosowanie tej alarmowych, uzyskanych przykładowo przy zaszumieniu sygnałów ciśnienia i natężenia przepływu szumem o odchyleniu standardowym równym 0,5 % wielkości zakresu pomiarowego, sygnałów w przypadku niezaszumianych skutkowałoby wydłużeniem czasów wykrycia oraz nie wykryciem wielu wycieków.

176

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Czas wykrycia symulowanego wycieku, traktowany jako przekroczenie przyjętej wartości progu alarmowego, obliczany był względem początku wycieku (określonego przez moment otwarcia zaworu kranika upustowego).

Tab. 3. Zestawienie czasów wykrycia symulowanych wycieków dla przypadku użycia sygnałów ciśnienia p<sub>1</sub> i p<sub>2</sub>; gdzie: C – wielkość progu, zapewniająca nie wystąpienie alarmu dla stanu bez wycieku, D – wielkość progu uzyskana dla sygnałów zaszumianych szumem o odchyleniu standardowym 0,5 % wielkości zakresu pomiarowego

		nie zasz	rumiane	szum <sub>0,2</sub>	szum <sub>0,5</sub>
miejsce	wielk.	С	D	С	С
[m]	$[\%] Q_0$	0,005	0,092	0,018	0,092
	1,0	1,16	-	1,35	-
	1,5	0,82	-	0,98	1,48
	2,0	0,84	1,87	0,93	1,31
	2,5	1,01	1,62	1,09	1,31
115	3,0	0,79	1,33	0,96	1,11
	3,5	0,63	1,21	0,83	1,08
	4,0	0,60	1,16	0,82	1,03
	6,0	0,75	1,00	0,78	0,93
	8,0	0,58	1,00	0,61	0,84
	1,0	1,20	-	1,39	_
	1,5	0,95	-	1,02	1,71
	2,0	1,12	2,26	1,19	1,51
	2,5	0,40	0,67	0,42	0,51
155	3,0	0,91	1,32	0,94	1,13
	3,5	0,87	1,19	0,92	1,05
	4,0	0,74	1,02	0,79	0,90
	6,0	0,71	0,92	0,76	0,87
	8,0	0,72	0,90	0,75	0,85
	1,0	1,03	-	1,14	_
	1,5	0,85	_	0,93	1,28
	2,0	0,83	1,65	0,90	1,26
	2,5	0,77	1,29	0,82	1,03
195	3,0	0,77	1,15	0,82	0,94
	3,5	0,74	1,06	0,76	0,88
	4,0	0,70	0,93	0,72	0,81
	6,0	0,72	0,87	0,75	0,82
	8,0	0,65	0,77	0,67	0,73
	1,0	1,03	_	1,28	_
	1,5	0,90	_	1,01	1,74
	2,0	0,86	1,64	0,87	1,05
	2,5	0,73	1,40	0,84	1,04
235	3,0	0,73	1,29	0,85	0,97
	3,5	0,83	1,14	0,80	1,00
	4,0	0,59	1,08	0,69	0,92
	6,0	0,77	0,99	0,74	0,86
	8,0	0,78	1,00	0,70	0,87
	1,0	1,12	_	1,26	_
	1,5	0,92	-	0,95	1,44
	2,0	0,79	_	0,97	1,18
	2,5	0,78	1,72	0,91	1,12
275	3,0	0,71	1,37	0,72	1,14
	3,5	0,76	1,30	0,81	1,00
	4,0	0,83	1,25	0,93	1,02
	6,0	0,44	1,07	0,57	0,78
	8,0	0,50	1,01	0,46	0,62

Tab. 2. Zestawienie czasów wykrycia symulowanych wycieków dla przypadku użycia sygnałów przepływu Q<sub>1</sub> i Q<sub>2</sub>; gdzie: C – wielkość progu, zapewniająca nie wystąpienie alarmu dla stanu bez wycieku, D – wielkość progu uzyskana dla sygnałów zaszumianych szumem o odchyleniu standardowym 0,5 % wielkości zakresu pomiarowego

		nie zasz	zumiane	szum <sub>0,2</sub>	szum <sub>0,5</sub>
miejsce	wielk. [%] Q <sub>0</sub>	С	D	С	С
[m]		-0,014	-0,055	-0,026	-0,055
	1,0	2,25	_	2,37	2,69
	1,5	2,91	_	3,35	3,76
	2,0	2,43	3,47	2,60	2,67
	2,5	1,98	2,56	2,18	2,50
115	3,0	1,81	2,26	1,89	2,10
	3,5	1,71	2,01	1,82	2,01
	4,0	1,72	2,04	1,84	1,96
	6,0	1,60	1,79	1,65	1,76
	8,0	1,53	1,69	1,63	1,69
	1,0	2,34	_	-	_
	1,5	2,56	4,41	2,75	3,28
	2,0	2,22	3,75	2,36	2,80
	2,5	0,97	1,29	1,01	1,19
155	3,0	1,81	2,28	2,03	2,24
	3,5	1,91	2,39	2,11	2,32
	4,0	1,71	1,98	1,82	1,91
	6,0	1,46	1,75	1,59	1,72
	8,0	1,41	1,63	1,50	1,62
	1,0	_	_	_	_
	1,5	2,04	_	2,59	2,66
	2,0	1,96	2,98	2,26	2,46
	2,5	2,26	2,89	2,46	2,78
195	3,0	1,82	2,47	1,98	2,33
	3,5	1,74	2,13	1,86	2,09
	4,0	1,68	1,97	1,81	1,96
	6,0	1,66	1,91	1,76	1,91
	8,0	1,31	1,62	1,42	1,58
	1,0	_	_	_	_
	1,5	2,35	_	_	_
	2,0	2,01	2,95	2,43	2,85
	2,5	2,09	2,74	2,26	2,67
235	3,0	1,95	2,64	2,15	2,65
	3,5	1,89	2,24	2,10	2,22
	4,0	1,97	2,31	2,05	2,29
	6,0	1,79	2,00	1,87	2,01
	8,0	1,61	1,84	1,69	1,79
275	1,0	_	_	_	_
	1,5	3,11	_	3,72	_
	2,0	2,34	3,34	2,70	3,44
	2,5	2,00	2,66	2,30	3,16
	3,0	2,21	2,56	2,36	2,50
	3,5	2,09	2,45	2,21	2,48
	4,0	2,11	2,47	2,22	2,46
	6,0	1,95	2,16	2,04	2,18
	8,0	1,54	1,80	1,65	1,82

Tab. 4. Zestawienie czasów wykrycia symulowanych wycieków dla przypadku użycia sygnałów słabych interakcji m<sub>K1</sub> i m<sub>K2</sub>; gdzie: C – wielkość progu, zapewniająca nie wystąpienie alarmu dla stanu bez wycieku; D – wielkość progu uzyskana dla sygnałów zaszumianych szumem o odchyleniu standardowym 0,5 % wielkości zakresu pomiarowego

		nie zaszumiane	szum <sub>0,2</sub>	szum <sub>0,5</sub>
miejsce	wielk. [%] Q <sub>0</sub>	C = D	С	С
[m]		0,570	0,570	0,570
	1,0	_	_	_
	1,5	1,11	1,10	1,09
	2,0	1,04	1,04	1,02
	2,5	1,04	0,94	0,91
115	3,0	0,82	0,82	0,80
	3,5	0,90	0,89	0,88
	4,0	0,81	0,81	0,80
	6,0	6,0 0,64		0,61
	8,0	0,60	0,59	0,58
	1,0	—	_	-
	1,5	1,12	1,10	1,06
	2,0	1,16	1,16	1,15
	2,5	0,41	0,41	0,41
155	3,0	0,91	0,92	0,91
	3,5	0,87	0,87	0,86
	4,0	0,75	0,74	0,73
	6,0	0,71	0,71	0,71
	8,0	0,74	0,74	0,73
	1,0	—	—	-
	1,5	0,94	0,94	0,92
	2,0	0,87	0,87	0,86
	2,5	0,81	0,81	0,80
195	3,0	0,80	0,80	0,80
	3,5	0,76	0,76	0,75
	4,0	0,71	0,71	0,71
	6,0	0,72	0,72	0,71
	8,0	0,66	0,66	0,65
	1,0	_	_	_
	1,5	1,02	1,01	0,97
	2,0	0,91	0,90	0,90
	2,5	0,87	0,86	0,85
235	3,0	0,74	0,74	0,75
	3,5	0,86	0,86	0,85
	4,0	0,61	0,61	0,60
	6,0	0,81	0,81	0,81
	8,0	0,80	0,79	0,78
	1,0	_	_	—
	1,5	1,02	1,03	1,03
	2,0	1,06	1,05	1,04
_	2,5	1,00	1,00	0,77
275	3,0	0,74	0,74	0,74
	3,5	1,00	1,00	1,00
	4,0	0,98	0,98	0,98
	6,0	0,44	0,44	0,45
	8,0	0,50	0,57	0,51

## PODSUMOWANIE

Prezentowane etapowe wyniki eksperymentalnej weryfikacji proponowanej metody słabych interakcji międzyobiektowych, przeprowadzonej na stanowisku badawczym z rurociągiem modelowym, potwierdzaja, że odpowiednio dobrane i dołączone do diagnozowanych rurociagów korektory, spełniające rolę obiektów badawczych, stwarzają możliwość pozyskiwania cennej informacji diagnostycznej, pozwalającej na polepszenie podatności diagnostycznej rurociągów, a stąd zwiększenie skuteczności diagnozowania wycieków.

# LITERATURA

- [1] Billman L., Isermann R.: *Leak detection methods for pipelines*; Automatica, vol. 23, no. 3, pp. 381-385, 1987.
- [2] Korbicz J. i inni: Diagnostyka procesów. Modele, metody sztucznej inteligencji, zastosowania; WNT, Warszawa 2002.
- [3] Lindstedt P.: *Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy*; Wydawnictwo Naukowe Askon, Warszawa 2002.
- [4] Lindstedt P.: Element korekcyjny jako źródło informacji diagnostycznej; ZEM PAN, zeszyt 2, 1995.
- [5] Lindstedt P., Ostapkowicz P.: Diagnosing of the leakages from pipelines based on signals of weak interobject interactions; Archiwum Transportu, Komitet Transportu PAN, tom 2, str. 17-31, Warszawa 2004.
- [6] Niederliński A.: Systemy komputerowe automatyki przemysłowej; tom 2, WNT, Warszawa 1985.
- [7] Skinners S.: *Modern control system. Theory and application;* Addison Wesely 1972.
- [8] Sobczak R.: Lokalizacja wycieków z rurociągów; Pomiary Automatyka Robotyka, nr 3, str. 11-16, 1999.
- [9] Söderström T., Stoica P.: *Identyfikacja* systemów; PWN, Warszawa 1997.

Praca finansowana przez Politechnikę Białostocką – praca statutowa S/WM/3/06.



Mgr inż. **Paweł** OSTAPKOWICZ – w 1998 roku ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej, gdzie obecnie pracuje jako asystent, i ma otwarty przewód doktorski.

Tematyka badawcza: budowa i eksploatacja maszyn,

automatyka, miernictwo dynamiczne, diagnostyka maszyn. Prace naukowe dotyczą głównie: diagnozowania wycieków z rurociągów, polepszania podatności diagnozowanych obiektów technicznych, wibroakustyki.

# KOMPLEKSOWA DIAGNOSTYKA W PROCESIE OCENY JAKOŚCI SILNIKA ŚMIGŁOWCOWGO W INŻYNIERYJNO – LOTNICZYM OTOCZENIU

## Paweł LINDSTEDT

# Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Robotyki 15-351 Białystok, ul. Wiejska 45C

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono nową kompleksową metodę diagnostyki turbinowego silnika śmigłowcowego Allison 250. Metoda ta bazuje na syntetycznych sygnałach diagnostycznych wynikających z jednoczesnego zastosowania trzech autonomicznych metod diagnozowania (funkcjonalnej, wibroakustycznej i tribologicznej) i sygnałów otoczenia opisanych liczbą przekroczeń progów diagnostycznych tych sygnałów. Ten sposób opisu pozwala ustalić ilościowe relacje między sygnałami diagnostycznymi i otoczenia i parametrami stanu technicznego obiektu. Przeprowadzono diagnostykę układu łożyskowania dwóch silników Allison 250 zabudowanych na śmigłowcu PZL-KANIA. Wykazano rzeczywiste różnice stanu technicznego badanych układów łożyskowania oraz wpływ jakości użytkowania na ich stan techniczny.

Słowa kluczowe: kompleksowa metoda diagnozowania, silnik śmigłowcowy, układ łożyskowania.

# THE COMPLEX DIAGNOSTICS IN PROCESS OF OPINION OF QUALITY HELICOPTER'S ENGINE IN THE ENGINEERING – AIR SURROUNDINGS

#### Summary

The new complex method of diagnostics of helicopter's turbine engine Allison 250 in work was introduced. Method this be bases on synthetic diagnostic signals of resulting with simultaneous use three autonomic methods of diagnosing (functional, vibroacustical and tribological) and of surroundings described with number of crossings of diagnostic sill timbers of these signals. This way of description permits to establish between diagnostic signals quantitative reports and the surroundings and the state of technical object. It the diagnostics of arrangement bearings was conducted was two engines Allison 250 built-up on helicopter PZL-KANIA. It the real differences of technical state were showed was the tested arrangements bearings as well as influence of quality of use on their technical state.

Keywords: complex method of diagnosing, helicopter's turbine engine, bearing system.

# 1. WSTĘP

śmigłowcowe (np. Silniki Allison 250, GTD - 350) sa złożonymi i kosztownymi obiektami technicznymi. Powinnv spełniać wysokie wymagania obsługowe i użytkowe oraz trwałościowe i niezawodnościowe. Są przykładem obiektów, które często pracują w zmiennym i uciążliwym otoczeniu, co wynika z trudnych, niestacjonarnych warunków lotu i z często nadmiernie wygórowanych zadań wynikających z planowanych programów ich wykorzystywania. Tego typu obiekty techniczne (szczególnie silniki, których resurs wynosi 3500 i więcej godzin) wymagają szczególnie sumiennej obsługi technicznej a także dokładnego przestrzegania zasad ich użytkowania. Służby inżynieryjno - lotnicze tego typu silników turbinowych stają przed skomplikowanymi zadaniami, które będą mogły być skutecznie rozwiązywane przez permanentne

stosowanie kompleksowej diagnostyki technicznej w procesie ich obsługi i użytkowania [1, 2, 7].

## 2. BUDOWA I DZIAŁANIE SILNIKA ALLISON 250

Schemat ideowy silnika Allison 250 przedstawiono na rysunku 1. Główne zespoły silnika to: zespół sprężarki, zespół turbiny, układ łożyskowania, skrzynka napędów, komora spalania oraz układ automatycznej regulacji silnika [6, 7, 8].

Zespół sprężarki składa się z dwóch podpór sprężarki, sześciostopniowego osiowego i jednostopniowego odśrodkowego zespołu wirnika, zespołu kadłuba sprężarki i zespołu dyfuzora, z którego doprowadzane jest powietrze dwoma przewodami od sprężarki do komory spalania.

Zespół turbin składa się z: podpory turbiny wysokiego ciśnienia, podpory turbiny napędowej, kolektora wydechowego, dwustopniowego wirnika turbiny wysokiego ciśnienia i dwustopniowego wirnika turbiny napędowej. Turbina wysokiego ciśnienia napędza sprężarkę oraz skrzynkę napędów agregatów. Turbina napędowa wytwarza moc wyjściową silnika przekazywaną do wirnika głównego i ogonowego.

Skrzynka napędowa ma dwustopniową przekładnię zębatą (reduktor) do zredukowania prędkości obrotowej turbiny napędowej (33290 obrotów/min) do prędkości obrotowej wału napędowego (6016 obrotów/min). Od reduktora dodatkowo napędzane są: prądniczka obrotomierza turbiny napędowej i regulator obrotów turbiny napędowej. Skrzynka napędów ma także układ kinematyczny, który napędza prądnicę prądu stałego, pompę paliwową, prądniczkę obrotomierza turbiny wysokiego ciśnienia oraz reduktor obrotów turbiny wysokiego ciśnienia.

Układ łożyskowania składa się z dziewięciu łożysk tocznych. Podporami wirnika turbosprężarki są łożyska Nr 1, 2, 7 i 8, a turbiny napędowej – łożyska 3, 4, 5, 6. Łożysko 2 <sup>1</sup>/<sub>2</sub> jest specjalnym podparciem wału sprężarki wewnątrz koła napędzającego reduktor.

Komora spalania zbudowana jest z zewnętrznej osłony i rur żarowych. Wtryskiwacz oraz świeca zapłonowa zamocowane są w tylnej części zewnętrznej osłony komory spalania.



Rys. 1. Budowa silnika Allison 250 C20B: 1 – sprężarka, 2 – skrzynka przekładniowa, 3 – kolektor wydechowy, 4 – turbina napędowa, 5 – turbosprężarka, 6 – komora spalania, 7 – układ łożyskowania

Układ automatycznej regulacji silnika typu Bendix składa się z regulatora obrotów turbiny wysokiego ciśnienia RT–S i regulatora obrotów turbiny napędowej RTN oraz z dźwigni rodzaju pracy reduktora obrotów turbiny wysokiego ciśnienia DRP<sub>T–S</sub> i dźwigni skoku i mocy regulatora obrotów turbiny napędowej DRM<sub>TN</sub>.

W skład układu wchodzi też pompa P [6, 10].

Powietrze z otoczenia  $(\dot{m}_1, p_H, t_H)$  zasysane jest do wlotu sprężarki i sprężane do wartości  $p_2$  a następnie przez spiralny dyfuzor i dwa przewody rurowe doprowadzane jest do komory spalania. W zależności od potrzeb wynikających z rodzaju pracy silnika (bieg "jałowy" lub "lot") oraz obciążenia (zmiana skoku łopat) wirnika głównego i ogonowego (M<sub>R</sub>, M<sub>O</sub>) do komory spalania (KS) doprowadzane jest przez wtryskiwacze paliwo o odpowiednim masowym natężeniu ( $\dot{m}_p$ ), którego

wartość regulowana jest przez regulatory: RTN i RT–S. Gazy spalinowe odprowadzane są do turbiny wysokiego ciśnienia T–S, a następnie na turbinę niskiego ciśnienia – napędową TN.

Podczas uruchamiania silnika (rys. 2) dźwignia rodzaju pracy (DRP<sub>T-S</sub>) ustawiana jest w położenie BIEG JAŁOWY. W tym czasie regulator RT-S na podstawie aktualnych ciśnień powietrza  $p_2$ ,  $p_r$ ,  $p_g$ , działających na wykonawcze mieszki sprężyste tego regulatora, sterują igłą zaworu dozującego regulatora RT-S. Po uruchomieniu silnika dźwignia DRP<sub>T-S</sub> zostaje przestawiona do przodu w położenie "LOT". W tym położeniu dźwigni DRP<sub>T-S</sub>, regulator RT-S sterowany jest przez regulator turbiny napędowej RTN. Wtedy podczas użytkowania śmigłowca przestawiana jest dźwignia skoku i mocy (DRM) np. na większy kat nastawienia łopat wirnika. Wzrośnie wtedy obciążenie turbiny napędowej a stąd powstaje tendencja do spadku jej predkości obrotowej do N2. Fakt ten wywoła zadziałanie korekcyjne regulatora RTN, który przestawi regulator RT-S na większe zużycie paliwa, co w konsekwencji spowoduje zwiększenie N1 tak, by N2 była stała. W ten sposób układ zawsze powraca do wymaganego stanu równowagi. Przedstawiony sposób współdziałania regulatorów RNT, RT-S powtarza się dla innych spotykanych przypadków pracy w różnorodnym otoczeniu.

Diagnostykę silnika śmigłowcowego Allison 250 prowadzi się po jego podzieleniu na podatne na diagnostycznie moduły diagnostyczne [4, 5, 9].

Podział ten najczęściej wynika z rozwiązania konstrukcyjnego silnika. Modułami diagnostycznymi silnika mogą zatem być jego główne zespoły: zespół sprężarki, zespół turbin, układ łożyskowania, itp. (rys. 1).

Newralgicznym zespołem silnika jest układ łożyskowania. Dlatego właśnie on ujęty w zmiennym otoczeniu wynikającym z pracy silnika może stać się reprezentatywnym przykładem kompleksowego diagnozowania złożonego obiektu z uwzględnieniem warunków użytkowania [6, 8].
DIAGNOSTYKA'3 (39)/2006 LINDSTEDT, Kompleksowa diagnostyka w procesie oceny jakości silnika śmigłowcowego..



Rys. 2. Ideowy schemat gazodynamiczny silnika śmigłowcowego z turbiną napędową – typu Allison 250: W - wlot; S - sprężarka; TN - turbina napędowa wirnika; T-S - zespół turbosprężarki; KS – komora spalania; RTN – regulator TN; RT–S – regulator T–S; R – reduktor; PG - przekładnia główna; WG - wirnik główny (nośny); WO - wirnik śmigła ogonowego;  $p_{\rm H}$ ,  $t_{\rm H}$ ,  $\dot{m}_H$  – ciśnienie, temperatura, masowe natężenie przepływu powietrza na wejściu do wlotu silnika;  $p_1^*, t_1^*, \dot{m}_1$  – ciśnienie spiętrzenia, temperatura spiętrzenia, masowe natężenie przepływu powietrza na wejściu do sprężarki;  $p_2^*$ ,  $t_2^*$ ,  $\dot{m}_2$  – ciśnienie spiętrzenia, temperatura spiętrzenia, masowe natężenie przepływu powietrza na wyjściu sprężarki;  $p_3^*$ ,  $t_3^*$ ,  $\dot{m}_3$  – ciśnienie spiętrzenia, temperatura spiętrzenia, masowe natężenie przepływu gazów spalinowych na wejściu turbiny wysokiego ciśnienia;  $p_4^*$ , TOT,  $\dot{m}_4$  – ciśnienie spiętrzenia, temperatura spiętrzenia, masowe natężenie przepływu gazów spalinowych na wejściu turbiny niskiego ciśnienia; M<sub>TN</sub>, M<sub>R</sub>, M<sub>O</sub> – moment turbiny napędowej, moment roboczy wirnika nośnego, moment śmigła ogonowego;  $n_{R}$ ,  $n_{Q}$ - prędkości obrotowe wirnika nośnego i ogonowego; DRP<sub>T-S</sub>, DRM<sub>TN</sub> - sygnały zadane do regulatorów: rodzaju pracy zespołu turbina – sprężarka oraz skoku i mocy; n(N1), n(N2) – prędkości obrotowe na wejściu do regulatorów; N1, N2 - prędkości obrotowe T-S i TN; pg, prciśnienie regulujące i regulowane; 1, 2, 2 1/2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 – łożyska układu łożyskowania wirników i koła napędowego reduktora

## 3. BUDOWA, DZIAŁANIE I NIEZAWODNOŚĆ UKŁADU ŁOŻYSKOWANIA SILNIKA ALLISON 250

Schemat układu łożyskowania silnika Allison 250 przedstawiono na rys. 3.

Układ łożyskowania (rys. 3) składa się z dziewięciu łożysk umieszczonych w podporach

silnika i jednego łożyska umieszczonego wewnątrz koła napędzającego reduktor [6].

Łożyska nr 1 i 2 (kulkowe) stanowią podpory sprężarki. Koło napędzające reduktor, połączone jest z wałem turbiny napędowej i jest osadzone na łożyskach nr 3 i 4. Podporami wału turbiny napędowej są łożyska nr 5 (kulkowe) i nr 6 (rolkowe). Wał turbiny wysokiego ciśnienia osadzony jest na łożyskach nr 7 (rolkowe) i nr 8 (kulkowe). W płaszczyźnie łożyska nr 3 osadzone jest łożysko 2 <sup>1</sup>/<sub>2</sub>, którego bieżnią zewnętrzną jest wewnętrzna powierzchnia napędzającego koła zębatego, a bieżnią wewnętrzną powierzchnia łącznika łączącego sprężarkę z wałem turbiny wysokiego ciśnienia.



Rys. 3. Schemat układu łożyskowania silnika Allison 250: 1 – sprężarka, 2 – wał turbiny wys. ciśnienia, 3 – koło napędzające reduktora, 4 – wał turbiny napędowej, 5 – turbina napędowa, 6 – turbina wys. ciśnienia

Układ łożyskowania jest zespołem pracującym w trudnym otoczeniu innych zespołów silnika. Z tego względu diagnozowany jest jednocześnie trzema autonomicznymi metodami diagnozowania: funkcjonalną, wibroakustyczną i tribologiczną. Praktyka wykazała, że pojawiają się niezgodności ocenach stanu technicznego układu, w wypracowanymi metoda funkcjonalna, wibroakustyczna i tribologiczna. Wynika to z faktu, że każda z wymienionych wyżej metod jest niejednakowo czuła na różnego rodzaju zmiany stanu technicznego (funkcjonalna - tarcie, inne opory; tribologiczna - ścieranie, erozja, korozja; wibroakustyczna - pęknięcia, deformacje). Stąd się potrzeba opracowania nowej pojawiła (uzupełniajacej do metod autonomicznych) kompleksowej metody diagnozowania. Znamienną cecha tej nowej metody jest to, że do opracowania diagnozy wykorzystuje się jednocześnie wszystkie sygnały diagnostyczne układu łożyskowania i wszystkie sygnały jego otoczenia [5, 6, 7, 8].

## 4. KOMPLEKSOWA METODA DIAGNOZOWANIA UKŁADU ŁOŻYSKOWANIA

W praktyce układ łożyskowania jest jednocześnie diagnozowany trzema metodami [6]:

- funkcjonalną (sygnałem diagnostycznym jest czas wybiegu wirnika t<sub>w</sub>),
- tribologiczną (sygnałem diagnostycznym jest koncentracja produktów zużycia w oleju smarującym układ – Z),
- wibroakustyczną (sygnałem diagnostycznym jest przyspieszenie amplitudy drgań na kadłubie przedniego łożyska (nr 1) na kadłubie wirnika turbiny wysokiego ciśnienia i turbiny napędowej (łożysk 6 i 7) – sygnały W1 i W2),

z uwzględnieniem otoczenia, którym w danym przypadku jest zbiór sygnałów wynikających z pracy

innych niż układ łożyskowania zespołów silnika. Sygnałami tymi są:

- prędkość obrotowa turbiny wysokiego ciśnienia N1,
- prędkość obrotowa turbiny napędowej N2,
- temperatura gazów wylotowych TOT,
- ciśnienie oleju w układzie smarowania pol,
- masowe natężenie przepływu m<sub>ol</sub>,
- temperatura oleju t<sub>d</sub>.

Całościowa ocena stanu technicznego układu łożyskowania wymaga jednoczesnego skorelowania zmierzonych w/w svgnałów diagnostycznych i sygnałów otoczenia. Zrealizowanie tego wymagania jest trudne, ponieważ sygnały otoczenia i diagnostyczne są różnej natury fizycznej. Dostrzeżono, że wszystkie przebiegi sygnałów mogą być sprowadzone do jednakowo uformowanej postaci i ilościowo opisane za pomocą liczb przekroczeń progów diagnostycznych sygnałów diagnostycznych i otoczenia.

Ta nowa abstrakcyjna postać sygnałów diagnostycznych i otoczenia pozwala jak się okazuje opisać relacje między tymi sygnałami a następnie dokonać ich przetworzenia na stan techniczny obiektu. Staje się zatem podstawą do kompleksowej diagnostyki układu łożyskowania. Syntetyczny sygnał otoczenia (w postaci liczby przekroczeń progów diagnostycznych) można wyznaczyć z zależności:

$$U = \sqrt{N_{N1}^2 + N_{N2}^2 + N_{TOT}^2 + N_{pol}^2 + N^2 + N_{mol}^2 + N_{tol}^2}$$
(1)

gdzie: N z odpowiednim indeksem odpowiada liczbie przekroczeń progów diagnostycznych sygnałów otoczenia.

Syntetyczny sygnał diagnostyczny (w postaci liczby przekroczeń progów diagnostycznych) można wyznaczyć z zależności:

$$D_K = \sqrt{N_F^2 + N_W^w + N_Z^2}$$
(2)

gdzie:  $N_F$  – liczba przekroczeń diagnostycznych progów sygnałów diagnostyki funkcjonalnej,  $N_W$  – liczba przekroczeń diagnostycznych progów sygnałów diagnostyki wibroakustycznej,  $N_Z$  – liczba przekroczeń diagnostycznych progów sygnałów diagnostyki tribologicznej.

Sposób sprowadzania przebiegów dowolnych sygnałów do liczby przekroczeń progów sygnałów diagnostycznych przedstawiono na rysunku 4.

Relacje miedzy kompleksowymi syntetycznymi sygnałami diagnostycznymi i otoczenia wyrażonymi w postaci liczb przekroczeń progów diagnostycznych i stanem technicznym można opisać równaniem stanu:

$$\frac{\Delta D_K}{\Delta \theta} = a D_K + b U \tag{3}$$

gdzie: a – parametr stanu technicznego, b – parametr intensywności użytkowania i oddziaływania otoczenia na układ.



Rys. 4. Sposób przetworzenia sygnału (w czasie dynamicznym t lub w czasie eksploatacyjnym  $\theta$ ) na liczby przekroczeń progu diagn.: gdzie:  $s_{sr}$  – wart. średnia sygnału,  $s_{pr}$  – wart. progowa sygnału, w1÷w5 – wagi przekroczeń (odpowiednio np. od 1 do 5)

Postępując zgodnie z zasadami identyfikacji statycznej [3, 11] otrzymuje się:

$$\hat{a} = -\frac{b}{a}$$

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^{n} D_{Ki} U_i}{\sum_{i=1}^{n} U_i^2}$$
(4)

Jak widać z wzoru (4) statyczny parametr stanu  $\hat{a}$  wyznacza się z dostępnych sygnałów D<sub>K</sub> oraz U w kolejnych i – tych chwilach. Dalej można zapisać:

$$\frac{\Delta D_{K}}{\Delta \theta} = a D_{K} + a \hat{a} U \tag{5}$$

Ostatecznie poszukiwany parametr stanu technicznego "a" układu łożyskowania można wyznaczyć z zależności:

$$a = \frac{\Delta D_K}{\Delta \theta (D_K + \hat{a}U)} \tag{6}$$

Parametr "a" pozwala obserwować kompleksowe zmiany stanu technicznego w procesie eksploatacji tego samego układu łożyskowania oraz różnice stanu technicznego jaki mają układy łożyskowania różnych silników także zabudowanych na tym samym statku powietrznym.

## 5. DIAGNOSTYKA UKŁADÓW ŁOŻYSKOWANIA SILNIKÓW ALLISON 250 NR 836788 (LEWY) i 836791 (PRAWY) ZABUDOWANYCH NA ŚMIGŁOWCU PZL–KANIA

Wyniki badań diagnostycznych i otoczenia układu łożyskowania przedstawiono odpowiednio w tabeli 1 i 2.

Tab. 1. Nalot i liczby przekroczeń sygnałów diagnostycznych i otoczenia silnika Allison 250 nr 836791 (prawy)

Nalot	Diagn.	Diagn.	Diagn. funkci.	Diagn.	Otocz. ukł.
	tribolog.		ukł.łożysk.	kompleks.	łożysk.
θ				D <sub>K</sub>	U
191	2,43	-	-	2,43	
297	0,00	-	-	0,00	0,48
395	2,84	-	-	2,84	1,63
500	0,83	-	-	0,83	2,19
600	5,45	-	-	5,45	1,19
698	0,00	-	-	0,00	0,00
798	4,97	-	-	4,97	0,61
879	2,63	-	-	2,63	1,35
891	1,42	-	-	1,42	0,00
912	1,07	-	-	1,07	3,81
931	0,45	-	-	0,45	0,47
1000	0,00	-	-	0,00	0,00
1020	0,21	-	-	0,21	4,60
1100	0,88	-	-	0,88	3,46
1166	0,00	-	-	0,00	6,87
1196	2,20	-	-	2,20	1,11
1230	2,14	-	-	2,14	0,00
1269	0,02	-	-	0,02	0,00
1322	2,28	-	-	2,28	1,92
1356	2,21	0,00	0,78	2,34	1,45
1397	5,62	0,00	0,00	5,62	0,47
1399	3,64	0,00	0,00	3,64	0,00
1411	3,90	7,80	0,00	8,72	0,00
1460	0,33	1,16	0,00	1,21	0,00
1494	0,21	0,00	0,00	0,21	0,00
1520	1,26	2,31	0,75	2,74	0,00
1594	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1642	0,00	1,26	0,00	1,26	0,00
1666	1,87	0,00	0,00	1,87	6,31

Tab.	3.	Nalot i	wartości parametru a siln	ika
			Allison 250 nr 8367	791

-							
Nalot	Diagn. komp	Otocz	Δθ	$\Delta D_{\nu}$	ΔU	â	а
θ	Dk	U	40		40	u	u
191	2,43	0,00	191	2,43	0,00	-1,3843	0,0052
297	2,43	0,48	297	0,00	0,48	-1,3843	0,0000
395	5,27	2,59	395	2,84	1,63	-1,3843	0,0043
500	6,10	4,30	500	0,83	2,19	-1,3843	0,0114
600	11,55	5,49	600	5,45	1,19	-1,3843	0,0023
698	11,55	5,49	698	0,00	0,00	-1,3843	0,0000
798	16,52	6,10	<b>798</b>	4,97	0,61	-1,3843	0,0008
879	19,15	7,45	879	2,63	1,35	-1,3843	0,0003
891	20,57	7,45	891	1,42	0,00	-1,3843	0,0002
912	21,64	11,26	912	1,07	3,81	-1,3843	0,0002
931	22,09	11,73	931	0,45	0,47	-1,3843	0,0001
1000	22,09	11,73	1000	0,00	0,00	-1,3843	0,0000
1020	22,30	16,33	1020	0,21	4,60	-1,3843	0,0000
1100	23,18	19,79	1100	0,88	3,46	-1,3843	0,0000
1166	23,18	26,66	1166	0,00	6,87	-1,3843	0,0000
1196	25,38	27,77	1196	2,20	1,11	-1,3843	0,0000
1230	27,52	27,77	1230	2,14	0,00	-1,3843	0,0000
1269	27,54	27,77	1269	0,02	0,00	-1,3843	0,0000
1322	29,82	29,69	1322	2,28	1,92	-1,3843	0,0000
1356	32,16	31,14	1356	2,34	1,45	-1,3843	0,0000
1397	37,78	31,61	1397	5,62	0,47	-1,3843	0,0000
1399	41,43	31,61	1399	3,64	0,00	-1,3843	0,0000
1411	50,15	31,61	1411	8,72	0,00	-1,3843	0,0010
1460	51,36	31,61	1460	1,21	0,00	-1,3843	0,0001
1494	51,56	31,61	1494	0,21	0,00	-1,3843	0,0000
1520	54,30	31,61	1520	2,73	0,00	-1,3843	0,0002
1594	54,30	31,61	1594	0,00	0,00	-1,3843	0,0000
1642	55,56	31,61	1642	1,26	0,00	-1,3843	0,0001
1666	57,43	37,92	1666	1,87	6,31	-1,3843	0,0002

Tab. 2. Nalot i liczby przekroczeń sygnałów diagnostycznych i otoczenia silnika Allison 250 nr 836788 (lewy)

Nalot	Diagn. tribolog.	n. Diagn. Diagn. Diagn. Diagn. pg. wibro. ukł.łożysk. kompleks.		Otocz. ukł. łożysk.	
θ			-	D <sub>K</sub>	U
91	0,87	-	-	0,87	
297	0,54	-	-	0,54	0,48
395	2,13	-	-	2,13	1,63
500	0,00	-	-	0,00	2,19
600	1,19	-	-	1,19	1,19
698	0,00	-	-	0,00	0,00
798	0,62	-	-	0,62	0,61
879	10,34	-	-	10,34	1,35
891	1,53	-	-	1,53	0,00
912	1,27	-	-	1,27	3,81
931	0,99	-	-	0,99	0,47
1000	0,35	-	-	0,35	0,00
1020	0,80	-	-	0,80	4,60
1100	22,84	-	-	22,84	3,46
1166	0,00	-	-	0,00	6,87
1196	0,87	-	-	0,87	1,11
1230	1,20	-	-	1,20	0,00
1269	0,31	-	-	0,31	1,92
1322	0,70	-	-	0,70	0,00
1356	0,04			0,04	1,45
1397	3,46	0,00	0,51	3,50	0,47
1399	2,13	0,00	0,00	2,13	0,00
1411	2,12	2,43	0,00	3,22	0,00
1460	0,00	14,94	0,00	14,94	0,00
1494	0,60	0,00	0,00	0,60	0,00
1520	1,83	0,00	0,48	1,89	0,00
1594	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1642	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1666	0.19	0.00	0.00	0.19	6.31

Na podstawie wyników badań przedstawionych w tabeli 1 i 2 z wykorzystaniem zależności (4) i (6) wyznaczono parametr  $\hat{a}$  oraz parametr stanu technicznego "a". Rezultaty obliczeń przedstawiono w tabeli 3 i 4.



Rys. 5. Predykcja parametru "a" dla silnika Allison 250 – C20B nr 836791



Rys. 6. Predykcja parametru "a" dla silnika Allison 250 – C20B nr 836788



Rys. 7. Predykcja parametru "a" przy b=0 dla silnika Allison 250 – C20B nr 836791



Rys. 8. Predykcja parametru "a" przy b=0 dla silnika Allison 250 – C20B nr 836788

Tab. 4. Nalot i wartości parametru a silnika Allison 250 nr 836788

	Diagn.						
Nalot	komp.	Otocz.	$\Delta \theta$	$\Delta D_{K}$	$\Delta U$	â	а
θ	Dk	U					
191	0,87	0,00	191	0,87	0,00	-1,8588	0,0052
297	1,41	0,48	297	0,54	0,48	-1,8588	0,0035
395	3,54	2,11	395	2,13	1,63	-1,8588	0,0000
500	3,54	4,30	500	0,00	2,190	-1,8588	0,0000
600	4,73	5,49	600	1,19	1,19	-1,8588	0,0000
698	4,73	5,49	698	0,00	0,00	-1,8588	0,0000
798	5,35	6,10	798	0,62	0,61	-1,8588	0,0000
879	15,68	7,45	879	10,34	1,35	-1,8588	0,0064
891	17,22	7,45	891	1,53	0,00	-1,8588	0,0005
912	18,48	11,26	912	1,27	3,81	-1,8588	0,0000
931	19,47	11,73	931	0,99	0,47	-1,8588	0,0000
1000	19,82	11,73	1000	0,35	0,00	-1,8588	0,0000
1020	20,62	16,33	1020	0,80	4,60	-1,8588	0,0000
1100	43,46	19,79	1100	22,84	3,46	-1,8588	0,0031
1166	43,46	26,66	1166	0,00	6,87	-1,8588	0,0000
1196	44,33	27,77	1196	0,87	1,11	-1,8588	0,0000
1230	45,53	27,77	1230	1,20	0,00	-1,8588	0,0000
1269	45,84	29,69	1269	0,31	1,92	-1,8588	0,0000
1322	46,54	29,69	1300	0,70	0,00	-1,8588	0,0000
1356	46,58	31,14	1347	0,04	1,45	-1,8588	0,0000
1397	50,09	31,61	1397	3,50	0,47	-1,8588	0,0000
1399	52,21	31,61	1399	2,13	0,00	-1,8588	0,0000
1411	55,43	31,61	1411	3,22	0,00	-1,8588	0,0000
1460	70,37	31,61	1460	14,94	0,00	-1,8588	0,0009
1494	70,97	31,61	1494	0,60	0,00	-1,8588	0,0000
1520	72,86	31,61	1520	1,89	0,00	-1,8588	0,0001
1594	72,86	31,61	1594	0,00	0,00	-1,8588	0,0000
1642	72,86	31,61	1642	0,00	0,00	-1,8588	0,0000
1666	73,05	37,92	1666	0,18	6,31	-1,8588	0,0000

Sumaryczne wartości parametru stanu technicznego a układu łożyskowania silników Allison 250 nr 836791 i nr 836788 przedstawiono na rysunkach 5 i 6. Z porównania zmian na rys. 5 i 6 wynika, że silnik 836791 (prawy) zużywa się szybciej niż silnik nr 836788 (lewy). Analityczne postacie przebiegu parametrów pozwalają prognozować przyszłe stany układów łożyskowania.

Przebiegi parametru stanu technicznego "a" układu łożyskowania silników Allison 250 nr 836791 i nr 836788 w idealnym otoczeniu (b=0) przedstawiono na rysunkach 7 i 8. Z porównania przebiegów widać, że proces zużywania silników jest dość wyrównany. Stąd wniosek, że prawy silnik jest bardziej wrażliwy na niedociągnięcia procesu użytkowania śmigłowca PZL–KANIA.

#### 6. PODSUMOWANIE

Nowy abstrakcyjny sygnał w postaci liczby przekroczeń progów diagnostycznych sygnałów diagnostycznych i otoczenia pozwala kompleksowo oceniać stan techniczny badanego obiektu. Kompleksowość ta jest rezultatem jednoczesnego przetwarzania wielu sygnałów diagnostycznych wynikających z zastosowania wielu metod diagnozowania i wielu sygnałów opisujących otoczenie obiektu. Takie syntetyczne ujęcie sygnałów pozwala wyznaczyć uogólniony parametr stanu technicznego i następnie obserwować jego zmiany w procesie eksploatacji pojedynczego obiektu i wielu różnych obiektów. Pozwala też obserwować jakość użytkowania obiektu. Tak uzyskane informacje moga być wykorzystane do planowanego sposobu użytkowania obiektu (wpływ na parametr "a" i parametr otoczenia (jakości użytkowania) "b") oraz do planowania prac obsługowych obiektu. Pozwala też podejmować decyzje przedłużania resursu obiektów pracujących na jednym statku powietrznym (w danym przypadku silniki mogą być zamienione miejscami).

## LITERATURA

- [1] Ashby R. W., *Wstep do cybernetyki*. PWN, Warszawa 1963.
- [2] Boliński B., Stelmaszczyk Z., *Eksploatacja* silników turbinowych. WKŁ, Warszawa 1981.
- [3] Bubnicki Z., *Identyfikacja obiektów sterowania*: PWN, Warszawa 1974.
- [4] Lewitowicz J., Kustroń K., Podstawy eksploatacji statków powietrznych. t.2, Wyd. ITWL, Warszawa 2003.
- [5] Lindstedt P., *Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy*. Wyd. Nauk. ASKON, Warszawa 2002.
- [6] Lindstedt P., Borowczyk H., Magier J., Badanie możliwości kompleksowego diagnozowania układu łożyskowania na podstawie informacji uzyskanej z metod funkcjonalnej, tribologicznej i wibroakustycznej. Projekt badawczy KBN Nr 5T12D01122, sprawozdanie ITWL nr 1371/50, Wyd. ITWL Warszawa 2003.
- [7] Lindstedt P., Borowczyk H., Magier J., Sterowanie procesem użytkowania turbinowego silnika śmigłowcowego na podstawie kompleksowych sygnałów diagnostycznych i sygnałów otoczenia. VIII Międzynarodowa Konferencja AIRDIAG 2005, Wyd. ITWL Warszawa 2005.
- [8] Lindstedt P., Magier J., Przesłanki normowania i ważenia wartości progowych sygnałów diagnostycznych i otoczenia układu łożyskowania turbinowego silnika śmigłowcowego. Prace Naukowe ITWL Zeszyt 18, Wyd. ITWL, Warszawa 2004.
- [9] Paton R., Frank P., Clark R., *Fault diagnostic in dynamic systems*. Theory and applications Cambridge Uniwersity Press 1989.

- [10] Staniszewski R., Sterowanie zespołów napędowych. WKŁ, Warszawa 1980.
- [11] Söderström T., Stoica P., *Identyfikacja systemów.* PWN, Warszawa 1997.
- [12] Żółtowski B., Ćwik Z., *Leksykon diagnostyki technicznej*. Wyd. ATR, Bydgoszcz 1996.

Praca finansowana przez Politechnikę Białostocką – praca statutowa S/WM/3/06.



Dr hab. inż. **Paweł** LINDSTEDT – prof. nzw. Politechniki Białostockiej, prof. ITWL.

Tematyka badawcza: budowa i eksploatacja maszyn, automatyka lotnicza, miernictwo dynamiczne, diagnostyka i niezawodność maszyn.

Prace dotyczyły głównie: diagnozowania silników lotniczych, instalacji hydraulicznych samolotów, układów łożyskowania i napędów (przekładni) lotniczych metodami funkcjonalnymi, wibroakustycznymi, zużyciowymi, defektoskopowymi i termograficznymi, a także kompleksowymi, dodatkowo bazującymi na skorelowanych sygnałach z kilku ww. metod.

# ZESTAW POMIAROWY DO BADAŃ DIAGNOSTYCZNYCH PROTEZ ZĘBOWYCH<sup>\*</sup>

# Marek KUCHTA<sup>1</sup>, Krzysztof KWIATOS<sup>1</sup>, Krzysztof FOKOW<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instytut Systemów Elektronicznych, Wydział Elektroniki, WAT 00-908 Warszawa, ul. Kaliskiego 2, e-mail: <u>kkwiatos@wel.wat.edu.pl</u> <sup>2</sup>01-496 Warszawa, ul Rostworowskiego 14/2

#### Streszczenie

Referat przedstawia metodę i układ pomiarowy do obiektywnej oceny jakości materiałów użytych do konstrukcji protez szczękowych jak również samej jej konstrukcji. Opracowany specjalizowany zestaw pomiarowy umożliwia wykonywanie szerokiego zakresu badań statycznych i dynamicznych, w ściśle określonych warunkach, na protezach zębowych.

Słowa kluczowe: Protetyka stomatologiczna – diagnostyka, kinematyka protez, biomechanika stomatologiczna, system pomiarowy.

#### MEASURING SYSTEM FOR DIAGNOSTICS OF DENTAL PROSTHESES

#### Summary

The paper presents the method and measuring system for an objective assessment of materials used for the construction of prostheses and for the assessment of the constructions as well. The proposed system is capable of conducting wide range static and dynamic examinations of the prostheses.

Keywords: dental prosthetics – diagnostic, dentures kinematics, dental biomechanics, measuring system.

## 1. WSTĘP

Powiązanie analiz modelowych z badaniami eksperymentalnymi coraz częściej obejmuje zagadnienia związane z biomechaniką stomatologiczną. Badają one związki pomiędzy morfologią i fizjologią tkanki a mechanicznymi stymulatorami jej przebudowy np. w układzie proteza zębowa i tkanki wspierające podłoża.

Z mechanicznego punktu widzenia rekonstrukcja protetyczna ciągłości łuku zębowego oddziaływuje na podłoże kostne za pośrednictwem aparatu zawieszeniowego ozębnej zębów naturalnych lub wszczepów śródkostnych albo błony śluzowej bezzębnego obszaru wyrostka zębodołowego. W postępowaniu klinicznym szczególnie rodzaj podparcia mieszanego, ozębnowo-śluzówkowego szkieletowych protez zębowych, od dawna stanowi przedmiot licznych i różnie ukierunkowanych badań. Dotyczą one m. in. preferencji i ograniczeń w stosowaniu elementów konstrukcyjnych warunkujących zachowanie protezy podczas czynności żucia.

Powodem takiej sytuacji jest brak obiektywnej prognozy dystrybucji obciążeń przenoszonych przez protezę zębową. Ponadto tkanki podporowe takie jak kość, błona śluzowa czy ozębna jako ciała anizotropowe i niejednorodne o cechach reologicznych są trudne w ocenie wytrzymałościowej w porównaniu do materiałów konstrukcyjnych protez o stałych własnościach mechanicznych.

Referat przedstawia metodę i układ pomiarowy do obiektywnej oceny jakości materiałów użytych do konstrukcji protez szczękowych jak również samej jej konstrukcji. Opracowany zestaw pomiarowy umożliwia wykonywanie szerokiego zakresu badań statycznych i dynamicznych, w ściśle określonych warunkach, na protezach zębowych.

Zaprojektowany zestaw przeznaczony jest zasadniczo do badań gotowych protez zębowych. Możliwości pomiarowe zestawu są następujące:

- pomiary statyczne i dynamiczne ugięcia oraz odkształceń sprężystych protezy,
- możliwość pomiaru przy zadawaniu obciążenia w dowolnym punkcie uzębienia,
- zdolność do badania różnych typów protez zębowych,
- automatyczne sterowanie procesem pomiarowym wraz ze wstępnym przetwarzaniem informacji pomiarowej.

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Wykonano w ramach projektu nr: Grant 3T10C03326

#### 2. BUDOWA I PARAMETRY TECHNICZNE

Zestaw pomiarowy składa się z części mechanicznej służącej do zadawania obciążeń statycznych lub dynamicznych oraz elektronicznej części pomiarowej, która steruje procesem pomiarowym oraz pozwala na archiwizację i przetwarzanie wyników pomiaru (rys. 1). Na rys. 2 pokazano widok stanowiska pomiarowego.

Zadaniem części mechanicznej jest odpowiednie zamocowanie badanej protezy wraz z możliwością zadawania zewnętrznych obciążeń w dowolnym punkcie uzębienia. Badana proteza 01 umieszczona w odlewie gipsowym jest montowana (klejona) na stoliku 02 składającym się z cylindrycznego dekla umieszczonego obrotowo w prostokątnej przesuwnej ramce. Ramka umocowana jest na pochylnym, regulowanym trzema podporami dysku 10 a dysk połączony jest trwale z podstawą zestawu 10a. Ruchoma obejma 12 przesuwa się po kolumnie 11 przy użyciu nakrętki 13. Wkrętem 14 zaciska się obejmę na kolumnie blokując ustawienie na odpowiedniej wysokości trzpienia 03.



Rys. 1. Schemat funkcjonalny zestawu pomiarowego do badań protez zębowych



Rys. 2. Widok stanowiska pomiarowego

Trzpień dociskowy 03 z kolistą główką ma możliwość odchylania wokół stożka o kącie 12° + 12°. Położenie trzpienia ustala nakrętka 04. Siła nacisku Q przenoszona jest przez oś obciążników 05 ułożyskowaną wzdłużnym łożyskiem tocznym w obejmie 12. Obciążniki 06 nakładane są jeden na drugim z wykorzystaniem cylindrycznych zamków. Do trzpienia umocowana jest płytka 07, o którą opiera się końcówka pomiarowa 09 potencjometrycznego przetwornika przesunięć liniowych 08.

Uzupełnieniem konstrukcji są wkręty dociskowe 17 zabezpieczające przed obrotem stolik 02 po jego uprzednim ustaleniu w pozycji pomiarowej; 18 – dwa wkręty dociskające ruchomy suwak ramki ze stolikiem po jego ustaleniu wzdłuż osi poprzecznej w rowkach na odcinku L-L.

Obciążenia dynamiczne badanej protezy są realizowane poprzez podnoszenie i opuszczanie trzpienia z obciążnikami napędzanego silnikiem krokowym 15 z umieszczonym mimośrodowo na osi łożyskiem kulkowym 16.

Zadaniem części elektronicznej jest półautomatyczny pomiar wielkości mechanicznych w przypadku obciążeń statycznych lub w pełni automatyczny pomiar przy zadawaniu obciążeń dynamicznych.

Wzmacniacz pomiarowy Spider8 zasila przetworniki pomiarowe (przesunięć liniowych i tensometryczne) jednocześnie wzmacniając i przetwarzając na postać cyfrową sygnały elektryczne z przetworników.

Do sterowania pracą wzmacniacza wykorzystywany jest interfejs RS-232C, za pomoca którego następuje konfiguracja kanałów pomiarowych wzmacniacza, wyzwalanie pomiaru oraz transmisja wyników pomiaru. Interfejs IEEE 1284 z buforem pradowym wykorzystywany jest natomiast do bezpośredniego sterowania silnika trakcie zadawania obciążeń krokowego w dynamicznych.

Archiwizacja oraz wstępne przetwarzanie wyników następuje w komputerze klasy PC. Do sterowania pomiarami przy obciążeniach statycznych wykorzystano firmowe oprogramowanie Catman Express dostarczane przez producenta wraz ze wzmacniaczem pomiarowym. Złożoność procesu pomiarowego przy obciążeniach dynamicznych narzucająca konieczność sterowania pracą silnika krokowego wykonywania pomiarów i za pośrednictwem wzmacniacza Spider8 w określonym reżimie czasowym wymagała stworzenia specjalizowanego oprogramowania. W tym celu wykorzystano platformę LabView, która jest dedykowana do rozwiązywania tego typu zadań.

## **3. PARAMETRY TECHNICZNE ZESTAWU**

Zaprojektowany zestaw pomiarowy charakteryzuje się dużą uniwersalnością. Zależnie od

potrzeb i programu badań w konstrukcji zestawu przewidziano możliwość jego rekonfiguracji zarówno w części mechanicznej jak i elektronicznej. Podstawowe parametry techniczne zestawu są następujące:

- obciążenie osi (siła przenoszona na trzpień 03) od 150G do 2550G, stopniowane co 100G (minimalna wartość obciążenia 150G spowodowana jest masą układu przenoszenia obciążenia),
- zakresy zmiany punktu obciążenia protezy:
  - przesuw poprzeczny ramki stolika 02 L=2x35mm,
  - obrót stolika 02 pełny kąt α=360°,
- zmiana kąta zadawania obciążenia poprzez pochylenie trzpienia 03 przy wywieraniu obciążeń osiowych i promieniowych ±12°,
- regulacja pionowego położenia układu zadawania obciążenia – płynna do 100mm,
- nastawy obrotu i przesuwu ręczne,
- pomiar ugięcia protezy przetwornik potencjometryczny:
  - zakres pomiarowy 8mm,
  - błąd pomiaru 1%,
- pomiar odkształceń wybranych miejsc protezy przetworniki tensometryczne:
  - zakresy pomiarowe: ±5µm/m, ±12µm/m, ±500µm/m – wybór zdalny,
  - błąd pomiaru 1%,
- częstotliwość zadawania obciążeń dynamicznych 0,6÷1,4 cykli/s – regulacja płynna zdalna,
- częstotliwość próbkowania sygnałów z przetworników pomiarowych: 10Hz, 25Hz, 50Hz, 60Hz i 75Hz wybór zdalny,
- konfiguracja kanałów pomiarowych (jeden kanał do pomiaru przesunięcia i do pięciu kanałów do pomiaru odkształcenia protezy) – zdalna,
- wyzwolenie pomiaru (pomiary statyczne) lub serii pomiarowej (pomiary dynamiczne) – zdalne,
- zalecana temperatura pracy 20±5°C,
- napięcie zasilania: 230V AC komputer i wzmacniacz pomiarowy, + 12V DC – silnik krokowy.

## 4. METODYKA POMIARÓW

Zaprojektowane, wykonane i sprawdzone praktycznie stanowisko umożliwia wykonywanie pomiarów w szerokim zakresie. Zależnie od potrzeb mogą być prowadzone badania protez zarówno przy obciążeniach statycznych jak i dynamicznych.

Przeprowadzenie eksperymentu pomiarowego wymaga wykonania kilku czynności przygotowawczych. Stanowisko umożliwia zadawanie obciążenia nie tylko w kierunku prostopadłym do powierzchni protezy ale możliwa jest zmiana kąta zadawania obciążenia w obszarze 12° stożka kątowego. Do ustawienia żądanego kąta pochylenia trzpienia służy specjalny ustawiak kątowy będący elementem wyposażenia stanowiska.

Po odpowiednim ustawieniu trzpienia należy przygotować badaną protezę do badań. W tym celu umieszcza się ją w odlewie gipsowym, który następnie jest montowany na cylindrycznym deklu. Całość umieszcza się w otworze przesuwnego stolika a przetworniki tensometryczne zamontowane na powierzchni protezy podłącza się do wybranych wejść wzmacniacza SPIDER8.

Wybór miejsca nacisku na protezę dokonywany jest za pomocą przesuwania stolika i obrotu cylindrycznego dekla. Wysokość położenia trzpienia przenoszącego obciążenie reguluje się poprzez podnoszenie lub opuszczanie całego układu do zadawania obciążenia. Po dokładnym ustawieniu miejsca nacisku na protezę należy zablokować wszystkie elementy regulacyjne za pomocą śrub blokujacvch. Ро właczeniu urzadzeń pomiarowego i skonfigurowaniu wzmacniacza zestaw jest praktycznie gotowy do przeprowadzenia eksperymentów pomiarowych. Zaleca się aby potencjometryczny przetwornik przesunięć ustawiony był wstępnie w połowie zakresu pomiarowego. Do regulacji ustawienia punktu pracy przetwornika wykorzystuje się wkręcaną - ruchomą końcówkę.

Wykonywanie pomiarów statycznych narzuca warunek wywołania stałego obciążenia. Uzyskuje się to poprzez ręczne nakładanie obciążników na układ zadawania obciążeń. Oznacza to, że pomiarów powinno wyzwolenie również następować ręcznie po ustabilizowaniu się wartości obciążenia. Do realizacji tego typu zadań wykorzystano firmowe oprogramowanie CATMAN EXPRESS dostarczane przez producenta wraz ze wzmacniaczem pomiarowym SPIDER8. Zapewnia ono pełną obsługę pomiarów przy obciążeniach statycznych. Za jego pomocą konfiguruje się interfejs RS-232C oraz wzmacniacz pomiarowy w zakresie aktywacji poszczególnych kanałów pomiarowych, ich trybu pracy (współpracy z różnego typu przetwornikami pomiarowymi), zakresu pomiarowego i trybu wyzwalania pomiaru. Natomiast po wykonaniu założonej ilości pomiarów oprogramowanie umożliwia archiwizację wyników w różnych formatach (binarnych lub tekstowych).

Przy obciażeniach dynamicznych oprócz funkcji pomiarowych należy również zapewnić sterowanie pracą silnika krokowego. Firmowe oprogramowanie stosowane przy pomiarach statycznych nie jest sterowania w stanie zrealizować silnikiem krokowym. Z tego powodu opracowano własne oprogramowanie, które za pomocą interfejsu RS-232C steruje pracą wzmacniacza pomiarowego a poprzez interfejs IEEE-1284 steruje pracą silnika krokowego, który będąc mechanicznie sprzężonym z układem zadawania obciażenia powoduje powstawanie obciążeń zmiennych w czasie (rys. 2).



Rys. 2. Panel sterujący oprogramowania do pomiarów dynamicznych

Opracowane oprogramowanie powstało na bazie platformy programowej LabView, która jest bardzo wygodnym i elastycznym narzędziem do realizacji tego typu zadań. Z założenia przyjęto, że zestaw pomiarowy przed rozpoczęciem sesji pomiarowej powinien zostać skalibrowany i odpowiednio do potrzeb skonfigurowany w sposób automatyczny. Natomiast wybór parametrów pracy zestawu powinien się odbywać zdalnie. Jedyną czynnością wykonywaną ręcznie jest nakładanie obciążników na układ zadawania obciążenia wyznaczające maksymalną wartość obciążenia.

Przed rozpoczęciem pomiarów zestaw powinien zostać skalibrowany. Kalibracja odbywa się w sposób automatyczny po naciśnięciu przycisku "KALIBRACJA". O tym, czy zestaw został skalibrowany, czy też czynność ta nie powiodła się sygnalizuje lampka kontrolna. W przypadku wystąpienia błędu w procesie kalibracji dalsze pomiary nie są możliwe. Przed rozpoczęciem pomiaru należy włączyć z panelu sterującego kanały, z których informacja pomiarowa ma być rejestrowana oraz wybrać parametry pracy zestawu:

- częstotliwość próbkowania,
- prędkość zadawania obciążenia,
- ilość cykli zadawania obciążenia w trakcie sesji pomiarowej.

Po wykonaniu powyższych czynności zestaw pomiarowy jest gotowy do rozpoczęcia pomiaru. Wyzwolenie serii pomiarowej następuje po naciśnięciu przycisku "START". Silnik krokowy obraca się z zadaną prędkością wywołując obciażenia zmienne czasie. Sygnały w z przetworników pomiarowych we właczonych kanałach są próbkowane synchronicznie z wybraną częstotliwością. Za każdym razem gdy wykonany zostanie pełny cykl obciążenia zarejestrowane wartości sygnałów są transmitowane z bufora wzmacniacza pomiarowego do komputera poprzez RS-232C. interfeis Zadawanie obciażenia zmiennego w czasie wraz z równoległym próbkowaniem sygnałów w aktywnych kanałach pomiarowych jest wykonywane aż do momentu gdy zostanie wykonana zadana ilość cykli obciążeń. Następnie zarejestrowane sygnały są wyświetlane na

wskaźnikach graficznych i udostępniana jest funkcja archiwizacji wyników pomiaru.

#### 5. PRZYKŁADOWE WYNIKI POMIARÓW

Opisany powyżej zestaw pomiarowy bvł wykorzystywany wielokrotnie do przeprowadzania różnego typu eksperymentów. Poniżej pomiarów wykonane przedstawiono wyniki w warunkach statycznych (rys. 3, rys. 4). Badana była proteza metalowa z czterema zębami oznaczonymi jako 2.3, 2.4, 2.5, 2.6. Na metalowej powierzchni protezy od strony dwóch zaczepów mocujacych zamontowany był przetwornik tensometryczny w układzie półmostka Wheatstone'a.

Po ustawieniu trzpienia do zadawania obciażenia wybranym zębem protezy, zwiększano nad obciążenie za pomocą obciążników do wartości 2kG. Następnie obciążenie było zmniejszane. Za każdym razem po zmianie obciążenia rejestrowane były sygnały z przetwornika przesunięć (ugięcie protezy) oraz z przetwornika tensometrycznego (odkształcenie wybranego obszaru protezy). Po zakończeniu serii pomiarowej trzpień był ustawiany nad kolejnym zębem protezy i czynności były Wyniki wykonanych powtarzane. pomiarów przedstawiono na poniższych rysunkach. Zostały one wykorzystane do weryfikacji modelu metalowej protezy dwuskrzydłowej.

# 6. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone dotychczas badania protez zębowych w pełni potwierdziły przydatność omawianego stanowiska do określania właściwości mechanicznych protez zębowych. W szczególności zestaw pomiarowy umożliwia badania ugięć i odkształceń sprężystych w zależności od miejsca



Rys. 3. Wyniki pomiaru ugięcia protezy funkcji obciążenia

Rys. 4. Wyniki pomiaru odkształcenia protezy funkcji obciążenia

przyłożenia obciążenia zarówno w warunkach statycznych jak i dynamicznych.

Automatyczne zadawanie obciążeń dynamicznych wraz z równoległym synchronicznym próbkowaniem pozwala na prowadzenie długotrwałych badań zmęczeniowych. Pozwala to na określanie trwałości protez wraz z szacowaniem czasu ich przydatności przy założonej ilości zgryzów. Opracowane oprogramowanie jest w pełni skalowane i pozwala na zadawanie praktycznie dowolnej liczby cykli obciążeń.

pory zestaw pomiarowy Do tej był wykorzystywany do zadawania obciążeń punktowych skupionych). Planuje (sił się zwiększenie funkcjonalności stanowiska poprzez doposażenie w trzpień do zadawania obciążeń powierzchniowych (sił rozłożonych).

Z uwagi na zastosowane rozwiązania konstrukcyjne trwałość stanowiska jest praktycznie nieograniczona. W trakcie eksploatacji planowana jest okresowa wymiana trzpienia i łożyska mimośrodu.

# LITERATURA

- [1]. Instrukcja obsługi wzmacniacza pomiarowego SPIDER8, Hottinger Baldwin Messtechnik, Darmstadt 1999.
- [2]. Instrukcja użytkowania oprogramowania CATMAN<sup>®</sup> EXPRESS ver.3.0, Hottinger Baldwin Mestechnik, Darmstadt 1999.
- [3].Instrukcja użytkownika platformy programowej LabView ver.6i, National Instruments, Austin Texas 2000.
- [4]. Instrukcja pomiarowa platformy programowej LabView ver.6i, National Instruments, Austin Texas 2000.
- [5].Z. Parczewski, Teoria maszyn i mechanizmów, Warszawa, WNT 1978.
- [6].Z. Orłoś, Doświadczalna analiza odkształceń i naprężeń, Warszawa, PWN 1977.
- [7].Z. Orłoś, Pomiary naprężeń w budowie maszyn, Warszawa, PWN 1986.
- [8]. S. Timoszenko, Voynowsky-Krieger, Teoria płyt i powłok, Warszawa, Arkady 1982.



Marek KUCHTA urodził się 1961r. Studia ukończył w 1987 r. na Wydziale w Elektroniki WAT specjalność eksploatacja systemów łączności. Stopień doktora uzyskał w roku 1997 w dyscyplinie elektronika, specjalność metrologia. Pracuje stanowisku na

adiunkta n-d na Wydziale Elektroniki WAT. Zajmuje się systemami pomiarowymi, modelowaniem układów biomechanicznych, przetwarzaniem sygnałów biomedycznych.



Krzysztof KWIATOS urodził się w 1961r. Studia ukończył w 1986 r. na Wydziale Elektroniki WAT specjalność eksploatacja systemów łączności. Stopień doktora uzyskał w roku 2000 w dyscyplinie elektronika, specjalność metrologia. Pracuje na stanowisku

adiunkta n-d na Wydziale Elektroniki WAT. Zajmuje się systemami pomiarowymi, przetwarzaniem sygnałów biomedycznych.



Krzysztof FOKOW urodził 1963r. Studia się W Wydziale ukończył na WAT Elektroniki specjalność systemy radioelektroniczne. Długoletni pracownik tego Wydziału. Obecnie pracuje w BP Foxel. Zajmuje sie projektowaniem

automatycznych systemów kontrolno-pomiarowych i automatyką przemysłową.

# AUTONOMICZNE STANOWISKO POMIAROWE DO MONITOROWANIA SKAŻEŃ WÓD POWIERZCHNIOWYCH PRODUKTAMI ROPOPOCHODNYMI

Andrzej MICHALSKI<sup>1,2</sup>, Andrzej KALICKI<sup>2</sup>

<sup>1)</sup> Instytut Systemów Elektronicznych, Wojskowa Akademia Techniczna ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

<sup>2)</sup> Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych, Politechnika Warszawska 00-661 Warszawa, ul. Koszykowa 75, fax. 022 629 29 62, <u>anka@iem.pw.edu.pl</u>

#### Streszczenie

Przedstawiono sposób realizacji autonomicznego stanowiska pomiarowego do monitorowania skażeń wód powierzchniowych produktami ropopochodnymi. Omówiono zagadnienia dotyczące sondy pomiarowej i wariantów konfiguracji sprzętowej stanowiska pomiarowego. Przedstawiono strukturę rozległego terytorialnie systemu pomiarowego i sposób komunikacji w ramach tego systemu. Omówiono zadania realizowane przez poszczególne elementy systemu pomiarowego.

Słowa kluczowe: ochrona środowiska, zanieczyszczenia produktami ropopochodnymi, system pomiarowy.

## AUTONOMIC MEASUREMENT POINT FOR HYDROCARBON POLLUTION MONITORING OF SURFACE WATER

#### Summary

Principles of realization of the autonomic measurement point for hydrocarbon pollution monitoring of surface water are presented. Problems concerning to the measuring probe and variants of hardware configuration of the autonomic measurement point are described. The structure of territorial extensive measurement system and principles of communication in this system are shown. Main tasks realized by elements of the measurement system are explained.

Keywords: environmental protection, hydrocarbon pollution, measurement system.

## 1. WSTĘP

Celem artykułu jest przedstawienie rozwiązania rozproszonego oraz rozległego terytorialnie systemu pomiarowego, wykorzystującego technologie internetowe. Głównym zadaniem prezentowanego systemu jest monitorowanie stopnia skażenia środowiska naturalnego produktami ropopochodnymi.

Potencjalnymi źródłami skażeń są: oczyszczalnie ścieków, stacje benzynowe, magazyny paliw, rafinerie naftowe, zakłady przemysłowe i porty morskie. Z kolei do obiektów, które najbardziej są narażone na zanieczyszczenia produktami ropopochodnymi, można zaliczyć: ujęcia wody pitnej, stawy hodowli ryb i naturalne zbiorniki wodne (rozlewiska rzek, poldery, itp.).

Zadaniem systemu monitorowania skażeń jest ustanowienie kontroli nad miejscami, które są źródłem zanieczyszczeń lub mogą ulegać zanieczyszczeniom. Wymaga to umieszczenia w tych miejscach stanowisk pomiarowych zbierających dane o zanieczyszczeniach produktami ropopochodnymi. Dane ze stanowisk pomiarowych przesyłane są do serwera, który te dane przechowuje w bazie danych, przetwarza, analizuje i w sytuacjach, gdy zanieczyszczenia przekraczają dopuszczalny poziom przesyła sygnały alarmowe do odpowiednich służb. Sygnały te zawierają informację o poziomie skażenia zanieczyszczeniami oraz miejscu ich występowania, co z kolei powinno powodować odpowiednie reakcje, np. blokowanie danego ujęcia wodnego.

Podstawowym efektem działania serwera będzie stworzenie obrazu stanu zanieczyszczeń w kraju.

Stanowiska obsługi są dodatkowymi elementami systemu pomiarowego udostępniającymi upoważnionym osobom informację o zanieczyszczeniach i dają możliwość sterowania pracą systemu.

Sterowanie pracą systemu polega na przesyłaniu komend do serwera dotyczących postaci przesyłanych danych o zanieczyszczeniach oraz komend sterujących pracą systemu pomiarowego. Stanowiska obsługi otrzymują także informację statusową opisującą działanie systemu pomiarowego. Do stanowisk obsługi mają dostęp jedynie osoby uwierzytelnione. Schemat blokowy systemu monitorowania zanieczyszczeń wód powierzchniowych przez produkty ropopochodne przedstawia rys. 1.





Rozległość terytorialna systemu i konieczność umieszczania stanowisk pomiarowych w dowolnym miejscu kraju preferuje łączność radiową dla realizacji komunikacji pomiędzy stanowiskami pomiarowymi i centralnym serwerem. Ze względu na dostępność, szybkość i niezawodność przesyłania eksploatacji informacji oraz niskie koszty zdecydowano się wykorzystać system łączności GSM/GPRS [3]. W niektórych przypadkach może być stosowana łączność przewodowa, przede wszystkim przy komunikacji pomiędzy stanowiskami obsługi i serwerem.

Stanowisko pomiarowe jest w pełni autonomiczne i niezależne od miejsca, w którym jest umieszczane i stąd jego nazwa – autonomiczne stanowisko pomiarowe (ASP).

Schemat blokowy stanowiska pomiarowego przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Schemat blokowy autonomicznego stanowiska pomiarowego do monitorowania zanieczyszczeń wód powierzchniowych przez produkty ropopochodne

W skład ASP wchodzą: sonda pomiarowa dla pomiaru zanieczyszczeń produktami ropopochodnymi, mikrokomputer, system łączności GSM/GPRS [3], system lokalizacji geodezyjnej GPS i źródło zasilania.

Stanowisko pomiarowe realizuje szereg funkcji. Dokonuje pomiarów zanieczyszczenia w danym punkcie pomiarowym. Lokalnie archiwizuje wyniki pomiarów, określa dokładny czas i miejsce pomiaru. Komunikuje się z serwerem, zapewnia zasilanie w energię elektryczną poszczególnych elementów stanowiska z sieci energetycznej, akumulatorów lub baterii słonecznych. Stanowisko pomiarowe będzie pracować w trudnych warunkach polowych, co musi być uwzględnione w ostatecznej konstrukcji stanowiska.

Wykorzystanie systemu GPS pozwala na dokładną lokalizację terenową ASP, a w dalszej kolejności jest podstawą zobrazowania przez serwer informacji o zanieczyszczeniach na mapach terenowych.

## 2. STANOWISKO POMIAROWE

## 2.1. Konfiguracje stanowiska pomiarowego

Stanowisko pomiarowe jest realizowane w trzech konfiguracjach w zależności od zastosowanego procesora: wyspecjalizowanego mikrokomputera ADAM-4500, mikrokomputera przemysłowego PCM-3350 w standardzie PC/104 [1] lub mikrokomputera dedykowanego phyCORE [6].

mikrokomputera zastosowanego Tvp w stanowisku pomiarowym decyduje o sposobie systemu realizacji pozostałych bloków pomiarowego. Postać konfiguracji stanowiska wpływa niewiele pomiarowego na jego funkcjonalność. Stopień realizacji niektórych funkcji może być ograniczony przez możliwości obliczeniowe i zasoby sprzętowe (głównie przez rozmiar pamieci operacyjnej) stosowanych mikrokomputerów.

Wariantowa realizacja punktu pomiarowego pozwala na wybór ostatecznego rozwiązania najbardziej pasującego do konkretnych wymagań użytkowych.

Unifikacja stanowisk pomiarowych zapewni ich mobilność i wymienialność. Przy realizacji trzech konfiguracji stosuje się zasadę daleko posuniętej odpowiedniości funkcjonalnej elementów składowych. Pozwoliło to na stworzenie wspólnego konkretnei oprogramowania niezależnie od konfiguracji. Różnią się jedynie moduły oprogramowania sterujące bezpośrednio elementami składowymi stanowiska.

Możliwa jest też rozbudowa stanowiska pomiarowego o dodatkowe czujniki pomiarowe np. pomiar temperatury, skład elektrochemiczny wody lub czujniki ochrony dostępu do obszaru objętego nadzorem, co dodatkowo pozwoli na zintegrowanie z systemem ochronno-kontrolnym.

Na rys. 3 przedstawiono model laboratoryjny stanowiska pomiarowego z mikrokomputerem ADAM4500.

Mikrokomputer jest połączony z sondą pomiarową i odbiornikiem GPS Orcam20 poprzez sprzęg RS-485.

Mikrokomputer ADAM4500 charakteryzuje się małym poborem mocy i możliwością wykonywania jedynie prostych programów.

Rozwiązanie stanowiska pomiarowego w wersji laboratoryjnej bazujące na standardzie PC/104 przedstawiono na rys. 4.



Rys. 3. Wersja laboratoryjna stanowiska pomiarowego z mikrokomputerem ADAM4500



Rys. 4. Wersja laboratoryjna stanowiska pomiarowego z mikrokomputerem PCM-3350

Mikrokomputer PCM-3350 jest połączony z sondą pomiarową za pomocą sprzęgu RS-485, a z odbiornikiem GPS PCM-3292 - poprzez magistralę systemową PC/104. Mikrokomputer może być wyposażony w dodatkowe karty DAQ dedykowane pod konkretne zestawy czujników skażeń i przetworników do pomiaru parametrów elektrochemicznych wody.

Standard PC/104 jest stosowany w wielu aplikacjach wbudowanych mikrokomputerów. Wielką zaletą standardu jest prawie pełna zgodność z architekturą 32-bitową Intela [2]. Dzięki temu, to same środowisko programistyczne może być użyte dla komputerów osobistych i dla komputerów PC/104. Skraca to czas realizacji projektów. Wadą rozwiązań na PC/104 są większe rozmiary fizyczne i większy pobór mocy ze źródła zasilania w porównaniu, na przykład z rozwiązaniem na mikrokomputerach z rodziny ARM. Główną zaletą PC/104 jest możliwość tworzenia wysoce skalowalnych rozwiązań z możliwością stosowania sprzętu, który może pracować w bardzo nieprzyjaznym środowisku.

Rys. 5 przedstawia elementy składowe stanowiska pomiarowego z mikrokomputerem phyCORE. Mikrokomputer ten charakteryzuje się bardzo dużą mocą obliczeniową przy jednocześnie najmniejszym poborze mocy ze źródła zasilania z trzech prezentowanych wersji stanowiska pomiarowego.



Rys. 5. Elementy składowe wersji laboratoryjnej stanowiska pomiarowego z mikrokomputerem phyCORE

Mikrokomputer współpracuje z sondą pomiarową poprzez sprzęg RS-485, a z odbiornikiem GPS ORCAM20 i modemem GSM/GPRS Motorola Tg20 – poprzez sprzęg RS-232.

#### 2.2. Własności elementów składowych

#### Sonda pomiarowa

Pomiar zanieczyszczeń produktami ropopochodnymi, w większości zastosowań jest ograniczony do zakresu od 0 do 100 ppm. Sonda pomiarowa nie powinna być czuła na inne zanieczyszczenia i zmiany temperatury.

Sonda pomiarowa DHP-485 (rys. 6), produkowana przez amerykańską firmę FCI Environmental, jest jedną z niewielu, spełniającą powyższe warunki. **DHP-485** Sonda jest światłowodowym czujnikiem nateżeniowym, wykorzystujacym zasadę naruszenia warunków całkowitego odbicia strumienia świetlnego światło-wodzie zanieczyszczenia w przez ropopochodne.

Sonda DHP-485 wykrywa jedynie te węglowodory, których cząsteczki zawierają więcej, niż sześć atomów węgla.



Rys. 6. Sonda pomiarowa DHP-485

Są to związki należące do węglowodorów z grupy BETX (benzen, etylobenzen, toluen, ksylen) i węglowodorów C6. Zakres pomiarowy sondy zawiera się w przedziale  $0 \div 2000$  ppm. Rozdzielczość pomiarów wynosi 0,1 ppm dla ksylenu. Błąd pomiaru wynosi 3 ppm w przedziale  $0 \div 30$  ppm

i 10 % odczytu w przedziale 30 ÷ 2000 ppm. Czas pojedynczego pomiaru wynosi 12÷60 s. Czas ustalenia się wyniku pomiaru po zmianie stężenia węglowodorów w badanym roztworze, mierzony do momentu ustalenia się sygnału z pierwotnego przetwornika pomiarowego, wynosi około 5 minut. Środowiskiem pracy sondy może być woda, ścieki lub para wodna. Sonda może pracować w zakresie temperatur 0÷50 °C. Komunikacja z sondą odbywa się w standardzie RS-485 z buforowaniem danych pomiarowych. Protokół transmisji jest prosty i opiera się na zasadzie pytań i odpowiedzi. Komenda inicjująca, wysłana do sondy, rozpoczyna pomiar. Po zakończeniu pomiaru sonda wysyła informację statusową i wynik pomiaru może zostać odczytany. Czas odpowiedzi sondy zależy od warunków pomiaru (szybkości przepływu wody). Charakterystyka przetwarzania sondy nie jest linowa i pomiary po-winny być poprzedzone kalibracją, która zmniejsza bład pomiaru do 5 %. Pobór mocy przez sondę ze źródła zasilania wynosi 200 mW.

## **Odbiorniki GPS**

Określenie położenia punktu pomiarowego jest realizowane za pomocą odbiorników GPS ORCAM20 i PCM-3292. Odbiornik ORCAM20 komunikuje się z mikrokomputerem poprzez dwa RS-232. porty szeregowe Wykonany iest w technologii SiRFStar II/LP. Zapewnia pomiar położenia z dokładnościa 5 m (GPS) i 2 m (DGPS). Czas pomiaru wynosi 0,1 s. Transmisja tekstowych danych nawigacyjnych ASCII odbywa się według protokołu NMEA-0183, stworzonego przez National Marine Electronics Association (USA). Pobór mocy ze źródła zasilania nie przekracza 0,35 W.

Odbiornik PCM-3292 zbudowany na układzie Rockwell Jupiter przeznaczony jest dla mikrokomputerów w standardzie PC/104. Zapewnia on dokładność pomiaru odległości równą 10 m. Czas pomiaru odległości wynosi 1 s. Transmisja danych pomiarowych odbywa się zgodnie z protokołem NMEA-0183. Pobór mocy ze źródła zasilania jest równy 0,8 W.

## Komunikacja GSM/GPRS

Komunikacja bezprzewodowa GSM/GPRS dla mikrokomputera (PC/104) jest realizowana za pomocą układów PCM-3112 lub GC79.

Układ PCM-3112 współpracuje z magistralami PCMCIA typu I, II lub III i ma programowalny BIOS o rozmiarze 32 kB. Układ GC79 współpracuje z magistralą PCMCIA typu II. Transmisja radiowa może odbywać się w zakresach częstotliwości 900, 1800 oraz 1900 MHz i wykorzystuje kodowanie CS-1.4 zapewniające szybkość do 85,6 kbps. Możliwa jest także komunikacja z bezprzewodową siecią lokalną IEEE 802.11b. Pobór mocy ze źródła zasilania przez układ wynosi 0,35÷2,6 W.

Komunikacja bezprzewodowa GSM/GPRS jest realizowana także za pomocą układu Motorola Tg20 dołączanego do mikrokomputera za pomocą sprzęgów RS-232 i USB. Układ może pracować w zakresach częstotliwościowych 900/1800 MHz i 950/1900 MHz. Istnieje możliwość podłączenia klawiatury, wyświetlacza i prowadzenia rozmów audio. Pobór mocy ze źródła zasilania przez układ wynosi 0,012÷2 W.

Układy modemów realizują komunikację z serwerem za pomocą protokołów sieciowych TCP/IP i UDP/IP z pominięciem najniższej warstwy protokołów. Stanowisko pomiarowe ma dynamiczny adres IP w Internecie i komunikuje się z serwerem z szybkością 48 kb/s.

## Mikrokomputery

Mikrokomputer ADAM4500 zbudowany jest na 16-bitowym mikrokomputerze jednoukładowym 80188, 40 MHz. Ma pamięć programu 256 kB ROM i pamięć danych 256 kB z możliwością rozbudowy do 404 kB. Komunikacja z otoczeniem odbywa się przez porty szeregowe RS-232/RS-485, RS-485 i specjalny RS-232. Pobór mocy ze źródła zasilania wynosi 2 W.

Mikrokomputer PCM-3350 zrealizowany jest w standardzie PC/104 na mikroprocesorze Geode GX1-300 (300 MHz, architektura IA32) wyposażonym w pamięć programu Compact Flash z możliwością rozbudowy do 2 GB i pamięć danych 128 MB. Do komunikacji z otoczeniem służą porty PC/104, RS-232, RS-232/485, RJ-45, USB i EIDE. Pobór mocy ze źródła zasilania wynosi około 7 W.

Mikrokomputer phyCORE [6] zbudowany jest na 32-bitowym mikrokomputerze jednoukładowym LPC2294 [5] (ARM), 60 MHz, architektura RISC) wyposażonym w pamięć programu 256 kB Flash i pamięć danych 16 kB oraz 8-kanałowy, 10-bitowy przetwornik A/C. Komunikacja z otoczeniem odbywa się przez porty szeregowe: dwa RS-232 i cztery CAN. Procesor charakteryzuje się dużą szybkością pracy, typową dla architektury RISC. W bardzo krótkim czasie odpowiada na przerwania. Pracuje z dużą niezawodnością przy wykonywaniu programów w czasie rzeczywistym. Pobór mocy ze źródła zasilania wynosi 1 W.

#### Serwer

Serwer będzie implementowany na różnych komputerach (maszyna serwerowa, typowy PC lub mikrokomputer w standardzie PC/104). Pozwoli to na dopasowanie się do konkretnych potrzeb przy instalacji systemu i na sterowanie kosztami systemu.

Realizacja serwera opiera się na stosie oprogramowania open source nazywanym LAMP [4] (Linux – system operacyjny, Apache – serwer web, MySQL - baza danych, PHP - język programowania). Taka konfiguracja ma bardzo duże możliwości dzięki własnościom języka PHP integrujacego programowania stos oprogramowania za pomocą szeregu bibliotek (modułów). Jednocześnie ta konstrukcja zapewnia bardzo dużą niezawodność przy pracy w czasie rzeczywistym.

Rozpatrywana jest też realizacja serwera w konfiguracji programowej WAMP (Windows, Apache, MySQL, PHP). Jednakże taka konfiguracja ma mniejsze możliwości użytkowe ze względu na ograniczenia systemu Windows przy pracy w czasie rzeczywistym. Nie pozwala to wykorzystywać wszystkich możliwości języka PHP. Najbardziej odpowiednim będzie tutaj implementacja serwera IIS. Serwer z systemem Windows jest mniej niezawodny w pracy, niż serwer z systemem Linux.

Punkty pomiarowe są okresowo odpytywane przez serwer odnośnie stanu zanieczyszczenia środowiska. Punkty pomiarowe mogą inicjować komunikację z serwerem w sytuacji, gdy zanieczyszczenie wody w danym momencie gwałtownie wzrośnie. Informacja z sondy jest uzupełniona o dane informujące o położeniu geodezyjnym czujnika i czasie pomiaru z odbiornika GPS.

Aplikacja w serwerze steruje całością systemu, monitoruje zdalnie stan systemu i zbiera całość informacji w bazie danych. Stan systemu przedstawiają raporty w formie dokumentów HTML, generowanych dynamicznie w serwerze przez aplikację w języku PHP i przeznaczonych dla przeglądarek web. Dzięki temu informacja z systemu może być udostepniana w dowolnym miejscu mającym połączenie z Internetem. Dla archiwizacji pracy systemu będą tworzone dokumenty PDF z użyciem biblioteki ClibPDF. Format raportów z systemu może być dynamicznie modyfikowany stosownie do zapytań od klientów Stosowane graficzne przedstawianie systemu. informacji pozwalające na łatwiejsze analizowanie dużych objętości danych. Możliwe jest to poprzez zastosowanie bibliotek GD2 i Image Graph.

Obsługa bazy danych w języku SQL daje bardzo duże możliwości przetwarzania danych zgromadzonych w bazie.

Dla zapewnienia uprawnionego dostępu do informacji z systemu będzie zastosowane uwierzytelnienie osób otrzymujących informację.

Uwierzytelnienie jest realizowane w dwóch etapach: identyfikacji kiedy sprawdza się czy dany podmiot jest naprawdę tym za kogo się podaje i autoryzacji, kiedy sprawdza się, jakie uprawnienia ma podmiot do dostępu do wybranej informacji.

Całość informacji przesyłanej w systemie przez wszystkie media będzie szyfrowana.

Sytuacje awaryjne dotyczące pracy systemu i wzrostu zanieczyszczenia środowiska będą sygnalizowane odpowiednio personelowi zarządzającemu systemem i grupom ratunkowym za pomocą komunikatów SMS przesyłanych przez sieć GSM i e-maili – poprzez Internet z użyciem pocztowych protokołów sieciowych SMTP i POP3.

Serwer będzie wykonywał szereg aplikacji pod systemem operacyjnym Linux lub Windows.

Podstawową jest aplikacja obsługująca komunikację z punktami pomiarowymi według odpowied-niego protokołu transmisyjnego.

Kolejna aplikacja zapisuje dane z punktów pomiarowych w bazie danych (MySQL lub Postgres).

Serwer prezentuje wyniki pomiarów w postaci stron internetowych upoważnionym osobom. Informacja o skażeniach i stanie pracy systemu jest przedstawiana na mapie lokalizującej położenie punktów pomiarowych.

Pakiet oprogramowania dla Windows Visual 2005 daje duże możliwości Studio przy opracowywaniu aplikacji web z użyciem ASP.NET. Środowisko Visual Studio IDE jest interesującą alternatywą dla narzędzi web systemu operacyjnego Unix, ponieważ umożliwia bezpośredni dostęp do Inter-fejsu GUI systemu Windows i baz danych. Serwer web IIS obsługujący aplikacje stworzone może być zainstalowany w Visual Studio w systemach operacyjnych Windows XP i Windows Server 2003.

Dodatkową zaletą Visual Studio jest możliwość programowania usług web na platformach ruchomych. Za pomocą narzędzia ASP Mobile Application Development można bardzo prosto obsługiwać dostęp w bardzo krótkim czasie (dla stanów alarmowych) do telefonów i palmtopów z GSM – stanowisk obsługi.

# **3. KOMUNIKACJA W SYSTEMIE**

## 3.1. Struktura ramki

Dla komunikacji w systemie pomiarowym opracowano własny format przesyłania komend i danych oraz protokół wymiany informacji. Są one dopasowane do potrzeb systemu pomiarowego.

Format przesyłania komend i danych w systemie dopuszcza wykorzystanie obu postaci informacji: tekstowa i binarnej. Ze względu na to, że informacja w Internecie przesyłana jest najczęściej w formacie tekstowym, to ten format przyjęto jako podstawowy dla systemu. Informacja tekstowa przesyłana jest w oryginalnej postaci. Przy czym jest czysty format tekstowy, a nie format XML, który dodaje znaczniki do tekstu. Informacja binarna w systemie przesyłana jest za pomocą znaków szesnastkowych ASCII. Taki sposób kodowania informacji ma następujące zalety w porównaniu z XML: znacznie mniejszą ilość przesyłanych danych, większą szybkość przesyłania danych, mniejszy wpływ błędów w transmisji, większą szybkość przetwarzania informacji po stronie nadawczej i odbiorczej.

Przesyłana informacja obudowywana jest w dodatkową informację tworzącą strukturę ramki i zawierającą: pola sterujące, pola danych, dane tekstowe, dane binarne i algebraiczną sumę kontrolną (rys. 7). Pola sterujące zawierają: numer stanowiska pomiarowego, numer ramki, data i czas, typ komendy lub informacji statusowej, długość danych tekstowych, długość danych binarnych. Pola danych zawierają dane tekstowe i dane binarne.

Pola sterujące	Pola danych	Suma kontrolna

Rys. 7. Struktura ramki dla przesyłania informacji

protokół wymiany informacji Opracowany realizuje szereg zadań. Obsługuje sytuacje awaryjne przy nadawaniu informacji poprzez kontrolę potwierdzeń odbioru ramek. Obsługuje sytuacje awaryjne przy odbiorze informacji poprzez sprawdzanie prawidłowości postaci ramki, wykrywanie błędów transmisji za pomocą sumy kontrolnej i wysyłanie żądań powtórzenia nadania ramki. Protokół wymiany informacji obsługuje także pliki diagnostyczne nadawania i odbioru oraz wymiany informacji. Pliki te rejestrują zdarzenia dotyczące obsługi informacji w systemie.

## 3.2. Komendy i informacja statusowa

Zestaw komend dla kierunku transmisji: serwer → stanowisko pomiarowe steruje pracą stanowiska pomiarowego. Inicjuje jego pracę, przesyła wszystkie niezbędne parametry. Określa odstępy czasu pomiędzy pomiarami, zgłasza żądanie zrzutu archiwum do serwera oraz zgłasza żądanie przesłania informacji statusowej do serwera.

Zestaw komend dla kierunku transmisji: serwer ← stanowisko pomiarowe określa postać informacji dotyczącej pracy stanowiska pomiarowego. Przesyłane są dane pomiarowe do serwera zgodnie z komendą z serwera oraz sygnalizowane są sytuacje awaryjne (podwyższony stan zanieczyszczeń, przepełnienie lokalnego bufora danych i nieprawidłowości w pracy stanowiska pomiarowego).

# Zakończenie

W artykule przedstawiono warianty budowanych autonomicznych stanowisk pomiarowych do monitorowania skażeń wód powierzchniowych produktami ropopochodnymi. Stanowiska te sa terytorialnie systemu cześcia rozproszonego pomiarowego, który aktualnie powstaje na Politechnice Warszawskiej. Analiza metod przesyłu informacji w systemach terytorialnie rozproszonych wskazała na konieczność zastosowania łączności radiowej GSM/GPRS pomiędzy elementami systemu. Dodatkowo, prowadzona analiza wskazała na możliwość efektywnego wykorzystania serwera WWW jako centralnej jednostki zarządzającej wymianą informacji pomiędzy autonomicznymi punktami pomiarowymi a potencjalnymi odbiorcami. Dane pomiarowe są zbierane przez serwer WWW, który je przetwarza i udostępnia upoważnionym osobom w postaci stron WWW. Serwer służy także do sterowania systemem pomiarowym.

W roku 2007 przewidywane jest uruchomienie całości systemu pomiarowego w wybranych punktach na terenie kraju oraz włączenie go do krajowej sieci wczesnego ostrzegania przed katastrofami ekologicznymi. Prowadzone prace finansowane są w ramach programu wieloletniego PW-004 "Metody i urządzenia do wykrywania i monitorowania zanieczyszczeń wód i ścieków produktami ropopochodnymi".

# LITERATURA

- [1] PC/104 Embedded Consortium *PC/104 Specification Version 2.4*, San Francisco, August 2001.
- [2] Intel Corporation IA-32 Intel<sup>®</sup> Architecture Software Developer's Manual, Santa Clara, 2005.
- [3] Geoff Sanders et al., *GPRS Networks*, London, John Wiley & Sons Ltd. 2003.
- [4] Karim Yaghmour, *Building Embedded Linux Systems*, Farnham, O'Reilly Media, 2003.
- [5] Philips LPC2292/LPC2294 16-bit/32-bit ARM microcontrollers. Product data sheet Rev. 03, Eindhoven, November 2005.
- [6] PHYTEC *phyCORE-LPC2292/94 Hardware Manual*, Mainz, PHYTEC, October 2005.



Prof. dr hab. inż. Andrzej MICHALSKI jest autorem ponad 100 publikacji w czasopismach i materiałach konferencyjnych. Od szeregu lat zajmuje się zagadnieniami pomiaru wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi. Jest członkiem IEEE

Instrumentation and Measurement Society o statusie Senior Member.



Dr inż. Andrzej KALICKI jest autorem około 30 publikacji. Jego zainteresowania naukowe dotyczą systemów pomiarowych, telemetrii i przetwarzania danych pomiarowych.

# MODELE I REGUŁY DECYZYJNE W SYMPTOMOWEJ DIAGNOSTYCE TECHNICZNEJ

Aleksander JASTRIEBOW, Stanisław GAD, Grzegorz SŁOŃ

#### Politechnika Świętokrzyska Al. Tysiąclecia P. P. 7, 25-314 Kielce, e-mail: <u>enegs@tu.kielce.pl</u>

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono modele i reguły decyzyjne stosowane w symptomowej diagnostyce technicznej. Modele podzielono na dwie grupy: matematyczne i informacyjne. Opisano kryteria budowy takich modeli. Na podstawie opisanych modeli przedstawiono reguły decyzyjne. Na przykładzie diagnozowania wyposażenia elektrycznego samochodów przedstawiono wyniki symulacyjnej analizy wybranych reguł. Wyniki analizy potwierdzają wysoką efektywność metod opartych na sztucznych sieciach neuronowych.

Słowa kluczowe: model matematyczny i informacyjny, sztuczne sieci neuronowe, reguły logiczne, reguły numeryczne, diagnostyka, pojazdy.

#### MODELS AND DECISION RULES IN SYMPTOM TECHNICAL DIAGNOSTIC

#### Summary

In the paper models and decision rules, applied in the symptom technical diagnostic, are presented. Models have been split into two groups: mathematical and informative. Criterions of designing of such models are described. On the basis of described models, decision rules have been presented. Results of the simulating analysis of chosen rules have been presented on the example of diagnosing of car's electrical equipment. Results of the analysis confirm high efficiency of methods artificial neural networks.

Keywords: mathematical and informative model, artificial neural networks, logic rules, numeric rules, diagnostic, vehicles.

## 1. WSTĘP

Nowoczesne systemy decyzyjne w diagnostyce technicznej w większości oparte są na odpowiednim modelu i metodzie diagnozowania, zastosowanie których przeważnie zależy zarówno od złożoności badanego obiektu jak i istnienia odpowiedniej informacji o jego związkach wewnętrznych, parametrach wejściowo – wyjściowych, urządzeniach pomiarowych i innych [3, 5, 6].

Modele, a w związku z tym i metody, stosowane w diagnostyce technicznej zależą od wybranego podejścia do rozwiązywanego problemu i mogą być podzielone na następujące klasy:

- modele matematyczne oparte na analizie wewnętrznych powiązań obiektu diagnozowania;
- modele informacyjne (cybernetyczne), oparte na aproksymacji zależności wyjścia (uszkodzenia) od wejścia (symptomy) diagnozowanego systemu.

Do pierwszej klasy można odnieść znane modele opisywane równaniami różniczkowymi (różnicowymi) stanu, różne filtry typu Kalmana, Luenbergera, regułach logicznych, algorytmach numerycznych i innych [6]. Druga grupa reguł decyzyjnych oparta jest na tzw. zależnościach wyjścia od wejścia (podejście cybernetyczne albo informacyjne), które można nazwać metodami uczącymi, realizowanymi na podstawie danych eksperymentalnych: wejściowych i wyjściowych. Do takich modeli można odnieść reguły decyzyjne oparte na sztucznych sieciach neuronowych, neuronowo – rozmytych, algorytmach genetycznych, systemach eksperckich i innych [1, 2, 6, 8].

W drugim rozdziale niniejszego referatu opisano matematyczne i informacyjne modele diagnostyki technicznej symptomowej (z jednej strony logiczne, numeryczne, bayes'owskie i rozmyte, a z drugiej sztuczne sieci neuronowe typu MLP, TSK).

W oparciu o przedstawione modele, w rozdziale 3 przedstawiono algorytmy diagnostyczne i ich możliwe realizacje komputerowe (reguły logiczne, numeryczne, bayes'owskie oraz MLP, TSK, banki sztucznych sieci neuronowych oraz sieci neuronowe o specjalnej strukturze).

W rozdziale 4, na przykładzie diagnozowania wybranych elementów elektrycznego wyposażenia samochodu, przedstawiono wyniki analizy symulacyjnej zaproponowanych metod diagnozowania. Z przedstawionej analizy wynika, że z punktu widzenia dokładności najbardziej efektywnymi są reguły oparte na bankach sztucznych sieci neuronowych. Dokładniejszy opis wad i zalet poszczególnych metod zamieszczono we wnioskach.

Literatura zawiera niektóre znane autorom pozycje związane z omawianą tematyką.

## 2. MODELE (MATEMATYCZNE I INFORMACYJNE) W SYMPTOMOWYCH SYSTEMACH DIAGNOZOWANIA

Proces symptomowego diagnozowania oparty jest na następującej transformacji pewnych danych informacyjnych w odpowiednie symptomy (cechy) obiektu diagnostycznego (rys. 1).



 $\begin{array}{l} Rys. \ 1. \ Schemat \ procesu\\ symptomowego \ diagnozowania\\ układów technicznych. \ (X=[X_1, X_2, ..., X_n]^T - dane \ pomiarowe\\ (informacyjne), \ S=[S_1, S_2, ..., S_k]^T - dane \ symptomowe, \ F=[F_1, F_2, ..., F_l]^T - dane \ wyjściowe (uszkodzenia)). \end{array}$ 

Modele matematyczne i informacyjne symptomowych systemów diagnozowania buduje się w oparciu o podejście, przedstawione na rys. 2.





Zależności między F i S, wg na rys. 2, mogą być zapisane następująco:

$$\mathbf{F} = \Phi[\mathbf{S}]. \tag{1}$$

Dla odnalezienia nieznanej funkcji  $\Phi$  buduje się model decyzyjny w postaci (2):

$$\hat{\mathbf{F}} = \mathbf{G}[\mathbf{S}], \qquad (2)$$

gdzie:

G[] – aproksymujący model  $\Phi$ [],  $\hat{F}$  – ocena F.

Wtedy dla znalezienia modelu G w (2) z zadanej klasy należy rozwiązać następujący problem optymalizacyjny:

$$\mathbf{E} = \left\| \mathbf{G} - \Phi \right\| \to \inf_{\mathbf{G} \in K_{\mathbf{G}}} , \qquad (3)$$

gdzie:  $\|\| \|$  – odpowiednio wybrana norma bliskości, K<sub>G</sub> – wybrana klasa modeli G, E – błąd modelowania.

Od istnienia tej lub innej informacji o problemie (3) zależy wybór odpowiedniego modelu G i reguły symptomowego decyzyjnego diagnozowania [6].

Poniżej przedstawiono 2 ważne podejścia do rozwiązywania problemu (3) – matematyczne i informacyjne (cybernetyczne). Trzeba zauważyć, że, oprócz prezentowanych, istnieją inne modele np. adaptacyjny, które również mogą być stosowane w zależności od jakości posiadanej informacji [1, 3].

# 2.1. Symptomowe diagnostyczne modele matematyczne

Modele tego typu dla obiektów diagnostycznych będą przedstawione w postaci (opracowanych na podstawie wiedzy teoretycznej i ekspertowej) następujących zbiorów (należy zauważyć, że istnieją pewne metody opracowania symptomów, oparte na analizie sygnałów stanów (residuów) [6]):

- możliwych uszkodzeń ( $\mathbf{F} = [\mathbf{F}_1, ..., \mathbf{F}_l]^T$ );
- odpowiadających im symptomów (S=[S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, ...,  $S_k$ ]<sup>T</sup>);
- oraz pewnych matematycznych połączeń (tablic) między F i S.

#### A. Logiczne modele symptomowe

W takich modelach dodatkowo do F i S należy zastosować następującą wiedzę:

 zbiór (PG) granic zmian sygnałów symptomowych dla pracy normalnej i z uszkodzeniami:

$$PG = \begin{cases} S_i \in [a_i, b_i] - \text{normaln} a \text{ praca} \\ S_i \notin [a_i, b_i] - \text{uszkodzenie} \end{cases}, \quad (4)$$

(i = 1, ..., k);

 logiczne relacje (LR) między S i F określające dokładnie uszkodzenie lub normalną pracę:

$$S_{j} \to F_{j1} \lor F_{j2} \lor \dots \lor F_{jk}$$
<sup>(5)</sup>

$$j = 1, ..., k; \{j1, j2, ..., jk\} \in \{1, 2, ..., k\}$$
.

Wtedy, uwzględniając (4), (5), model logiczny może być przedstawiony w postaci następującego zbioru:

$$ML = \{S, F, PG, LR\}.$$
 (6)

Działanie modelu (6) i zbudowanych na jego podstawie logicznych reguł diagnozowania odbywa się bardzo dobrze przy precyzyjnie obliczanych granicach w (4). Niestety, niewielkie błędy są w stanie praktycznie wyeliminować prawidłowość relacji logicznych (5) w diagnozowaniu uszkodzeń.

## B. Numeryczne modele diagnostyczne

W numerycznych (kombinatorycznych) modelach symptomowych, oprócz zbiorów F, S, PG, powinny być opracowane [4]:

- zbiór klas uszkodzeń  $\Omega = {\Omega_1, ..., \Omega_m}$ , gdzie:  $\Omega_j = {F_{i_1}, ..., F_{i_j}} - zbiór uszkodzeń w j - klasie;$ (j = 1, ..., m);
- macierz informacyjną MI dla zadanych zbiorów
   F, S, Ω w następującej formie (7):

	Klasy Uszkodzenia Wartości symptomów					
	$(\Omega)$	obiektu	S1	$S_2$		$S_k$
	$\Omega_1$	F <sub>1</sub>	$\alpha_{11}$	$\alpha_{12}$		$\alpha_{1k}$
		F <sub>2</sub>	α <sub>21</sub>	$\alpha_{22}$		$\alpha_{2k}$
		Fn	$\alpha_{\eta 1}$	$\alpha_{\eta 2}$		$\alpha_{r_1k}$
		$F_{\eta+1}$	$\alpha_{n+11}$	$\alpha_{r_1+12}$		$\alpha_{n+1k}$
	$\Omega_2$	$F_{r_1+2}$	$\alpha_{r_1+21}$	$\alpha_{r_1+22}$		$\alpha_{r_1+2k}$
MI =		$F_{r_m}$	$\alpha_{r_m 1}$	$\alpha_{r_m 2}$	••••	$\alpha_{r_mk}$
	$\Omega_{\rm m}$	$F_{r_{m-1}+1}$	$\alpha_{r_{m-1}+11}$	$\alpha_{r_{m-1}+12}$		$\alpha_{r_{m-1}+1k}$
		$F_{r_{m-1}+2}$	$\alpha_{r_{m-1}+21}$	$\alpha_{r_{m-1}+22}$		$\alpha_{r_{m-1}+1k}$
		$F_{r_m}$	$\alpha_{r_m 1}$	$\alpha_{r_m 2}$		$\alpha_{r_mk}$
						(7)

gdzie:

 $\begin{array}{l} \alpha_{ij}=0,\ 1,\ \ldots \ - \ stopie\acute{n}\ ważności \ symptomu \ S_{j} \ dla \\ uszkodzenia \ F_{i} \ (np. \ 0 \ oznacza, \ ze \ S_{j} \ nie \ jest \\ symptomem \ uszkodzenia \ F_{i}), \ i=1,\ \ldots, l, \ j=1,\ \ldots, k. \end{array}$ 

Przy takim podejściu model numeryczny może być przedstawiony w następującej postaci:

$$MN = \{S, F, PG, MI\}.$$
 (8)

## C. Probabilistyczne modele diagnostyczne

W modelach probabilistycznych symptomy, uszkodzenia i inne parametry traktowane są jako zmienne losowe ze swoimi rozkładami prawdopodobieństwa. Przy pełnej znanej informacji o absolutnych i warunkowych rozkładach informacji zwykle stosowane są modele Bayes'a, a przy niepełnej – adaptacyjne, oparte na ocenach pewnych parametrów diagnostycznych [5]. W metodach Bayes'a zwykle zadana jest następująca informacja:

 zbiór absolutnych rozkładów prawdopodobieństw uszkodzeń:

$$FP = \{P(F_{1}(\omega)), P(F_{2}(\omega)), ..., P(F_{l}(\omega))\},\$$

gdzie:  $\omega \in \overline{\Omega}, \{\overline{\Omega}, \overline{F}, P\}$  – przestrzeń probabilistyczna,  $\omega$  – zdarzenie elementarne,  $\overline{\Omega}$  – zbiór zdarzeń elementarnych,  $\overline{F}$  –  $\delta$ -algebra  $\overline{\Omega}$ , P() – prawdopodobieństwo spełniające odpowiednie warunki;

 zbiór warunkowych rozkładów prawdopodobieństw w postaci macierzowej

$$PW = \{P\{S_j / F_i\}\} \}_{j=1,i=1}^{k,l}.$$

Wtedy model probabilistyczny może być przedstawiony następującą zależnością:

$$MP = \{S, F, FP, PW\}.$$
 (9)

#### D. Rozmyte modele diagnostyczne

W tego rodzaju modelach również należy określić zbiory S i F. Rozmyte modele symptomowe wykorzystują technikę zbiorów i logiki rozmytej, w której dla każdego symptomu ze zbioru S określa się przedział jego zmienności. Każdy taki przedział jest następnie podzielony na wybraną liczbę "podprzedziałów", dla których definiowane są odpowiednie zbiory funkcji przynależności.:

 $FS = \{\mu_i(S_j), j = 1, ..., k; i = 1, ..., r\}.$ 

Następnie budowana jest macierz diagnostyczna określająca powiązania zbioru symptomów S ze zbiorem uszkodzeń F:

	S F	$\mathbf{S}_1$	 $S_i$	 $S_k$
	$F_1$	γ <sub>11</sub>	 $\gamma_{1i}$	 $\gamma_{1k}$
MD –	F <sub>2</sub>	γ <sub>21</sub>	 $\gamma_{2i}$	 $\gamma_{2k}$
MD –			 	 
	Fi	$\gamma_{j1}$	 γ <sub>ji</sub>	 $\gamma_{jk}$
	F <sub>1</sub>	$\gamma_{j1}$	 γ <sub>i</sub> ı	 $\gamma_{jk}$

gdzie:

$$\gamma_{ji} = \begin{cases} 1, S_i \text{ jest symptomem } F_j \\ 0, S_i \text{ nie jest symptomem } F_i \end{cases}$$

Wtedy model rozmyty może być przedstawiony w postaci:

$$MR = \{S, F, FS, MD\}.$$
 (10)

# 2.2. Symptomowe informacyjne modele diagnostyczne

Przy realizacji symptomowych modeli informacyjnych zadanie optymalizacji (3) powinno być zamienione na następujące:

$$E_u = \sum_{S} \left\| G(S) - F \right\| \to \min_{S} , \qquad (11)$$

gdzie: E<sub>u</sub> – nazywa się zwykle błędem uczenia.

Do tego błędu dochodzi też tzw. błąd uogólnienia  $E_G$ , otrzymywany zwykle przy testowaniu zbudowanego modelu na danych S, nie należących do próbki uczącej. W związku z tym ogólny błąd E będzie się składał z sum tych części:

 $E = E_u + E_G$  (12) Jest jasne, że w dobrze zbudowanych modelach informacyjnych:

$$E_u \rightarrow 0, E_G \rightarrow 0$$
 (13)

Trzeba jednak zauważyć, że nie we wszystkich uczących modelach informacyjnych może być spełniona zależność (13) (co oznacza, że E w (12) nie dąży do zera). Takie modele zwykle nazywane są modelami źle uwarunkowanymi i trzeba o tym pamiętać przy budowie np. modeli opartych na sztucznych sieciach neuronowych. Poniżej zaprezentowano najpowszechniejsze uczące modele informacyjne.

#### A. Modele neuronowe typu MLP

Modele neuronowe przy realizacji w zasadzie potrzebują bardzo mało informacji, a konkretnie – zbiorów S i F. Przy tym zbiór S gra rolę sygnałów wejściowych (uczących), a zbiór F odpowiednich sygnałów wyjściowych (nauczyciela), w budowanych regułach decyzyjnych opartych na jednokierunkowych sztucznych sieciach neuronowych (MLP). Do tych modeli trzeba dodać liczbę warstw ukrytych (WU) neuronów, funkcję aktywacji (FA) oraz algorytm uczenia. Wtedy model neuronowy typu MPL można przedstawić w postaci:

$$MSN = \{S, F, WU, FA\}.$$
 (14)

#### B. Modele neuronowo-rozmyte typu TSK

Struktura tych neuronowo-rozmytych modeli powinna realizować reguły rozmyte oparte na modelach (10). Te modele mają strukturę MLP ze zbiorami S, F na wejściu i wyjściu (dane uczące) oraz pięcioma warstwami ukrytymi, realizującymi procedurę wnioskowania rozmytego. Przy tym w pierwszej i drugiej warstwie ukrytej funkcja aktywacji odpowiada wybranej funkcji wyostrzenia (zazwyczaj funkcja Gauss'a), a w pozostałych – ma charakter liniowy [2, 6]. Takie modele mają następującą strukturę:

$$MNR = \{S, F, FL\},$$
 (15)

gdzie: FL – wektor liniowych funkcji wyjściowych MLP (wnioskowanie TSK) aproksymujących F.

#### C. Banki modeli MLP i TSK

Banki MLP i TSK odpwiednio składają się z l (liczba uszkodzeń F) modeli MSN i MNR i wyglądają następująco:

 $-BMSN = \{MSN(i) = \{S, F_i, WU, FA\}, i = 1, ..., l\},$  $-BMNR = \{MNR(i) = \{S, F_i, FL_i\}, i = 1, ..., l\},$ advie: MSN(i) = model (12) MNR(i) = model (14)

gdzie: MSN(i) – model (13), MNR(i) – model (14) dla i-tego uszkodzenia

#### D. Sieci neuronowe o specjalnej strukturze

odele oparte na jednokierunkowych sztucznych sieciach neuronowych o specjalnej strukturze ogą zawierać cztery elementy [2]:

- warstwa wejściowa (S);
- warstwa wyjściowa (F);
- możliwa jedna warstwa ukryta;
- połączenie bezpośrednie S z F.

Neurony w takich sieciach realizują zwykle aproksymacje funkcji logicznych (np. AND i OR). Takie sieci już przy budowie potrzebują dodatkowej informacji, opartej na powiązaniu między zbiorami S i F (np. w postaci macierzy diagnostycznych albo funkcji logicznych). W związku z tym takie modele mogą być zapisane w postaci:

$$MSS = \{S, F, MLI, FL\},$$
(16)

gdzie: ML – dodatkowe logiczne informacje o powiązaniach pomiędzy S i F,

FL – funkcje logiczne (np. AND, OR i inne).

Trzeba zauważyć, że takie sieci nie potrzebują procesu uczenia, a przy budowie odpowiednie wagi określa się zazwyczaj zerami lub jedynkami.

#### 3. REGUŁY DIAGNOSTYCZNE

Ogólnie reguły diagnostyczne w symptomowej diagnostyce można przedstawić jak na rys. 4





W zależności od modeli opisujących powiązania zbiorów S i F z możliwymi "kosztami" C, poniżej opisano pokrótce reguły diagnostyczne RD.

#### 3.1. Reguły diagnostyczne dla modeli matematycznych

#### A. Logiczne reguly diagnostyczne (LRD)

Logiczne reguły diagnostyczne, odpowiadające modelowi logicznemu (6), mogą być przedstawione w następującej formie:

$$\begin{split} \mathbf{S}_{i1} \wedge \mathbf{S}_{i2} \wedge ... \wedge \mathbf{S}_{il} \rightarrow \mathbf{F}_i \quad (17) \\ (i = 1, ..., l; \{i1, i2, ..., il\} \in \{1, 2, ..., l\}) \end{split}$$

Często, jako alternatywę dla (17) można stosować (18):

 $\overline{S}_1 \wedge ... \wedge (S_{i1} \wedge S_{i2} \wedge ... \wedge S_{i1}) \wedge ... \wedge \overline{S}_k \rightarrow F_i$  (18) gdzie uwzględnia się odwrotne własności pozostałych sygnałów ze zbioru S, ie będących symptomami uszkodzenia Fi.

Podobne podejście pozwala na znalezienie jednoznacznego rozwiązania w przypadku niejednoznaczności odwzorowania między zbiorami S i F.

Trzeba zauważyć, że:

- odwzorowanie za pomocą LRD jest szybkie i dokładne;
- wadą tej metody jest brak odporności na drobne przekłamania sygnałów symptomowych oraz ich granic ze zbioru PG.

## B. Numeryczne reguły diagnostyczne (NRD)

Dla modeli numerycznych (8) powinna być określona, na podstawie zmierzonych sygnałów

symptomowych, w postaci "zero-jedynkowej" wartość obiektu diagnozowania (19) [4]:

$$gdzie: \beta_{i} = \begin{cases} \beta_{1}, \beta_{2}, ..., \beta_{k} \end{bmatrix},$$
(19)  
gdzie:  $\beta_{i} = \begin{cases} 0 & gdy S_{j} \text{ nie jest symptomem } F_{i} \\ 1 & gdy S_{j} \text{ nie symptomem } F_{i} \end{cases}$ 

Kolejne kroki w opracowaniu numerycznych algorytmów diagnostycznych są następujące. 1) Wprowadzenie podzbiorów S typu:

$$S^{n} = \left\{ \{S_{i_{1}}, ..., S_{i_{n}}\}, \quad i_{1}, ..., i_{n} \in \{1, 2, ..., k\} \right\} (20)$$
  
gdzie:  $n = 1, 2, 3, ..., k$ .

Wtedy, stosując (20), można określić

$$\overline{S} = \{S^1, S^2, ..., S^k\},$$
 (21)

który jest zbiorem wszystkich podzbiorów S. 2) Określenie kryteriów diagnozowania w postaci pewnych zadań optymalizacji (22), (23), (24):

$$\max_{1 \le j \le m} I(\omega, \Omega_j) \tag{22}$$

$$\left|I(\boldsymbol{\omega},\boldsymbol{\Omega}_{j^*}) - I(\boldsymbol{\omega},\boldsymbol{\Omega}_{j})\right| \ge \eta_1, \quad j = 1, ..., m; \quad j \neq j^* \quad (23)$$

$$\frac{I(\omega,\Omega_{j^*})}{\sum_{j\neq j^*} I(\omega,\Omega_j)} \ge \eta_2$$
(24)

W (22) ÷ (24) wprowadzono następujące oznaczenia:

a) 
$$I(\omega, \Omega_j) = \frac{1}{r_j - r_{j-1}} \sum_{S^i} I_{S^i}(\omega, \Omega_j)$$
 (25)

gdzie: { $I_{s^i}(\omega,\Omega_j)$ , i = 1, ..., k; j = 1, ..., m},  $I_{s^i}(\omega,\Omega_j)$  – liczba całkowita określająca podobieństwo (w szczególności równość) części obiektu  $\omega$  z klasą uszkodzeń  $\Omega_j$ , wyznaczana na podstawie porównań, na zbiorach S<sup>i</sup> mocy i (i = 1, ..., k), obiektu  $\omega$  z odpowiednimi wierszami obiektu  $\Omega_j$  – zgodnie z macierzą MI.

b) dla zbioru  $\overline{S}$ ,  $I(\omega, \Omega_j)$  wyznacza się na podstawie następującej zależności:

$$I(\omega, \Omega_j) = \frac{1}{r_j - r_{j-1}} \sum_{\Omega_j} \left( 2^{\rho(\omega_{r_j}, \omega)} - 1 \right), \quad (26)$$

gdzie: j = 1, ..., m;  $\rho(\omega_{r_j}, \omega)$  - liczba całkowita, spełniająca warunki podobieństwa (w szczególności równości) opisane w a).

c) warunki podobne do b), a I( $\omega$ ,  $\Omega_j$ ) wyznacza się na podstawie zależności:

$$I(\omega, \Omega_j) = \frac{1}{r_j - r_{j-1}} \sum_{\Omega_j} \left( 2^{\rho(\omega_{r_j}, \omega)} \right), \quad (27)$$

gdzie: j = 1, ..., m;  $\rho(\omega_{r_j}, \omega)$  - liczba całkowita, spełniająca podobne jak w b) warunki podobieństwa (w szczególności równości), opisane w a). 3) Określenie reguł decyzyjnych jako pewnych metod numerycznych rozwiązywania zadań optymalizacji (21), (22) lub (23) z uwzględnieniem (24), (25), (26).

Podsumowując powyższe rozważania można ogólnie przedstawić NRD w postaci następujących kroków:

- Określenie systemu podzbiorów {S<sup>J</sup>, j = 1, ..., k} dla wybranej wartości j.
- Określenie kryteriów podobieństwa obiektu i macierzy informacyjnej MI.
- Wybór kryterium spośród (21) ÷ (23) z uwzględnieniem zależności (24) ÷ (26).
- Diagnoza klasy uszkodzeń j<sup>\*</sup> z możliwością wskazania najbardziej prawdopodobnego uszkodzenia z tej klasy (F<sub>j</sub>\*).
- C. Probabilistyczne reguły diagnostyczne (PRD)

Probabilistyczne (Bayes'owskie) reguły diagnostyczne, oparte na modelach (9), określa się następującymi zależnościami [5]:

$$F_{j^*} = \underset{\substack{1 \le j^* \le l}}{\operatorname{arg\,max}} P(F_j/S), \qquad (28)$$

$$P(F_j/S) = \left[ P(F_j(\omega)) \cdot P(S/F_j) \right] / P(S) , \quad (29)$$

$$P(S) = \sum_{j=1}^{l} P(F_j(\omega)) \cdot P(S/F_j), \quad (30)$$

gdzie:  $P(S/F_j)$  – warunkowe prawdopodobieństwo zbioru symptomów S przy zadanym  $F_j$ .

#### D. Rozmyte reguly diagnostyczne (RRD)

Rozmyte reguły diagnostyczne oparte są na logice i wnioskowaniu rozmytym i realizowane (z uwzględnieniem modeli (10)) za pomocą logiki IF – THEN [6, 8].

# 3.2. Reguly decyzyjne diagnostyczne dla modeli informacyjnych

Proces budowy modeli informacyjnych i reguł decyzyjnych przedstawiono poniżej (rys. 5).

Poniżej zostaną przedstawione wybrane reguły decyzyjne – diagnostyczne opisane na rys. 5 b).



Rys. 5. Ogólny schemat budowy modelu informacyjnego (a) oraz reguły diagnostycznej (b). (S – zbiór symptomów, F – zbiór uszkodzeń,  $\hat{F}$  – zbiór ocen uszkodzeń,  $\varepsilon$  – różnica między uszkodzeniami i ich ocenami, W – zbiór regulowanych parametrów modelu, W\* – zbiór parametrów optymalnych)

#### A. Reguly decyzyjne oparte na MLP

Na rys. 6 przedstawiono model informacyjny oraz algorytm podejmowania decyzji opartych na jednokierunkowych, wielowarstwowych sztucznych sieciach neuronowych typu MLP [2].



Rys. 6. Schemat reguły decyzyjnej diagnostycznej opartej na MLP

B. Neuronowo – rozmyte reguly decyzyjne oparte na TSK

Na rys. 7 przedstawiono model informacyjny oraz algorytm podejmowania decyzji opartych na rozmyto-neuronowych sztucznych sieciach typu TSK [2].



Rys. 7. Ogólny schemat reguł decyzyjnych diagnostycznych opartych na sieciach neuronowo-rozmytych typu TSK. (L1 ÷ L6 – warstwa neuronów z gaussowskimi funkcjami aktywacji w L1 i L2)

C. Reguły decyzyjne oparte na banku sieci MLP i TSK

Na rys. 8 przedstawiono schemat reguł decyzyjnych opartych na banku sieci MLP (TSK), który zawiera zestaw pojedynczych sieci MLP (TSK) (wg rys. 6 i 7), służących do lokalizacji poszczególnych uszkodzeń  $F_1 \div F_1$ .



Rys. 8. Schemat reguł decyzyjnych opartych na banku sieci MLP (TSK). (DB<sub>1</sub> ÷ DB<sub>1</sub> – bloki dyskryminacyjne, LB<sub>1</sub> ÷ LB<sub>1</sub> – bloki lokalizacyjne)

D. Reguły decyzyjne oparte na sztucznych sieciach neuronowych o specjalnej strukturze

Na rys. 9 zaprezentowano schemat reguł decyzyjnych opartych na jednokierunkowych sztucznych sieciach neuronowych o specjalnej strukturze. Szczególną uwagę należy zwrócić na to, że przy stosowaniu takich sieci na wyjściu otrzymuje się informację o uszkodzeniach, które faktycznie występują przy zadanej informacji o symptomach.



Rys. 9. Schemat reguł decyzyjnych opartych na jednokierunkowych sztucznych sieciach neuronowych o specjalnej strukturze (∩, U – oznaczenia sztucznych neuronów realizujących operacje logiczne: AND i OR)

## 4. WYBRANE WYNIKI ANALIZY SYMULA-CYJNEJ REGUŁ DECYZYJNYCH PRZY DIAGNOZOWANIU URZĄDZEŃ ELEKTRYCZNEGO WYPOSAŻENIA SAMOCHODU

Działanie reguł i modeli diagnostycznych opisanych w rozdziałach 2 i 3 poddano analizie symulacyjnej dla wybranych urządzeń elektrycznego wyposażenia pojazdu samochodowego [2]. Poniżej, w tablicach 1 i 2, przedstawiono zbiory sypmtomów i uszkodzeń dla wybranych urządzeń elektrycznego wyposażenia samochodu.

Tablica 1.

		Zuloi wybranych sygnatow symptomowych
$S_1$	_	napięcie akumulatora
$S_2$	_	napięcie regulowane - wyjście z alternatora
$S_3$	_	prąd wzbudzania alternatora
$S_4$	_	sygnał z wyłącznika zapłonu - 1
$S_5$	_	sygnał zapłonowy z wyłącznika zapłonu
S <sub>6</sub>	_	czujnik położenia i prędkości wału korbowego CPS
$S_7$	_	sygnał immobilisera
$S_8$	_	sygnał z czujnika spalania detonacyjnego
S9	_	sygnał z czujnika temperatury powietrza MAT
$S_{10}$	_	sygnał zasilania przekaźnika pompy paliwa
S <sub>11</sub>	_	sygnał zasilania pompy paliwa
S <sub>12</sub>	_	sygnał strumień zasilania paliwem (ciśnienie paliwa)
S <sub>13</sub>	_	sygnał z czujnika poziomu paliwa
S <sub>14</sub>	_	sygnał z czujnika położenia przepustnicy
S <sub>15</sub>	_	sygnał z czujnika pedału przyspieszenia
$S_{16}$	_	sygnał wtryskiwacza
$S_{17}$	_	wtryskiwacz
S <sub>18</sub>	_	sygnał z wyłącznika zapłonu pojazdu, załączający wyłącznik elektromechaniczny rozrusznika
S <sub>19</sub>	_	sygnał załącznika styków wyłącznika elektromechanicznego rozrusznika
S <sub>20</sub>	_	sygnał prądowy zasilania uzwojeń rozrusznika

$S_{21}$	_	moment obrotowy wirnika rozrusznika
S <sub>22</sub>	_	sygnał sterujący impulsem zapłonu
		elektronicznego
S <sub>23</sub>	_	sygnał wn z cewki
S <sub>24</sub>	_	sygnał wn na świecy
S <sub>25</sub>	_	iskra zapłonowa
S <sub>26</sub>	_	sygnał z czujnika temperatury silnika CTS
S <sub>27</sub>	_	sygnał zał. wentylatora chłodnicy I
S <sub>28</sub>	_	sygnał zał. wentylatora chłodnicy II
$S_{29}$	_	sygnał z czujnika ciśnienia w obwodzie
		chłodzenia
S <sub>30</sub>	_	sygnał z czujnika temperatury oleju
S <sub>31</sub>	_	sygnał z Sondy λ1
S <sub>32</sub>	_	sygnał z Sondy $\lambda 2$
S <sub>33</sub>	_	układ recyrkulacji spalin
S <sub>34</sub>	_	sygnał z czujnika ciśnienia w kolektorze
		ssącym MAP
S <sub>35</sub>	_	sygnał z czujnika ciśnienia oleju
S <sub>36</sub>	_	zawór zmiennej geometrii układu dolotowego VIGS

Tablica 2. Zbiór wybranych uszkodzeń

F <sub>0</sub>	_	poprawna praca
$F_1$	_	uszkodzenie silnika spalinowego (silnik
		uszkodzony awaryjnie - zablokowany)
$F_2$	_	uszkodzenie immobilisera
F <sub>3</sub>	_	uszkodzenie czujnika położenia i prędkości
		wału korbowego CPS
F <sub>4</sub>	_	uszkodzenie alternatora
F <sub>5</sub>	_	uszkodzenie regulatora napięcia
F <sub>6</sub>	_	uszkodzenie akumulatora
$F_7$	_	uszkodzenie stacyjki
$F_8$	_	uszkodzenie elektrycznego sterownika układu
		zapłonowego
F9	_	uszkodzenie cewki zapłonowej
$F_{10}$	_	uszkodzenie przewodu zapłonowego
F <sub>11</sub>	_	uszkodzenie świecy zapłonowej
F <sub>12</sub>	_	uszkodzenie stacyjki
F <sub>13</sub>	_	uszkodzenie przewodu stacyjka - rozrusznik
$F_{14}$	_	uszkodzenie wyłącznika
		elektromagnetycznego
F <sub>15</sub>	_	uszkodzenie rozrusznika
$F_{16}$	_	uszkodzenie mechanizmu sprzęgającego
F <sub>17</sub>	_	uszkodzenie przekaźnika pompy paliwa
$F_{18}$	_	uszkodzenie pompy paliwa
$F_{19}$	_	uszkodzenie sterownika urządzenia
		wtryskowego
$F_{20}$	_	uszkodzenie wtryskiwacza
F <sub>21</sub>	_	uszkodzenie termostatu
F <sub>22</sub>	_	nieszczelność układu chłodzenia
F <sub>23</sub>	_	uszkodzenie wentylatora układu chłodzenia
F <sub>24</sub>	_	uszkodzenie pompy olejowej
F <sub>25</sub>	_	zatkana magistrala olejowa
F <sub>26</sub>	_	uszkodzenie zaworu recyrkulacji spalin

$F_{27}$ –	uszkodzenie sondy λ1
$F_{28} -$	uszkodzenie sondy $\lambda 2$
$F_{29} -$	uszkodzenie katalizatora
$F_{30} -$	uszkodzenie silnika spalinowego (silnik
	zużyty)
$F_{31} -$	nieszczelność w kolektorze ssącym
$F_{32}$ –	brak paliwa w zbiorniku
$F_{33} -$	brak ciśnienia w układzie smarowania

W tablicy 3 przedstawiono przedziały wartości pomiarowych sygnałów symptomowych określający stan pracy normalnej i z uszkodzeniami.

Tablica 3.	

	Wartości graniczne poszcz	zególnych symptomów						
	Uszkodzenie	Poprawna praca						
$S_1$	U < 13,5 V	13,5 V < U < 14,4 V						
S <sub>2</sub>	U < 13,8 V or U > 14,4 V	13,8 V < U < 14,4 V						
<b>S</b> <sub>3</sub>	I < 0,5 A or I> 3 A	0,5 A < I < 3 A						
$S_4$	U < 10,5 V  or  U > 14,4V	10,5 V < U < 14,4 V						
<b>S</b> <sub>5</sub>	U < 10,5 V or U > 14,4 V	10,5 V < U < 14,4 V						
$S_6$	U < 0,95 V or U > 1,2 V	0,95 V < U < 1,2 V						
$S_7$	U < 1,2 V	U > 1,2 V						
$S_8$	F < 115 Hz or F > 150 Hz	115 Hz < F < 150 Hz						
<b>S</b> <sub>9</sub>	$R < 40\Omega$ or $R > 80\Omega$	$40\Omega < R < 80\Omega$						
S <sub>10</sub>	U < 10,5 V or U > 14,4 V	10,5 V < U < 14,4 V						
$\mathbf{S}_{11}$	U < 8,0 V	U > 8,0 V						
S <sub>12</sub>	P < 283 kPa	283 kPa < P < 324 kPa						
$S_{13}$	U < 8,0 V	U > 8,0 V						
$S_{14}$	U < 0,4 V or U > 5,0 V	0,4 V < U < 5,0 V						
$\mathbf{S}_{15}$	zarezerwowane do przys	szłego wykorzystania						
$S_{16} \\$	R<11,6Ω or R>13,5Ω	$11,6\Omega < R < 12,40\Omega$						
$S_{17} \\$	U < 8,0 V	U > 8,0 V						
$S_{18} \\$	U < 8,0 V	U > 8,0 V						
$S_{19} \\$	U < 8,0 V	U > 11,5 V						
$S_{20} \\$	U < 8,0 V	U > 11,5 V						
$S_{21}$	M < 20 Nm	M > 20 Nm						
$S_{22}$	U < 0,2 V	U > 0,2 V						
$S_{23}$	U < 15,0 kV	U > 15,0 kV						
$S_{24}$	U < 15,0 kV	U > 15,0 kV						
$S_{25}$	zarezerwowane do przys	szłego wykorzystania						
$S_{26}$	U < 4,5 V  or  U > 5,5 V	4,5 V < U < 5,5 V						
$S_{27}$	$T < 90^{\circ} C \text{ or } T > 94^{\circ} C$	$90^{\circ} \text{ C} < \text{T} < 94^{\circ} \text{ C}$						
$S_{28} \\$	$T < 94^{0} C$	$94^{\circ} C < T < 97^{\circ} C$						
S <sub>29</sub>	P < 900 hPa or P > 1000 hPa	900 hPa < P < 1000 hPa						
$S_{30} \\$	zarezerwowane do przyszłego wykorzystania							

$S_{31}$	U < 300  mV  or  V > 800	300  mV < U < 800
	mV	mV
$S_{32}$	U < 300  mV  or  V > 800	300  mV < U < 800
	mV	mV
S33		R
S34	U < 1,0 V or U > 5,0 V	1,0 V < U < 5,0 V
S35	P < 2000 hPa or P >	2000 hPa < P < 3500
	3500 hPa	hPa
S36	$R < 11,\!6\Omega$ or $R > 12,\!4\Omega$	$11,6\Omega < R < 12,4\Omega$

Na podstawie tablicy i wiedzy eksperckiej opracowano macierz informacyjną MI (tablica 4) oraz podział uszkodzeń na klasy (tablica 5).

Tablica 4.

												B	in	ar	na	a 1	m	ac	ie	rz	z i	nf	0	rn	ıa	cy	/jr	ıa
F/S	s	ŝ	ŝ	$S_4$	š	$s_{e}$	Ś	s,	ŝ	$S_{10}$	$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{13}$	$S_{14}$	$S_{16}$	$S_{17}$	$S_{18}$	$S_{19}$	$S_{20}$	$\mathbf{S}_{21}$	$S_{22}$	$S_{23}$	$S_{24}$	$S_{26}$	$S_{27}$	$S_{31}$	$S_{32}$	$S_{33}$
$F_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$F_1$	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1
F <sub>30</sub>	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
$F_2$	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
F <sub>3</sub>	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1
F <sub>4</sub>	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$F_5$	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F <sub>6</sub>	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F <sub>7</sub>	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
$F_8$	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
F <sub>9</sub>	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1
F <sub>11</sub>	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1
F <sub>12</sub>	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
$F_{13}$	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
F <sub>14</sub>	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
F <sub>15</sub>	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
F <sub>16</sub>	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1
F <sub>17</sub>	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
$F_{18}$	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
F <sub>19</sub>	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
F <sub>20</sub>	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
F <sub>32</sub>	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
$F_{21}$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F22	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
F22	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
F32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
F27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
F <sub>28</sub>	Ũ	Ũ	Ũ	Ũ	0	Ũ	Ũ	Ũ	0	Ũ	0	0	Ũ	Ũ	0	0	0	Ũ	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Ũ
F <sub>29</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

\*\*\* \*\* \*\*

	Wytypowane klasy usz	kodzeń
Badany obwód	Uszkodzenia	Klasa
Silnik	F <sub>0</sub> , F <sub>1</sub> , F <sub>30</sub> , F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub>	$\Omega_1$
Układ zasilania	F <sub>4</sub> , F <sub>5</sub> , F <sub>6</sub>	$\Omega_2$
Układ zapłonowy	F <sub>7,</sub> F <sub>8</sub> , F <sub>9</sub> , F <sub>10</sub> , F <sub>11</sub>	$\Omega_3$
Układ rozruchu	F <sub>12</sub> , F <sub>13</sub> , F <sub>14</sub> , F <sub>15</sub> , F <sub>16</sub>	$\Omega_4$
Układ zas. w paliwo	F <sub>17</sub> , F <sub>18</sub> , F <sub>19</sub> , F <sub>20</sub> , F <sub>31</sub> , F <sub>32</sub>	$\Omega_5$
Układ chłodzenia	$F_{21}, F_{22}, F_{23}$	$\Omega_6$
Układ smarowania	F <sub>24</sub> , F <sub>25</sub> , F <sub>33</sub>	$\Omega_7$
Układ wydechowy	F <sub>26</sub> , F <sub>27</sub> , F <sub>28</sub> , F <sub>29</sub>	$\Omega_8$

---

Tablica 5.

Dla diagnozowania zastosowano następujące reguły:

- a) logiczne typu (17);
- b) logiczne typu (18);
- c) numeryczne typu NRD (n = 1, (22), (25));
- d) sieciowe oparte na MLP.

Badania symulacyjne przeprowadzono na opracowanym oprogramowaniu<sup>1</sup>, na próbkach losowych dla obiektu diagnozowania opisanego w tablicach od 1 do 5. Wyniki badań opisano w tablicach 6 i 7.

Tablica 6. Wyniki diagnozowania dla wybranych uszkodzeń

Uszkodzenie	Reguła Logiczna (17)	Reguła Logiczna (18)	Reguła numeryczna	Zastosowanie SSN	Uszkodzenie	Reguła Logiczna (17)	Reguła Logiczna (18)	Reguła numeryczna	Zastosowanie SSN	
F <sub>1</sub>	+	+*	+	+	F <sub>18</sub>	+	+*	+	+	
$F_2$	+	+*	+	+	F <sub>19</sub>	+	+*	+	+	
F <sub>3</sub>	+	+*	+	+	F <sub>20</sub>	+	+*	+	+	
$F_4$	+	+*	+	+	$F_{21}$	+	+*	+	+	
$F_5$	+	+*	+	+	F <sub>22</sub>	+	+*	+	+	
F <sub>6</sub>	+	+*	+	+	F <sub>23</sub>	+	+*	+	+	
$F_7$	+	+*	+	+	F <sub>24</sub>	+*	+*	+*	-	
F <sub>8</sub>	+	+*	+	+	F <sub>25</sub>	+*	+*	+*	-	
F9	+ +*		+	+	F <sub>26</sub>	+*	+*	+*	-	
$F_{10}$	+	+*	+	+	F <sub>27</sub>	+	+*	+	+	
F <sub>11</sub>	+*	+*	*	1	F <sub>28</sub>	+*	+*	+*	+	
F <sub>12</sub>	+	+*	+	+	F <sub>29</sub>	+*	+*	+*	-	
F <sub>13</sub>	+*	+*	+*	-	- F <sub>30</sub> +		+*	+	+	
F <sub>14</sub>	+*	+*	+*	+	F <sub>31</sub>	+*	+*	+*	+	
F <sub>15</sub>	+	+*	+	+	F <sub>32</sub>	+	+*	+	+	
F <sub>16</sub>	+	+*	+	+	F <sub>33</sub>	+	+*	+	+	
$F_{17}$	+	+*	+	+						

wy	yniki	diagn	OZOW	ania 2	z wyt	orem	klas	uszko	odzen	
Uszkodzenie	Reguła Logiczna (17)	Reguła Logiczna (18)	Reguła numeryczna	Zastosowanie SSN	Uszkodzenie	Reguła Logiczna (17)	Reguła Logiczna (18)	Reguła numeryczna	Zastosowanie SSN	
F <sub>1</sub>	+	-	+	+	F <sub>18</sub>	+	-	+	+	
$F_2$	+	-	+	+	F <sub>19</sub>	+	-	+	+	
F <sub>3</sub>	+	-	+	+	F <sub>20</sub>	+	-	+	+	
F <sub>4</sub>	+	+*	+	+	$F_{21}$	+	-	+	+	
F <sub>5</sub>	+	-	+	+	F <sub>22</sub>	+	-	+	+	
F <sub>6</sub>	+	+*	+	+	F <sub>23</sub>	+	+*	+	+	
F <sub>7</sub>	+	+*	+	+	F <sub>24</sub>	+	+	+	-	
F <sub>8</sub>	+	-	+	+	F <sub>25</sub>	+	+	+	-	
F9	+	-	+	+	F <sub>26</sub>	-	-	-	-	
$F_{10}$	+	-	+	+	F <sub>27</sub>	+	-	+	+	
F <sub>11</sub>	-	-	-	-	F <sub>28</sub>	+	+	+	+	
F <sub>12</sub>	+	+*	+	+	F <sub>29</sub>	+	+	+	+	
F <sub>13</sub>	+	I	+	+	F <sub>30</sub>	+	I	+	+	
F <sub>14</sub>	+	-	+	+	F <sub>31</sub>	-	-	-	+	
F <sub>15</sub>	+	-	+	+	F <sub>32</sub>	+	-	+	+	
F <sub>16</sub>	+	-	+	+	F <sub>33</sub>	+	+	+	+	
F <sub>17</sub>	+	-	+	+						

W tablicach 6 i 7 symbol "+" oznacza wynik diagnozowania poprawny, a "–" – wynik diagnozowania błędny (nie zdiagnozowano). Symbolem "\*" oznaczono niejednoznaczny wynik diagnozowania (wskazanie więcej niż jednego uszkodzenia).

przedstawia wyniki lokalizacji Rys. 10 przypadkowych uszkodzeń. Ponadto porównano wyniki diagnozowania dla reguł numerycznych i dla neuronowych typu MLP. Badania sieci próbkach symulujących przeprowadzono na dokonanie tysiąca pomiarów. Wykryto 180 rozbieżności przy lokalizacji uszkodzeń i 406 - przy rozpoznawaniu klas pomiędzy algorytmem numerycznym a MLP. Przy tym dodatkowo trzeba zauważyć, że wyniki działania algorytmu numerycznego (tym bardziej reguł logicznych) były często niejednoznaczna, a sieć neuronowa zawsze typowała jeden wynik.

Tablica 7.

1 1

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Obliczenia wykonane przez dyplomanta prof. A. Jastriebowa – Marcina Krysiaka – w ramach pracy inżynierskiej [7].



Rys. 10. Wyniki badań na 1000 próbkach losowych sygnałów symptomowych

Podsumowując wyniki przeprowadzonych badań można stwierdzić, że: najbardziej zawodna w diagnozowaniu uszkodzeń jest reguła logiczna (17), sieć neuronowa z zasady wskazuje jedno uszkodzenie oraz reguły numeryczne lepiej się sprawdzają przy określaniu klasy niż przy lokalizacji poszczególnych uszkodzeń.

# 5. WNIOSKI

Praca została poświęcona analizie wybranych modeli i reguł, stosowanych w symptomowej diagnostyce technicznej. Przedstawiono modele matematyczne i informacyjne. Z ich pomocą określono odpowiednie reguły diagnostyczne. Na przykładzie diagnozowania wyposażenia elektrycznego samochodów zaprezentowano wyniki symulacyjnej analizy metod diagnozowania wybranych spośród opisanych w pracy. Wyniki analizy pokazały, że najbardziej efektywną metodą lokalizacji uszkodzeń jest stosowanie reguł opartych wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych (banków sieci).

# LITERATURA

- Cypkin J. Z., Podstawy teorii układów uczących. Moskwa, Wyd. "Nauka", 1970 (w języku rosyjskim).
- [2] Jastriebow A., Gad S., Słoń G., Zawadzki A., Łaskawski M., Kałwa D., Komputerowy system diagnozowania samochodowego układu elektrycznego oparty na modelach sztucznej inteligencji. Mat. konferencyjne VII Szkoły-Konferencji Metrologia Wspomagana Komputerowo MWK'05, TOM III, Waplewo 2005, str. 257-264.
- [3] Jastriebow A., Kułakowski A. Sztuczne sieci neuronowe w układach decyzyjnych z niepełną informacją. Mat. VI Krajowej Konferencji Inżynieria Wiedzy i Systemy Ekspertowe, Wrocław, 2006 (w druku).
- [4] Jastriebow A., Gad S., Słoń G., Zastosowanie numerycznych algorytmów klasyfikacji

w symptomowej diagnostyce technicznej. Materiały XI Konferencji Naukowej Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice ZKwE'2006, Poznań 2006, str. 67-69.

- [5] Kasabov N. Foundations of neural networks, fuzzy systems and knowledge engineering. London, The Mit Press Cambridge, Massachusetts, London, 1998.
- [6] Korbicz J., Kościelny J. M., Kowalczuk Z., Cholewa H. (red.). Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania. Warszawa, WNT, 2002.
- [7] Krysiak M. Reguły logiczne i sieci neuronowe przy komputerowej realizacji diagnostycznych relacji. Praca dyplomowa inżynierska, prom.: prof. A. Jastriebow, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, 2006.
- [8] Wang K. Intelligent condition monitoring and diagnosis systems. Amsterdam, IOS Press, 2003.



Prof. dr hab. inż. Aleksander JASTRIEBOW jest profesorem nadzwyczajnym w Polite-Świętokrzyskiej chnice w Kielcach. Jest specjalistą w dziedzinie matematyki informatyki stosowanej. i Opublikował ponad 160 prac naukowych z zakresu automatyki, identyfikacji, diagnostyki oraz sztucznej inteligencji.



Dr hab. inż. **Stanisław GAD** jest pracownikiem naukowym Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Jest członkiem Sekcji Podstaw Eksploatacji KBM Polskiej Akademii Nauk. Zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia diagnostyki urządzeń pojazdowych oraz elektrotechniki i elektro-

niki pojazdów samochodowych. Ma w swoim dorobku ponad 100 publikacji naukowych.



Dr inż. **Grzegorz SŁOŃ** jest adiunktem w Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach. Zajmuje się elektrotechniką teoretyczną, informatyką stosowaną, elektrotechniką i elektroniką pojazdową oraz wykorzystaniem sztucznej inteligencji w diagnostyce. Jest autorem i współautorem ponad 45 prac naukowych.

# MODEL SYMULACYJNY PROCEDUR DIAGNOSTYCZNYCH W ROZPROSZONYCH SYSTEMACH SIECIOWYCH

Zbigniew ZIELIŃSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Cybernetyki, Instytut Teleinformatyki i Automatyki, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa; fax: 022-683-71-44; e-mail: <u>z.zielinski@ita.wat.edu.pl</u>

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono założenia i model symulacyjny procesu diagnostyki w sieciowych systemach rozproszonych, pozwalający na uzyskanie oceny efektywności procesu diagnozowania dla zadanej struktury diagnostycznej i parametrów niezawodnościowych systemu. Przedstawiono również w zarysie, sposób implementacji modelu oparty na podejściu obiektowym.

Słowa kluczowe: samodiagnozowalne sieciowe systemy rozproszone, tolerowanie błędów, symulacja.

# THE SIMULATION MODEL OF DISTRIBUTED NETWORK SYSTEM DIAGNOSTIC PROCEDURES

## Summary

In this paper the simulation model of distributed network system diagnosing procedures is presented. The main goal of the model is effectiveness evaluation of the diagnostic procedures depending on communication and diagnostic structure parameters and reliability node characteristics. More over, the outline of the model implementation is depicted.

Keywords: self-diagnosable distributed systems, fault tolerance, simulation.

#### WPROWADZENIE

Postęp w dziedzinie technologii sieci komputerowych, a zwłaszcza gwałtowny rozwój sieci bezprzewodowych, doprowadził do wzrostu znaczenia systemów o charakterze rozproszonym. Coraz częściej obserwujemy wykorzystanie systemów rozproszonych w obszarach o tzw. zastosowaniach krytycznych (systemy militarne, lotnicze, medyczne itp.). Powoduje to określony wzrost wymagań, dotyczących wiarogodności systemów rozproszonych.

Zwiększenie wiarogodności rozproszonych systemów komputerowych może być uzyskane na stosowania efektywnych drodze metod diagnozowania i odtwarzania stanu po awarii, a w szczególności, metod wykorzystujących rezultaty wzajemnego testowania się komputerów. Systemy zdolne do identyfikacji niezdatnych jednostek należących do systemu zalicza się do samodiagnozowalnych. W [12] dokonano klasyfikacji struktur samodiagnozowalnych zależnie od metody i sposobu interpretacji wyników poszczególnych testowań, jak i modelu wnioskowania o stanie niezawodnościowym. Podzielono je na struktury dialogu diagnostycznego (DD) i struktury opiniowania diagnostycznego (OD). W przypadku struktur DD, wnioskowanie o stanie niezawodnościowym systemu, odbywa się na podstawie wyników części wszystkich możliwych testowań, a w strukturach OD przeciwnie.

Biorąc pod uwagę sposób testowania oraz przywracania zdatności systemu, wyróżnia się dwie strategie diagnozowania [7, 10]: strategia jednokrokowa, strategia wielokrokowa (sekwencyjna). Strategia jednokrokowa polega na wykonaniu wszystkich dopuszczalnych testów wszystkich systemie i wyznaczeniu w uszkodzonych jednostek na podstawie otrzymanego zbioru wyników testowań (opinii globalnej). W przypadku strategii wielokrokowej proces diagnozy i odtwarzania systemu przeplatają się nawzajem. Przyjmuje się, że na podstawie opinii globalnej jesteśmy w stanie określić tylko pewien niepusty podzbiór uszkodzonych jednostek (na architektury poziomie sieci). Następnie zidentyfikowane uszkodzone jednostki wymienia się na zdatne i ponawia się testowanie.

Jakość diagnostyki ma decydujące znaczenie dla przywrócenia zdatności systemu poprzez wymianę uszkodzonych jednostek, bądź też izolację niezdatnych jednostek i przeprowadzenie rekonfiguracji zadań. Należy zaznaczyć, że zwiększenie odporności na błędy w systemie rozproszonym jest znacznie trudniejsze niż w systemie scentralizowanym (wieloprocesorowym).

Zwykle w systemach o zwiększonej odporności na uszkodzenia bierze się pod uwagę dwie strategie

diagnostyczne, pierwsza dotyczy diagnozy dokładnej (jednoznacznej), druga związana jest z diagnozą nadmiarową. W przypadku systemów diagnozowalnych jednoznacznie chodzi o precyzyjną identyfikację wszystkich niezdatnych jednostek (komputerów) w systemie na podstawie uzyskanych wyników testów wzajemnych tych jednostek przy założeniu, że liczba niezdatnych jednostek systemu nie przekroczy ustalonego parametru m.

W literaturze z obszaru diagnostyki systemowej istnieje bardzo duża opracowanych modeli i metod diagnostycznych. Odnoszą się one zarówno do systemów wieloprocesorowych jak i w pewnej części do systemów rozproszonych. Należy zauważyć, że w większości przypadków modele te maja charakter czysto teoretyczny, tj. przyjete założenia istotnie ograniczają możliwości ich praktycznego wykorzystania.

Najczęściej przyjmowane założenia nie ujmują problematyki dotyczącej skuteczności kontrolnej testów. Zazwyczaj w prowadzonych rozważaniach nie wnika się w fizyczną naturę wykonywanych testów i traktowane są one jako testy kompletne.

Kolejnym ograniczeniem większości metod diagnostycznych jest brak uwzględniania różnych rodzajów niezdatności (trwałe, powtarzające się i chwilowe) oraz losowej natury niezdatności. systemów W przypadku rozproszonych niezdatności mogą dotyczyć oprogramowania, węzłów przetwarzających jak i linii transmisji danych. W literaturze przedmiotu najczęściej przyjmuje się założenie, że linie transmisji danych są niezawodne. Nieliczne publikacje, na przykład, [12] dotyczą analizy systemów z zawodnymi liniami transmisji danych.

W rzeczywistości uwzglednienie wszystkich wymienionych czynników znacznie komplikuje matematyczny diagnostvki model systemu rozproszonego i stwarza określone trudności w jego analitycznym ujęciu. Znaczny stopień komplikacji wynikający z uwzględniania wielu czynników diagnostyki systemu rozproszonego, a także takie cechy współczesnych systemów sieciowych jak znaczna niejednorodność (łączone są systemy różnych technologiach i możliwościach 0 funkcjonalnych oraz operacyjnych), zmienność struktury itp., skłaniają do wykorzystania badań symulacyjnych. Przegląd istniejących rozwiązań w zakresie symulacji sieciowych systemów rozproszonych przedstawiono w [4]. Rozwiązania większości wykorzystują symulację te w funkcjonalną i nie obejmują modelu procesów diagnostycznych.

Podstawowym celem modelu symulacyjnego jest uzyskanie oceny efektywności procesu diagnozowania dla zadanej strukturv diagnostycznej i parametrów niezawodnościowych systemu rozproszonego. Pozwoli to projektantowi odpowiednich takiego systemu na dobór parametrów niezawodnościowych węzłów i linii komunikacyjnych oraz strategii i metod diagnostycznych dla uzyskania wymaganego poziomu wiarogodności systemu rozproszonego.

W artykule przedstawiono założenia i model symulacyjny procesu diagnostyki w sieciowych systemach rozproszonych. Ponadto w pracy podstawowe elementy zaprezentowano wykorzystywane w implementacji modelu.

# 2. ZAŁOŻENIA DO MODELU **SYMULACYJNEGO**

Niech  $E = \{e_i : i = \overline{1, k}\}$  reprezentuje zbiór systemu rozproszonego. węzłów Strukture komunikacyjną systemu przedstawia się za pomocą C ( $C = \langle E, U \rangle$ ), w którym węzły grafu odpowiadają komputerom, a zbiór możliwych łańcuchów prostych, łączących węzeł  $e_i$  z węzłem odpowiada zbiorowi możliwych  $e_i(i \neq j),$ sposobów przekazania informacji z komputera  $e_i$  do komputera  $e_i$ . Sieć komputerową, przy określonym stanie niezawodnościowym jej linii transmisji danych, uważamy za zdatną, jeżeli graf C ( $C = \langle E, U \rangle$ ) opisujący jej strukturę logiczną, tym stanie niezawodnościowym linii przy transmisji danych, jest grafem spójnym [1].

Każde łacze komunikacyjne może być charakteryzowane przez prawdopodobieństwo błędnego przesłania komunikatu ( $\delta$ ). Wewnetrzne struktury danych reprezentujace strukture komunikacyjną są następujące:

- liczba węzłów k = |E|,

- 
$$\frac{1}{2}$$
 macierzy  $\begin{bmatrix} c_{ii} \end{bmatrix}$ ,  $(k \times k)$ ,

-  $\gamma_2$  macıerzy  $\lfloor c_{ij} \rfloor$ ,  $(k \times k)$ , -  $\frac{1}{2}$  macierzy  $\begin{bmatrix} \delta_{ij} \end{bmatrix}$ ,  $(k \times k)$ .

Strukturę wzajemnego testowania sie elementów systemu opisuje odpowiedni graf (graf *testowania*). Grafem testowania  $D(D = \langle E, T \rangle)$ , jest (w tym przypadku) unigraf bez petli, którego gałezie są łukami, czym przy łuk  $(e', e'') \in T$  oznacza, że węzeł e' może testować węzeł e.

Zależnie od rodzaju zastosowanego modelu diagnostycznego, wyniki wzajemnego testowania się komputerów w systemie o scentralizowanym sposobie diagnozowania można przedstawić za pomocą podanych poniżej zależności. Największe znaczenie praktyczne znalazły modele PMC [7], [10], [12], [13] oraz BGM [2], [7], [10], [12].

przypadku przyjęcia modelu PMC W interpretacja wyników testowania przedstawiana jest za pomocą następujących zależności [10]:

$$[n(e_s) = n_0(e_s)] \Rightarrow \begin{bmatrix} 0 & dla & n(e_t) = n_0(e_t) \\ 1 & dla & n(e_t) \neq n_0(e_t) \end{bmatrix}$$
(1)  
oraz: 
$$[n(e_s) \neq n_0(e_s)] \Rightarrow [d_{st} = x] (x \in \{0, 1\})$$

gdzie  $n(e_s)$  – stan niezawodnościowy komputera, który w grafie reprezentowany jest przez węzeł  $e_s$ ;

 $n_0(e_s)$  – stan zdatności komputera  $e_s$ ;

 $d_{st}$  – opinia komputera testującego  $e_s$ o komputerze testowanym  $e_t$ , przy czym  $d_{st} = 0$ oznacza, że komputer  $e_s$  opiniuje jako zdatny komputer  $e_t$ , natomiast  $d_{st} = 1$  oznacza, że komputer  $e_s$  opiniuje jako niezdatny komputer  $e_t$ .

Jeżeli przyjęty zostanie model BGM, to wówczas wynik testowania się komputerów przedstawiany jest za pomocą następującej zależności [10]:

$$[n(e_s) \neq n_0(e_s)] \Rightarrow \begin{bmatrix} x & \text{dla} & n(e_t) = n_0(e_t) \\ 1 & \text{dla} & n(e_t) \neq n_0(e_t) \end{bmatrix}.$$
(2)

W odróżnieniu od scentralizowanych metod diagnostyki, zarówno interpretacja wyników testów jak i procedura określania decyzji diagnostycznej w systemach o rozproszonym sposobie diagnostyki mogą być bardziej złożone. W literaturze przedmiotu scharakteryzowano rozproszone sposoby (metody) diagnozowania systemów sieciowych, do których zaliczyć można metodę dialogu diagnostycznego przedstawioną w [10] i [12], metody adaptacyjne scharakteryzowane w [15] oraz tzw. zintegrowane metody diagnostyki w systemie rozproszonym[8], [9].

W opracowywanym modelu symulacyjnym uwzględniono zarówno podejście scentralizowane jak i rozproszone sposoby diagnozowania systemu.

Niezależnie od zastosowanego podejścia (scentralizowane czy rozproszone) założono, że sposób wzajemnego testowania się komputerów oraz parametry testów definiuje graf opisany  $D^* = \langle D; \{\eta(t_{ij}), \tau(t_{ij})\}: t_{ij} \in T > \text{ gdzie } \eta(t_{ij}) -$ 

jest skutecznością kontrolną testu  $t_{ij}$ ,  $\tau(t_{ij})$  jest czasem wykonania testu  $t_{ij} = \langle e_i, e_j \rangle \in T$ .

Skutecznością kontrolną  $\eta(t_{ij})$  testu  $t_{ij}$   $(t_{ij} \in T)$ nazywamy wartość wyrażenia [10]:  $\eta(t_{ij}) = \frac{1}{1 - p_0} P(r(t_{ij}) \neq r(t_{ij}, n_0)) \quad (0 \le \eta(t_{ij}) \le 1)$  gdzie

 $p_0 = P(n(e_i) = n_0) \ (0 < p_0 < 1), \ r(t_{ij})$  oznacza reakcję (odpowiedź) komputera  $e_j$  na test zlecony przez komputer  $e_i$ , a  $r(t_{ij}, n_0)$  jest odpowiedzią  $e_j$ w stanie zdatności.

Kolejnymi elementami wprowadzonymi do modelu symulacyjnego są parametry niezawodnościowe węzłów, rodzaje niezdatności oraz zachowanie węzłów uszkodzonych. Stan niezawodnościowy każdego węzła  $e_i$  będzie określony przez zmienną losową  $X(e_i)$  o zadanej dystrybuancie ( $P[X(e_i) < x]$ ). W modelu założono obsługę następujących rozkładów zmiennej losowej  $X(e_i)$ :

- rozkład wykładniczy,
- rozkład Weibull'a..

W modelu uwzględniono dwa rodzaje niezdatności węzła: trwałe i przemijające W przypadku uwzględnienia (okresowe). niezdatności przemijających charakteryzowane są odpowiednich rozkładów pomocą za prawdopodobieństwa.

Węzły niezdatne (dla niezdatności trwałych) mogą być wyłączane z systemu lub poddawane procesowi naprawy. Proces naprawy węzła charakteryzowany jest przez średni czas naprawy wezła (MTTR - mean time to repair). Założono w modelu, że domyślna wartość MTTR węzła wynosi "nieskończoność". Oznacza to brak naprawy i wyłączanie węzła z systemu po identyfikacji węźle w tym stanu niezdatności. Istnieje możliwość charakteryzowania wartości MTTR za pomocą rozkładu normalnego (określana jest wartość średnia i odchylenie standardowe). Istnieje również możliwość uwzględnienia takiego scenariusza uzdrawiania systemu, gdzie po wykryciu niezdatnego węzła zastępowany jest on innym (zdatnym) węzłem i proces diagnozy powtarzany jest dopóty, dopóki wszystkie węzły niezdatne nie zostaną usunięte z systemu.

Jeżeli zachowanie uszkodzonego węzła zostało określone jako uciszające (*fail-silent*), to przyjmuje się, że węzeł nie odpowiada na żadne komunikaty (nie bierze udziału ani w przetwarzaniu ani w procesie diagnozowania). Sposób konstrukcji węzłów typu *fail-silent* przedstawiono w pracy [3]. Sprowadza się on do zastosowania w pojedynczym węźle dwóch procesorów kontrolujących wzajemnie swoje działania z wykorzystaniem specjalnego protokołu. Zachowanie bizantyjskie oznacza przypadkowość zachowania węzła.

Każdy węzeł może być charakteryzowany przez następujące atrybuty:

- typ węzła (prosty, wirtualny),

- zachowanie węzła po wystąpieniu uszkodzenia (uciszające - *fail-silent*, bizantyjskie),

- model uszkodzeń..

Koncepcja węzłów wirtualnych została przedstawiona w [9]. Polega ona na logicznym wyodrębnieniu grup kilku jednostek fizycznych (węzłów prostych) o podobnych parametrach. Zadanie rozproszone jest realizowane jednocześnie we wszystkich jednostkach wchodzących w skład węzła. Poprawny wynik jest ustalany na drodze głosowania. Wynik ten jest następnie przekazywany "na zewnątrz" jako poprawny wynik całego węzła wirtualnego.

## **3. METODA SYMULACJI**

Modelowany system rozproszony działa w czasie ciągłym, natomiast zmiany stanu systemu,

istotne z punktu widzenia celu modelowania (procedur diagnostycznych) zachodzą (przeliczalnym) zbiorze w dyskretnym chwil czasowych. Zmiany stanu systemu, zachodzące w dyskretnych chwilach czasu, określa się jako zdarzenia. Stany niezawodnościowe węzłów systemu rozproszonego i linii transmisji danych oraz zachowanie węzłów uszkodzonych mają charakter losowy. Stąd, do badania sposobu diagnozowania systemu rozproszonego wykorzystana została metoda symulacji stochastycznej z dyskretnym zbiorem stanów.

Każde zdarzenie  $\mathcal{E}_i$  charakteryzowane jest przez uporządkowaną czwórkę:

$$\mathcal{E}_i = \langle z_i, \tau_i, \rho_i, P_i \rangle$$

gdzie  $z_i$  jest identyfikatorem zdarzenia,  $\tau_i$  jest

chwilą czasu, w której zachodzi zdarzenie  $\xi_i$ ,  $\rho_i$ oznacza typ zdarzenia (wyróżnionymi typami na przykład, zmiana stanu zdarzeń są, niezawodnościowego węzła - fault, przesłanie komunikatu, błąd przesłania komunikatu itp.), a  $P_i$ jest wektorem parametrów zdarzenia. Lista zdarzeń  $\kappa = (\xi_i, i = 1, l)$ uporządkowana niemalejaco według czasu wystąpienia zdarzenia nosi nazwę kalendarza zdarzeń. W modelu wykorzystuje się dwie klasy metod obsługi zdarzeń: metoda przeglądania możliwych zdarzeń oraz metoda procesów interakcyjnych, W której każdy z wyróżnionych obiektów modelu wykonuje współbieżnie swoje operacje.

Ogólny algorytm symulacji, realizujący metodę przeglądania możliwych zdarzeń przedstawia rys. 1.

<u>Krok 1. (Inicjalizacja modelu)</u>

a. Wprowadź strukturę komunikacyjną C oraz
diagnostyczną $D^*$ i ich parametry;
b. Wprowadź atrybuty i parametry dotyczące
węzłów;
c. Wybierz procedury diagnostyczne oraz określ
warunek zakończenia symulacji $(\alpha_{SIM})$ ;
d. Inicjuj współbieżne wątki węzłów.
<u>Krok 2. (</u> Wykonanie symulacji <u>)</u>
$POWTARZAJ dopóki \ \alpha_{SIM} \neq PRAWDA$
{a. Znajdź zdarzenie $\xi_i \in \kappa$ typu fault
z minimalnym czasem wystąpienia $\tau_i$ ;
b. Uruchom procedury diagnostyczne w
przedziale czasowym ( $\tau_i - T_{GLOB}$ );
c. Zmień wartość czasu globalnego na
$ au_i \left( T_{GLOB} =  au_i \right)$ ;
d. Rejestruj wyniki diagnozy.}
Krok 3. (Estymacja wybranych wskaźników
i zobrazowanie wyników <u>)</u>

Rys. 1 Ogólny algorytm symulacji

W każdym obiekcie modelu typu węzeł wykonywany jest również współbieżnie algorytm symulacji stanu niezawodnościowego i rodzaju powstałych niezdatności.

Zależnie od symulowanej procedury diagnostycznej estymowane są następujące parametry:

- $\gamma_{diag}$  stosunek liczby poprawnych decyzji diagnostycznych do liczby wszystkich decyzji diagnostycznych,
- $\Delta(t)$  prawdopodobieństwo detekcji jako funkcja czasu,
- $\gamma_{nap}$  średnia liczba kroków diagnozy i naprawy niezbędna do przywrócenia stanu pełnej zdatności systemu (dla strategii wielokrokowej).
- Λ średni czas opóźnienia diagnozy (dla procedur rozproszonego diagnozowania systemu).
   Opóźnienie diagnozy oznacza czas upływający od chwili pojawienia się niezdatności do chwili przekazania informacji diagnostycznej o tej niezdatności do wszystkich węzłów systemu.

# 4. IMPLEMENTACJA MODELU

Do implementacji modelu wykorzystano paradygmat obiektowy realizacji oprogramowania oraz interfejs graficzny. Zrealizowane w języku C++ oprogramowanie systemu symulacji o nazwie *SIMDIAG* zostało podzielone na trzy współpracujące ze sobą komponenty o następujących nazwach:

- Budowniczy modelu,

- Symulator,
- Moduł zobrazowania wyników symulacji.

Moduł o nazwie **Budowniczy modelu** umożliwia:

- definiowanie struktury komunikacyjnej,
- definiowanie struktury diagnostycznej,
- określanie parametrów węzłów przetwarzających,
- specyfikowanie procedur diagnostyki systemu rozproszonego.

Definiowanie struktury komunikacyjnej odbywa się z wykorzystaniem interfejsu graficznego. Interfejs ten dostarcza elementarnych operacji typu: dodaj węzeł, usuń węzeł, dodaj połączenie między węzłami, usuń połączenie, wybierz element graficzny (węzeł, połączenie), wyświetl atrybuty wybranego elementu.

Definiowanie struktury diagnostycznej następuje po uprzednim określeniu struktury komunikacyjnej C. Program umożliwia wstępne zobrazowanie struktury komunikacyjnej (zaznaczajac linie transmisji danych kolorem szarym) oraz umożliwia wprowadzanie testów poprzez interfejs graficzny. Testy sa reprezentowane w postaci łuków bądź krawędzi grafu. Elementarnymi operacjami w tym zakresie są operacje typu: dodaj test, usuń test, wybierz test, podaj (zmień) atrybuty wybranego testu. Każdy test

 $t_{ij}$  jest charakteryzowany przez: skuteczność kontrolną testu  $\eta_{ij}$ ,  $(0 \le \eta_{ij} \le 1)$ , liczbę komunikatów wysyłanych (związanych z testem  $t_{ij} - l(t_{ij})$  oraz średni czas wykonania testu  $\tau_{ij}$ . Wprowadzone parametry modelu zapisywane są do pliku typu XML, co umożliwia elastyczną interpretację modelu w komponencie *Symulator* bądź jego późniejszą modyfikację. Przykład definiowania struktury diagnostycznej oraz postać interfejsu graficznego przedstawiono na rys. 2.

Każdy węzeł może być charakteryzowany przez:

- typ węzła (prosty, wirtualny),

- zachowanie węzła po wystąpieniu uszkodzenia (fail-silent, bizantyjskie),



Rys. 2. Przykład definiowania struktury diagnostycznej

Węzły zidentyfikowane w wyniku zastosowania określonych procedur diagnostycznych jako niezdatne mogą być wyłączane z systemu lub poddawane procesowi naprawy. Wykorzystuje się tu parametr węzła - średni czas naprawy (MTTR *mean time to repair*). Do podstawowych klas obiektów komponentu *Symulator* możemy zaliczyć (rys. 3):

- Węzeł,
- FaultInjector,
- *Test*,
- Linia komunikacyjna,
- Komunikator,
- Silnik.

Należy podkreślić (zgodnie z rys. 3), że klasa *FaultInjector* opisuje jeden z podstawowych obiektów symulatora *SIMDIAG*, obejmujący mechanizm wprowadzania niezdatności w symulowanym systemie. Mechanizm ten służy zarówno do wyznaczania chwil czasowych zdarzeń powodujących zmianę stanu niezawodnościowego węzła jak i do określania rodzaju symulowanej niezdatności.



# Rys. 3. Struktura oprogramowania – diagram wybranych klas

Specyfikacja procesu diagnostycznego wymaga określenia: strategii diagnostycznej, sposobu wyznaczania i interpretacji wyników testów oraz procedur (algorytmów) diagnostycznych. W modelu mogą być symulowane następujące procedury [10], [15]:

- scentralizowana procedura opiniowania diagnostycznego,
- rozproszona procedura zorientowana na zdarzenia (*EVENT-SELF*),
- adaptacyjna procedura DSD (Distributed System Diagnosing),
- procedura dialogu diagnostycznego.

W przypadku symulacji scentralizowanego sposobu diagnozowania systemu zakłada się, że istnieje węzeł o zwiększonych parametrach niezawodnościowych, posiadający możliwość niezawodnej komunikacji z pozostałymi węzłami. W tym przypadku węzeł nadrzędny koordynuje wykonywanie testów. Implementacja węzła nadrzędnego jest zawarta w klasie *Komunikator* (rys. 3). Wszystkie węzły systemu rozproszonego wykonują założone testy (z określonym przez parametr interwałem), a wyniki testów przesyłane są do węzła nadrzędnego.

Oprogramowanie *SIMDIAG* umożliwia zobrazowanie (w postaci graficznej) zarówno wartości chwilowych wybranych parametrów diagnostycznych jak i ich estymatorów (wartość średnia, wariancja).

## **5. PODSUMOWANIE**

Przedstawiony w artykule model symulacyjny daje możliwości badania wpływu szeregu parametrów, określających właściwości struktury komunikacyjnej i diagnostycznej, charakterystyk niezawodnościowych węzłów przetwarzających, rodzaju niezdatności oraz sposobu diagnozowania na efektywność procedur diagnozowania rozproszonego systemu sieciowego.

W chwili obecnej prowadzone są testy końcowe oprogramowania *SIMDIAG* oraz dokonywana jest ocena adekwatności uzyskiwanych wyników symulacji.

# LITERATURA

- [1] Chudzikiewicz J., Zieliński Z.: Wyznaczanie m-diagnozowalnych struktur typu PMC w systemach o zwiększonej odporności na uszkodzenia, Materiały X Konferencji Systemów Czasu Rzeczywistego, Ustroń, 2003.
- [2] Barsi F., Grandoni F., Maestrini P.: A *Theory of Diagnosability of Digital Systems*, IEEE Trans. on Comput. 6, 1976, pp. 585-593.
- [3] Brasileiro F. V., Ezhilchelvan P. D., Shrivasteva S. K.: *Implementing Fail\_Silent Nodes for Distributed Systems*, IEEE Trans. on Computers vol. 45, no 11, 1996, pp. 1226-1238.
- [4] Goswami K. K., Iyer R. K., Young L.: DEPEND: A Simulation-Based Environment for System Level Dependability Analysis, IEEE Trans. on Computers, Vol. 46, No 1, 1997, pp. 60-74.
- [5] Hakimi S. L., Amin A. T.: Characterization of Connection Assignment of Diagnosable Systems, IEEE Trans. on Computers, 1, 1974, pp. 86-88.
- [6] Hosseini S. H., Kuhl J. G., Reddy S. M.: On Self-fault diagnosis of the distributed systems. IEEE Trans, Computers, vol. 37, pp. 248-251, Feb. 1988.
- [7] Krawczyk H.: Analiza i synteza samodiagnozowalnych systemów komputerowych, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Elektronika nr 64, Gdańsk, 1987.
- [8] Krawczyk H., Umiński P. W.: Diagnozowanie i odtwarzanie poprawnego stanu w rozproszonych systemach sieciowych, Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, Informatyka, zeszyt 28, Gliwice, 1995.

- [9] Krawczyk H., Umiński P. W.: Węzły wirtualne jako metoda zwiększania odporności na błędy aplikacji działających w systemach rozproszonych, Materiały konferencji Real-Time Systems' 95, OWPW, Wrocław, 1995.
- [10] Kulesza R.: Podstawy diagnostyki sieci logicznych i komputerowych, Instytut Automatyki i Robotyki, Wydział Cybernetyki WAT, Wydanie II, Warszawa, 2000.
- Problemy [11] Kulesza R.: przeliczania optymalnych struktur opiniowania diagnostycznego, Biuletyn Instytutu Automatyki Robotyki 20/2004, i nr Warszawa.
- [12] Kulesza R.: *Struktury samodiagnozowalne w systemach cyfrowych*, Materiały Krajowej Konferencji DIAG' 2003.
- [13] Preparata F. P., Metze G., Chien R.T.: On the Connection Assignment Problem of Diagnosable Systems, IEEE Trans. Comput. 6, 1967, pp. 848-854.
- [14] Somani A. K., Peleg O.: "On diagnosability of Large fault Sets and Its Applications to Regular-Interconnected Computer Systems", IEEE Trans on Computers, Vol 45, No. 8, 1996, pp. 892-903.
- [15] Stahl M., Buskens R., Bianchini R. Jr.: On-Line Diagnosis In General Topology Networks, Proc. of the Fault-Tolerant and Distributed Systems, Amherst, MA, July 1992.
- [16] Zieliński Z.: Komputerowo wspomagane wyznaczanie najtańszych 2-diagnozowalnych struktur typu PMC, Biuletyn Instytutu Automatyki i Robotyki nr 18/2003, Warszawa.



Dr inż. **Zbigniew ZIELIŃSKI** ukończył z wyróżnieniem studia na Wydziale Cybernetyki Wojskowej Akademii Technicznej w 1978 roku. W roku 1988 obronił pracę doktorską uzyskując tytuł doktora nauk technicznych

specjalności systemy informatyczne. Przez cały okres swojej pracy zawodowej związany z Wojskową Akademią Techniczną. Brał udział w wielu pracach naukowo-badawczych związanych z projektowaniem i diagnozowaniem systemów wbudowanych. Aktualnie jego zainteresowania naukowe dotyczą metod diagnozowania systemów i sieci komputerowych oraz projektowania systemów tolerujących błędy.

# BADANIE MOŻLIWOŚCI TECHNICZNEGO WSPOMAGANIA OCENY STANU BIODEGRADACJI DRZEW

#### Jacek JAKUBOWSKI<sup>1</sup>, Marek PISZCZEK<sup>2</sup>, Piotr BASZUN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instytut Systemów Elektronicznych, <sup>2</sup>Wydział Techniki Wojskowej, Wojskowa Akademia Techniczna 00-908 Warszawa, ul. Kaliskiego 2, fax.: +48-22-683-91-25, email: jjakubowski@wel.wat.edu.pl

#### Streszczenie

Opracowanie nieniszczących metod oceny stopnia biodegradacji w strukturach żywych drzew, umożliwiających monitorowanie zagrożeń ich upadku na ludzi, samochody, budynki itp. ze względu na specyfikę obiektu stanowi poważne wyzwanie badawcze. Wiele ze znajdujących się w fazie prób wstępnych rozwiązań to metody pociągające duże koszty, wysoką złożoność aparatury badawczej lub wykorzystujące podejście pół-inwazyjne. W prezentowanym referacie proponuje się obiektywizację standardowej metody polegającej na uderzaniu drzewa i słuchowej ocenie uzyskanego tą drogą dźwięku.

Słowa kluczowe: badania nieniszczące, diagnostyka obiektów biologicznych.

#### RESEARCH ON TECHNICALLY AIDED ASSESSMENT OF BIODEGRADATION IN TREES

#### Summary

A nondestructive method for the assessment of decay in trees is an important and challenging research topic to monitor the risk they pose to people, cars, buildings, etc. Many reported approaches seem to be either too expensive, too bulky to be of any use in practice or rather semiinvasive. In this paper we propose an objective version of the standard primary method based on striking the tree and listening for the way the tree sounds.

Keywords: methods of nondestructive assessment, biological diagnostics.

## 1. WPROWADZENIE

Drzewa jako obiekty biologiczne podlegają procesowi starzenia oraz procesom rozwoju chorób. Czestym i jednocześnie niemożliwym do stwierdzenia za pomocą wizualnych oględzin efektem tych procesów jest postępujący od środka rozkład skutkujący powstaniem wewnętrznych Drzewa ubytków. tego rodzaju można zaklasyfikować jako potencjalne zagrożenia z uwagi na fakt, że istnieje wysokie prawdopodobieństwo upadku ich części lub całości mogące spowodować określone zniszczenia lub obrażenia. Do stref podwyższonego ryzyka należą zadrzewione obszary usytuowane przy budynkach, drogach, parkingach i miejscach gromadzenia się ludzi. Z powyższych względów istnieje silna potrzeba technicznego wspomagania ekspertyz dotyczących stanu drzew i to zarówno dla celów monitoringu potencjalnego zagrożenia jak i w aspekcie prawnego rozstrzygania sporów dotyczących wycinki konkretnych drzew.

Analiza danych literaturowych z zakresu diagnostyki drzew pozwala stwierdzić, że

w ograniczonym praktycznym użyciu znajdują się obecnie od ponad dziesięciu lat dwa typy urządzeń, różniące się między sobą sposobem pobudzania [1], [3]. Pierwszy z nich wykorzystuje uderzenie mechaniczne wykonywane najczęściej za pomocą młotka wyposażonego w czujnik startu rejestracji, drugi bazuje na zastosowaniu nadajnika ultradźwięków. W obu przypadkach odbiornikami wytworzonych fal akustycznych są przetworniki piezoelektryczne. Propagacja fal akustycznych jest procesem dynamicznym, bezpośrednio związanym z własnościami ośrodka. W przypadku drzew odbywa się ona w znacznie lepszych warunkach, więc z większą prędkością w strukturach o wysokiej jakości i gęstości niż w pniach zaatakowanych przez próchnicę lub w pniach z wewnętrznymi ubytkami. Dzięki temu naturalną miarą niosącą informację o kondycji drzewa, wykorzystywaną przez obie metody, jest czas transmisji fali przechodzącej przez badany ośrodek. Mimo swej prostoty metody te charakteryzują się jednak pewnymi wadami. Przede wszystkim czynnością 0 pierwszorzędnym znaczeniu jest zapewnienie dobrego kontaktu pomiędzy drzewem a odbiornikiem i nadajnikiem fal, co często wiąże się z koniecznością usunięcia warstwy kory, która jest ich naturalnym tłumikiem. W rezultacie metody te jawią się raczej bardziej jako pół-inwazyjne niż w pełni nieniszczące. Usunięta kora pozostawia odkrytą warstwę drzewa, które może być ta droga zaatakowane przez owady lub choroby. Ponadto czas przelotu jest parametrem zależnym od gatunku drzewa oraz temperatury i wilgotności i jego użycie wymaga posiadania informacji odniesienia o prędkości propagacji fali akustycznej w danym przypadku. Inne metody, bazujące na technologiach rentgenowskich, podczerwieni, promieniowania gamma, rezonansu magnetycznego itp. mimo szerokich możliwości pozyskiwania różnego rodzaju informacji są mało przydatne z uwagi na wysokie koszty i ograniczone możliwości ich praktycznego zastosowania w pomiarach terenowych [2].

# 2. WYBÓR KIERUNKU BADAŃ

Z powyższych względów podjęte prace skupiają się na zbadaniu możliwości obiektywizacji podstawowej metody wykorzystywanej w praktyce polegajacej uderzaniu leśnei. na drzewa i wsłuchiwaniu się w charakter uzyskiwanego dźwieku. Metoda ta jest w sposób naturalny nieniszcząca, lecz jest również w swojej pierwotnej postaci silnie zależna od doświadczenia osoby wykonującej badanie. Proponowana obiektywizacja polega więc na zastąpieniu ucha ludzkiego czułym mikrofonem - rys. 1 i wypracowaniu do uzyskanego tą drogą sygnału pewnych metod przetwarzania. W przeciwieństwie do klasycznego podejścia, opartego na pomiarze czasu przelotu metody te powinny być ukierunkowane na znalezienie cech sygnału, które odpowiadają temu, co znajduje się wewnatrz drzewa.



Rys. 1. Schemat zestawu do akwizycji danych

Najbardziej właściwym w tym zakresie podejściem wydaje się być zastosowanie analizy czasowo-częstotliwościowej, dostarczającej łącznej informacji o zachowaniu się widma sygnału w dziedzinie czasu. Analiza ta w sposób naturalny jest adekwatna do opisu zjawiska propagacji dźwięku w strukturze drzewa z uwagi na możliwość określania ewentualnych lokalnych zmian częstotliwości sygnału oraz jego intensywności, będących wynikowym efektem pobudzenia, fal powierzchniowych, wewnętrznych rezonansów, interferencji itp. Każdy z możliwych składników sygnału charakteryzuje się swoją prędkością, czasem dotarcia do mikrofonu i składem widmowym. W przypadku analizy takich sygnałów tradycyjne podejście czasowe lub częstotliwościowe nie dostarcza pełnej informacji o ich dynamice.

# 3. OPIS BADAŃ

Weryfikacja proponowanego podejścia wymagała przeprowadzenia działań wstępnych,

które objęły przygotowanie próbek drzew oraz systemu zbierania danych wraz z systemem zamocowania mikrofonów. Badaniom poddano trzy struktury sosnowe: pień pełny o średnicy ok. 30cm, pień z wydrążonym osiowo otworem o średnicy ok. 8cm oraz pień z takim samym otworem, ale wypełnionym trocinami – rys. 2.



Rys.2. Widok ogólny próbek drzew poddanych badaniom

Wysokość każdego z pni wynosiła ok. 30cm. W systemie zbierania danych zastosowano kartę przetwornika A/C próbkującą sygnały z mikrofonów z częstotliwością 44,1kHz. Sterowanie i archiwizacja wyników odbyły się za pośrednictwem środowiska Matlab.

# 4. OCENA WYNIKÓW BADAŃ

Badania czasu przelotu zaburzenia wywoływanego uderzeniem drewnianego młotka przez próbkę nie zawierającą otworu umożliwiły uzyskanie prędkości propagacji odpowiadającej 1000-1150m/s wartościom podawanym w literaturze. Przykładowe przebiegi sygnałów zarejestrowanych w proponowanym układzie akwizycji przy pobudzaniu próbek drewnianym młotkiem przedstawia rys. 3. Dokonując analizy przebiegów czasowych łatwo zaobserwować, że początkowe fragmenty sygnałów z przedziału 0÷10ms sa do siebie bardzo podobne. Ten fragment sygnału wydaje się więc być efektem pobudzenia i odpowiedzi litej części pnia. Sygnał pochodzący od próbki odniesienia (próbki pełnej) przyjmuje w następnych przedziałach czasu charakter tłumionych oscylacji, podczas gdy sygnały pochodzące od pni wydrążonych charakteryzują się obecnością ciągu widocznych impulsów o czasie trwania ok. 15ms i okresie powtarzania również ok. 15ms. Rozkłady czasowo-częstotliwościowe
przedstawione na rys. 4 opisują ewolucję widm zarejestrowanych przebiegów w czasie. Są to tzw. spektrogramy [4], których wyznaczenie polega na wycinaniu fragmentu sygnału poddawanego przekształceniu Fouriera przez krótko-czasowe, przesuwające się w dziedzinie czasu okno analizujące.



Rys. 3. Przykładowe przebiegi sygnałów zarejestrowane przez mikrofony dla przypadku próbki:

A – pełnej, B – z ubytkiem wypełnionym powietrzem, C – z ubytkiem wypełnionym trocinami.

Do obliczeń zostało wykorzystane okno Hanninga o długości 7ms i pokryciu 90% z sąsiednim oknem. Możliwe są również inne parametry wejściowe analizy, dostarczające ilościowo innej informacji.

Spektrogramy wykazują, że impulsy występujące po odpowiedzi litej części pnia są bardzo podobne w dziedzinie częstotliwości do samego pobudzenia. Można je zatem przypisać do pewnego rodzaju cyrkulacji wzbudzonej fali dźwiękowej wewnątrz drzewa. Fala ta propaguje się dokoła wewnętrznego ubytku i jest okresowo emitowana w kierunku mikrofonu. A zatem w przypadku pnia litego zarejestrowane sygnały charakteryzują się stosunkowo krótkim czasem zaniku, podczas gdy pień wydrążony emituje dźwięk w znacznie dłuższym czasie i jest to dźwięk wskazujący na istnienie periodycznego wyprowadzania energii akustycznej z pobudzonej struktury.



Rys. 4. Porównanie spektrogramów sygnałów emitowanych przez badane struktury.

Bardzo interesujące efekty obserwuję się również przy dokonywaniu analizy sygnałów za pomocą funkcji autokorelacji – rys. 5. Sygnały pochodzące z litego pnia są skorelowane tylko dla przesunięć bliskich zera – ich funkcje autokorelacji przypominają postaci obserwowane dla szumu białego.

sygnary acustyczne chintowane przez					
	próbki po uderzeniu				
parametr\próbka	А	В	С		
wartość skuteczna funkcji autokorelacji	3.7±0.4	5.8±0.5	5.1±0.6		
skośność funkcji autokorelacji	13.3±2.7	3.5±0.9	5.7±1.9		
szerokość średniokw. funkcji autokorelacji	9.7±1.3	30.2±0.6	17.4±0.4		

Tabela 1. Porównanie parametrów opisujących sygnały akustyczne emitowane przez

W przypadku pni z ubytkiem funkcje te są całkiem inne – charakteryzują się większa szerokością w dziedzinie przesunięcia czasowego i osiągają wyższe poziomy. Wartości średnie wybranych parametrów sygnałów unormowanych

wraz z odchyleniami standardowymi uzyskanymi dla serii 20 pomiarów, przedstawia Tabela 1. Na ich podstawie można stwierdzić, że próbki pełna i wydrążona stanowią w dziedzinie wykorzystanych parametrów dwa oddzielne bieguny, podczas gdy próbka z trocinami znajduje się pomiędzy nimi.



Rys. 5. Przykładowe przebiegi funkcji autokorelacji sygnałów dla przypadku próbki: A – pełnej, B – z ubytkiem wypełnionym powietrzem, C – z ubytkiem wypełnionym trocinami

## 5. WNIOSKI

Przedstawione przebiegi czasowe, spektrogramy oraz parametry liczbowe wskazują na sensowność dalszej eksploracji proponowanej metody, zmierzającą do znalezienia relacji pomiędzy wymiarami fizycznymi drzew oraz ubytków a rejestrowanymi sygnałami. Jednocześnie, wobec złożoności zjawiska fizycznego odpowiedzialnego za generację rejestrowanego dźwięku wydaje się istotne poszukiwanie relacji pomiędzy wymiarami geometrycznymi a parametrami metodami zgłębiania danych (data mining).

#### LITERATURA

- J. A. Dolwin: "Detection of decay in trees", *Arboricultural J.*, vol. 23 (2), 1999, pp. 139-149.
- [2] G. Nicolett et. al.: "Application and Comparison of Three Tomographic Techniques for Detection of Decay in Trees", *Arboricultural J.*, vol. 29 (2), 2003, pp. 67-78.
- [3] X. Wang et. al.: "Assessment of Decay in Standing Timber Using Stress Wave Timing Nondestructive Evaluation Tools – A Guide for Use and Interpretation", *Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-147*, Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Product Laboratory, dostępne na www.fpl.fs.fed.us.
- [4] L. Cohen: "Time-frequency distibutions A review", Proc. IEEE 77, nr 7 (1989), pp. 941-981.



Jacek JAKUBOWSKI ukończył studia na Wydziale Elektroniki WAT w 1993. Od 1994 jest pracownikiem naukowym i dydaktycznym Instytutu Systemów Elektronicznych WAT. Jego zainteresowania zawodowe obejmują obszary cyfrowego przetwarzania sygnałów, komputerowego wspoma-

gania pomiarów oraz analizy danych eksperymentalnych.



BASZUN Piotr jest wieloletnim nauczycielem akademickim Instytutu Systemów Elektronicznych WAT. Bierze aktywny udział w pracach badawczych Zakładu. Jest autorem lub współautorem kilkudziesięciu artykułów i referatów w czasopismach oraz na

konferencjach krajowych i zagranicznych.



Marek PISZCZEK ukończył studia na Wydziale Elektroniki 1995. Od 2003 jest w pracownikiem naukowym dvdaktycznym Wydziału Techniki Wojskowej WAT. Jego zainteresowania zawodowe obszary obejmują diagnostyki medycznej wykorzystaniem ultradź-Ζ

więków i technik przetwarzania obrazów.

# MODELOWANIE SYGNAŁÓW DRGANIOWYCH GENEROWANYCH PRZEZ PRZEKŁADNIE PLANETARNE W WARUNKACH ZMIENNEGO OBCIĄŻENIA

#### Radosław ZIMROZ

Badawcze Laboratorium Diagnostyki i Wibroakustyki, Instytutu Górnictwa, Politechnika Wrocławska, Plac Teatralny 2, 50-051 Wrocław, <u>radoslaw.zimroz@pwr.wroc.pl</u>

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono uproszczony model sygnału generowanego przez przekładnie planetarną pracującą w warunkach zmiennego obciążenia. Model bazuje na zjawiskach modulacji: amplitudowej (której przyczyną jest okresowa zmienność obciążenia a także nieprawidłowa praca jarzma) oraz modulacji częstotliwościowej (spowodowanej cyklicznymi zmianami obciążenia, a co za tym idzie zmianami prędkości obrotowej na wejściu przekładni). Zastosowanie modelu pozwala na identyfikację struktury częstotliwościowej, testowanie procedury normalizacyjnej zaproponowanej przez Standera oraz ocenę przydatności analiz sygnałowych stosowanych na potrzeby diagnozowania przekładni planetarnej.

Słowa kluczowe: diagnostyka przekładni planetarnych, zmienne obciążenia, symulacje.

#### MODELLING OF VIBRATION SIGNALS GENERATED BY PLANETARY GEARBOX UNDER TIME VARYING LOAD CONDITIONS

#### Summary

A model of signal generated by planetary gearbox working under time varying load conditions is presented. Model based on modulation phenomena. Both, amplitude and frequency modulation is considered. AM modulation is related to time varying load condition and improper arm behaviour and FM is connected to variation of load that causes variation of rotational speed on the input of planetary gearbox. Proposed model can be used for identification of frequency structure of signal testing normalization procedure proposed by Stander and assessment of signal processing techniques that are using for diagnostics purposes.

Keywords: planetary gearbox diagnostics, time-varying load, simulations.

#### 1. WPROWADZENIE

Dotychczasowe badania realizowane przez autora dotyczące diagnozowania wielostopniowej przekładni zębatej ze stopniem planetarnym pracującej w warunkach zmiennego obciążenia konieczność wspomagania procesu pokazuja diagnozowania symulacjami z wykorzystaniem modelu. Szeroki zakres zmienności parametrów sygnału (wpływ zmiennego obciążenia na amplitudę sygnału i wpływ zmiennej prędkości obrotowej na strukturę częstotliwościową sygnału oraz związane z nimi modulacje amplitudowa i częstotliwościowa), wpływ zakłóceń, mała powtarzalność duży eksperymentu biernego i przede wszystkim jego koszty powoduja, że dobór odpowiednich metod przetwarzania sygnału, optymalizacji procesu przetwarzania sygnału powinien zostać poprzedzony gruntownym zrozumieniem zjawisk zachodzących w czasie eksperymentu na obiekcie rzeczywistym. Zaproponowane podejście modelowe w diagnostyce jest bardzo często stosowane zwłaszcza diagnostyce przekładni. Symulacje w

z wykorzystaniem nawet bardzo uproszczonego jakościowego modelu przeprowadzone przez autora pozwoliły scharakteryzować sygnały diagnostyczne i dokonać wyboru metod przetwarzania tych sygnałów [2, 3].

Jak podano w pracy [4] wyróżnia się następujące klasy modeli:

- modele abstrakcyjne
- modele kinematyczne
- modele dynamiczne

Zbudowanie pełnego modelu kinematycznego czy dynamicznego dla tak złożonej struktury jest skomplikowanym zadaniem naukowego z i organizacyjnego punktu widzenia. Niezbędna jest pełna dokumentacja techniczna w celu wyznaczenia podstawowych parametrów modelu jak i bezwładności elementów wirujących, parametrów zazębienia (sztywności, błędy, tłumienia) itd., a pozyskanie jej niestety jest często bardzo utrudnione (pełna dokumentacja wykonawcza nie jest przekazywana nawet użytkownikom maszyn). Ze względu na oddziaływania zachodzące pomiędzy silnikiem, przekładnią i jej obciążeniem należałoby potraktować problem systemowo. To z kolei prowadzi do bardzo dużej złożoności modelu.

W związku z tym zdecydowano się zbudować uproszczony model abstrakcyjny, który pozwala ocenić strukturę częstotliwościową sygnału i dokonać pewnych jakościowych analiz, co może pomóc w pozyskiwaniu cech diagnostycznych. Modele takie są powszechnie stosowane w ocenie przydatności nowych metod przetwarzania sygnałów na potrzeby diagnozowania przekładni [5].

Po wstępnej analizie sygnałów (zob. rozdz. 2) zarejestrowanych na maszynie, na potrzeby modelowania, przyjęto następujące założenia:

- a) model powinien uwzględniać zmienność obciążenia zewnętrznego
- b) model powinien uwzględniać zmienność prędkości obrotowej na wejściu przekładni związanej ze zmianami obciążenia
- c) model powinien obejmować nieprawidłową pracę jarzma

Ze względu na występujące w obiekcie zjawiska model sygnału generowanego przez przekładnie oparto na równaniu modulacji amplitudowej (punkt a) i c)) oraz częstotliwościowej (punkt b)).

#### 2. WSTĘPNE ANALIZY SYGNAŁÓW RZECZYWISTYCH

Dla zarejestrowanych sygnałów drganiowych (w czasie normalnej eksploatacji) zastosowano powszechnie znane metody analizy takie jak analiza w dziedzinie czasu, analiza widmowa, analiza obwiedni/widmo obwiedni oraz analizy czasowoczęstotliwościowe (STFT). Wyniki tych analiz zostały częściowo zaprezentowane w pracach [2, 3, 6]. Przedstawione wybrane wyniki analiz zostały wyselekcjonowane tak, aby zobrazować problemy, które należy uwzględnić w procesie modelowania.

Na rys. 1 przedstawiono sygnał drganiowy z przekładni odfiltrowany wokół częstotliwości zazębienia (w zakresie  $\pm 0,5$  częstotliwości zazębienia) i jego widmo. Z rys. 1a) łatwo zauważyć głęboką modulację amplitudową sygnałem

o częstotliwości ok. 5Hz wywołaną nieprawidłową pracą jarzma (rys. 2).

Występowanie modulacji amplitudowej powinno umożliwić zidentyfikowanie wstęg bocznych wokół częstotliwości zazębienia. Na podstawie rys. 1b identyfikacja taka jest niemożliwa.

Przyczynę takiej sytuacji wyjaśnia mapa czasowo-częstotliwościowa przedstawiona na rys. 3.

Na podstawie tej analizy można stwierdzić, że częstotliwość nośna nie jest stała lecz charakteryzuje się okresową zmiennością. Okazało się, że cykl ten jest związany ze zmiennym obciążeniem wynikającym z charakteru pracy koła czerpakowego.

Na rys. 4 pokazano widma dla dwóch sygnałów zarejestrowanych dla różnych warunków eksploatacyjnych – rys. 4a przedstawia fragment widma z rozmytymi składowymi(efekt zmienności obciążenia), na rys. 4b identyfikacja częstotliwości nośnej i wstęg bocznych nie stanowi problemu.

Na rys. 5 pokazano wyniki demodulacji AM sygnału drganiowego wokół częstotliwości zazębienia (w tym przypadku wokół szóstej harmonicznej).

Rys. 5a przedstawia obwiednie zawierającą składowe pochodzące od nieprawidłowej pracy jarzma oraz od zmian obciążenia oraz widmo obwiedni natomiast rys. 5b przestawia obwiednię sygnału odfiltrowanego - zawierającego informację tylko o obciążeniu.

Rys. 6 przedstawia mapę czasowoczęstotliwościową dla przekładni w nieprawidłowym stanie technicznym, dla której ze względu na nadmierny luz w węzłach łożyskowych występuje efekt zukosowania zależnego od wartości obciążenia.

Na mapie tej można zidentyfikować 3 grupy pionowych linii oddalonych od siebie o ok. 1.8[s] co odpowiada cyklowi obciążenia (t=[~1s, 2.6s, 4,2s]). Szczegółowa analiza z wykorzystaniem widma Wignera (rys. 7) oraz analiza wolnozmiennej części sygnału obwiedni pokazuje, że dla wzrastającego obciążenia gwałtownie wzrasta amplituda drugiej harmonicznej sygnału generowanego przez jarzmo.



Rys. 1 a) Sygnał odfiltrowany ( $f_{ZAZeBIENIA} \pm \Delta f$ ), b) fragment widma w tym zakresie częstotliwości



Rys. 2. Obwiednia I widmo obwiedni dla sygnału odfiltrowanego



Rys. 3. Fragment mapy czasowo częstotliwościowej



Rys. 4. Porównanie widm dla przekładni: a) fluktuacja prędkości i brak możliwości detekcji składowych b) brak fluktuacji – widoczne składowe częstotliwość zazębiania i wstęgi boczne



Rys. 5. Widmo obwiedni I odseparowana cześć obwiedni związana z obciążeniem (przekładnia 1 sygnał 3 harmoniczna 6)





Rys. 7. Fragment mapy czasowo-częstoliwościowej (Wigner) wyznaczony dla czasu t=2:3[s]

#### 3. IDENTYFIKACJA CZYNNIKÓW EKSPLOATACYJNYCH I ZMIANY STANU ORAZ ICH WPŁYWU NA SYGNAŁ DRGANIOWY

Na postać drganiowego sygnału diagnostycznego wpływa wiele czynników. Bartelmus grupuje je następująco: czynniki konstrukcyjne, czynniki technologiczne, czynniki eksploatacyjne i zmiana stanu w czasie eksploatacji [7]. W tej części referatu zajmiemy się identyfikacją wpływu czynników eksploatacyjnych i zmiany stanu związanej z nieprawidłową pracą jarzma w przekładni planetarnej na postać sygnału.

#### 2.1. Teoretyczna zmienność obciążenia

Na rys. 7a przedstawiono teoretyczny przebieg obciążenia zewnętrznego związanego z urabianiem przez koło czerpakowe (rys. 7b). Jest to model zaproponowany przez Bartelmusa [7] opracowany na potrzeby uwzględniania czynnika eksploatacyjnego w modelowaniu dynamiki układu napędowego z przekładnią w zastosowaniu do diagnostyki. Autorowi znany jest także bardziej zaawansowany model Szepietowskiego [8] ale na potrzeby niniejszej pracy zdecydowano wykorzystać model Bartelmusa ze względu na łatwość zbudowania procedury opisującej zaproponowany kształt przebiegu.





Rys. 7. a) teoretyczny kształt zmian obciążenia [7] 7b) widok koła czerpakowego

# 2.2. Wpływ zmienności obciążenia na punkt pracy silnika

Zmiana obciążenia powoduje zmianę punktu pracy silnika (rys. 8). Przykładowo: wzrost obciążenia powoduje wzrost momentu obrotowego silnika i jednocześnie spadek prędkości obrotowej rotora silnika czyli spadek prędkości obrotowej na wejściu przekładni. Oznacza to zmiane częstotliwości wszystkich składowych zależnych od prędkości obrotowej (częstotliwości wałów, zazębień itd.). Jeśli zmienność obciążenia jest powoduje cykliczna to modulację częstotliwościową.



Rys. 8. Charakterystyka silnika [7]

#### 2.3. Wpływ nieprawidłowej pracy jarzma

Nieprawidłowa praca wału w przekładni zębatej powoduje wzrost amplitudy składowych o częstotliwościach  $f_w$ ,  $2f_w$ ,  $3f_w$  w zależności od rodzaju niesprawności [7].

Zatem w analizowanej przekładni planetarnej nieprawidłowa praca jarzma powinna powodować wzrost amplitud składowych o częstotliwości związanej z jarzmem (zwanej dalej częstotliwością jarzma). Zauważono, że dla wzrastającego obciążenia zewnętrznego nieprawidłowa praca jarzma manifestowana jest silniej przez wzrost amplitudy drugiej harmonicznej jarzma, która oznacza zwykle utratę osiowości lub luz w parach obrotowych [7]. Przyczyną korelacji pomiędzy wartością obciążenia a amplitudą tej składowej jest najprawdopodobniej zużycie łożysk (nadmierny luz).

# MODELOWANIE SYGNAŁU DRGANIOWEGO Model matematyczny modulacji amplitudowej pochodzącej od zmiennego

obciążenia

Wpływ zmiennego okresowego obciążenia na postać sygnału określił Randall [9]. Stwierdził on fakt występowania modulacji amplitudowej (AM) sygnału generowanego przez zazębienia spowodowanej zmiennymi ugięciami współpracujących zębów zależnymi od wartości obciążenia zewnętrznego. Równanie modulacji AM opisane jest następująco:

$$S_{AM} = (1 + m \cdot s_m) \cdot S_n \tag{1}$$

gdzie m – współczynnik głębokości modulacji

 $S_n$  - sygnał nośny (częstotliwość zazębienia) – ograniczono się do wykorzystania jednej harmonicznej opisanej jako:

$$S_n = A_{MESH(i)} \cdot \sin(2\pi f_{MESH(i)}t)$$
(2)

 $s_m$  jest funkcją modulującą opisaną jako:

 $s_m = s_{LOAD} = A_{LOAD} \cdot triangle(2\pi f_{LOAD}t)$  (3) gdzie *triangle* jest wbudowana funkcją pakietu

Matlab umożliwiającą generowanie przebiegów piłokształtnych o zadanej częstotliwości i wypełnieniu.

## 4.2. Model matematyczny modulacji częstotliwościowej pochodzącej od zmiennego obciążenia

Równanie opisujące wpływ zmiennej prędkości obrotowej dla przekładni zębatej można zapisać:

$$S_{FM} = \sin(2\pi (f_{MESH(i)}(t)) \cdot t)$$
(4)

Równanie (4) oznacza, że częstotliwość zazębienia  $f_{\text{MESH}}$  będzie zmienna w czasie. Czynnikiem modulującym jest wyrażenie:

$$f_{MESH(i)}(t) = f_{MESH(i)} + m_f \cdot s_m(t)$$
 (5)

uwzględniając że  $s_m(t)$  jest reprezentowany przez zmiany obciążenia otrzymujemy:

$$S_{FM} = \sin(2\pi f_{MESH(i)} \cdot t + + m_f \cdot triangle(2\pi f_{LOAD}) \cdot t)$$
(6)

Należy dodać, że zmiany obciążenia powodujące opisany powyżej efekt zmienności częstotliwości zazębienia (modulacji częstotliwości) powodują również zmienność częstotliwości chwilowej związanej z jarzmem. W modelowaniu wpływu zmienności obciążenia na postać sygnału ten efekt został pominięty.

#### 4.3. Model matematyczny modulacji amplitudowej wywołanej nieprawidłową pracą jarzma

Jak już wspomniano podczas wstępnych analiz sygnałów drganiowych zarejestrowanych na badanym obiekcie wykryto silną modulację amplitudową związaną z nieprawidłową pracą jarzma. Tego typu niesprawności modeluje się wykorzystując równanie modulacji amplitudowej:

$$s_{ARM} = A_{ARM} \cdot \sin(2\pi f_{ARM} t) \tag{7}$$

zauważono, że dla jednej z przekładni okresowo pojawia się dodatkowa składowa - druga harmoniczna częstotliwości jarzma. Stwierdzono silną zależność pomiędzy amplitudą tej składowej a wartością obciążenia. Sygnał generowany podczas pracy jarzma można opisać następująco:

$$s_{ARM} = A_{ARM1} \cdot \sin(2\pi f_{ARM} t)$$

$$\cdots + A_{4RM2}(t) \cdot \sin(2\pi 2 \cdot f_{4RM} t)$$
(8)

gdzie  $A_{ARM1}$  oznacza amplitudę składowej o częstotliwości jarzma a  $A_{ARM2}$  oznacza amplitudę składowej o częstotliwości dwukrotnie większej.  $A_{ARM2}$ ,która jest zależna od czasu – zależność tę można opisać ponownie wykorzystując równanie modulacji:

$$\begin{aligned} A_{ARM2}(t) &= (1 + triangle(2\pi f_{LOAD}t)) \\ \sin(2\pi 2 \cdot f_{ARM}t) \end{aligned} \tag{9}$$

#### 4.4. Kompleksowy model sygnału z uwzględnieniem eksploatacji w zmiennych warunkach i nieprawidłowej pracy jarzma

Model sygnału drganiowego z uwzględnieniem wpływu czynników: eksploatacyjnego (zmienne wartości chwilowe prędkości i obciążenia zewnętrznego) i zmiany stanu spowodowanej nieprawidłową pracą jarzma można zapisać jako:

$$S_{AM/FM} = (1 + A_{LOAD} \cdot triangle(2\pi f_{LOAD}t) + \dots + A_{ARM1} \cdot \sin(2\pi f_{ARM}t))$$

$$\dots + A_{ARM2}(t) \cdot \sin(2\pi \cdot 2f_{ARM}t))$$

$$\cdot \sin(2\pi (f_{MESH(i)} + triangle(2\pi f_{LOAD})) \cdot t)$$
(10)

#### 5. WYNIKI SYMULACJI I ANALIZ

Na rys. 9a przedstawiono sygnał zmodulowany amplitudowo - sygnałem nośnym jest sygnał przez jedna generowany zazębienie (tu harmoniczna) a sygnałem modulującym jest wolnozmienny sygnał reprezentujący zmienność obciążenia (charakterystyczny piłokształtny przebieg związany z pracą organu urabiajacego). Uwzględnienie nieprawidłowej pracy jarzma prowadzi do "podwójnej" modulacji amplitudowej gdzie czynnikiem (sygnałem) modulującym oprócz zmiennego obciążenia jest także sygnał sinusoidalny o częstotliwości jarzma (rys. 9b). Widmo sygnału zmodulowanego przedstawia rys 9b. Widoczne widmie prążki to składowa zwiazana w z zazębieniem oraz wstęgi boczne - efekt modulacji pochodzącej od jarzma. Wstęgi boczne związane z modulacją pochodzącą od zmian obciążenia (f<sub>Load</sub>=0.55Hz) nie są widoczne ze względu na przyjętą rozdzielczość analizy widmowej.

Rozpatrywanie zmiennych warunków jako eksploatacyjnych zmienności ujemnie prędkości skorelowanych i momentu na charakterystyce silnika prowadzi do zastosowania jednocześnie modulacji amplitudy (AM) i częstotliwości (FM). Widmo tak wytworzonego sygnału jest rozmyte (rys. 10) i trudno jest zidentyfikować jakiekolwiek składowe. Mapa czasowo-częstotliwościowa (STFT) wyraźnie pokazuje zmienność częstotliwości w cyklu obciążenia (por. rys. 10 b oraz rys. 3).

Ze względu na nienajlepszą rozdzielczość STFT (podstawowa wada tej analizy) zdecydowano eksperyment symulacyjny przeprowadzić dla dziesięciokrotnie większej wartości częstotliwości jarzma. Taki eksperyment pozornie iest nieuzasadniony ze względu na brak możliwości modyfikacji przekładni, jednakże pozwala na zrozumienie struktury częstotliwościowej sygnału i prowadzenie dalszych analiz, które jak to zostanie pokazane w następnym rozdziale, wyjaśniają problemy związane z separacją źródeł modulacji.

Rys. 11 przedstawia podwójną modulację AM ale dla nowej częstotliwości jarzma. Eksperyment wykonano dla przypadku bez modulacji FM (rys. 11a – widoczne wstęgi boczne, 11b - mapa czasowo częstotliwościowa zawiera poziome linie oznaczające częstotliwości stałe w czasie). Uwzględnienie modulacji FM pozwala na mapie AM (load) signal modulation czasowo częstotliwościowej (rys. 12b) zauważyć, że nie tylko częstotliwość nośna zmienia się cyklicznie ale także częstotliwości wstęg bocznych – rys. 12b. Identyfikacja składowych odpowiadającym wstęgom bocznym w widmie nie jest możliwa.

Na rys. 13 przedstawiono spektrogram sygnału modulującego modelujący nieprawidłową pracę jarzma. Sygnał modulujący zawiera składową o częstotliwości jarzma f<sub>JARZMA</sub> o amplitudzie stałej w czasie oraz składową o częstotliwości dwukrotnie większej, której amplituda zależna jest od wartości chwilowego obciążenia

Rys. 13b przedstawia spektrogram sygnału zmodulowanego amplitudowo i częstotliwościowo z uwzględnieniem zmiennego obciążenia i nieprawidłowej pracy jarzma (wspomniane powyżej 2 składowe).



Rys. 9. a) Sygnał zmodulowany amplitudowo (obciążenie) – przebieg czasowy b) Sygnał zmodulowany amplitudowo (obciążenie + jarzmo f=4,5Hz) – przebieg czasowy i widmo 24M/FM signal modulation







Rys. 11. Sygnał zmodulowany amplitudowo (obciążenie + jarzmo, f=45Hz) – przebieg czasowy i widmo, b) Spektrogram sygnału z rys. 11a



Rys. 12. Sygnał zmodulowany amplitudowo (obciążenie + jarzmo f=45Hz) i częstotliwościowo (obciążenie) – przebieg czasowy i widmo, b) Spektrogram sygnału z rys 12a



Rys. 13. Spektrogramy sygnałów a) modulującego z uwzględnieniem 2 harmonicznej jarzma f=45Hz b) zmodulowanego AM/FM z uwzględnieniem 2 harmonicznej jarzma

#### 6. EKSTRAKCJA INFORMACJI Z SYGNAŁU OBWIEDNI

W celu eliminacji wpływu zmiennego obciążenia na sygnał drganiowy postanowiono wykorzystać procedurę normalizacji zaproponowaną przez Standera [1]. W celu wykorzystania tej metody należy wyodrębnić z sygnału drganiowego wolnozmienną, powiązaną ze zmianami obciążenia, część obwiedni. Ekstrakcja informacji z sygnału obwiedni (separacia źródeł modulacji) polega na zastosowaniu filtracji dolno przepustowej (do odseparowania sygnału związanego z obciążeniem) bądź górno przepustowej (do odseparowania sygnału związanego z nieprawidłową pracą jarzma) do sygnału obwiedni uzyskanej z demodulacji. Ze względu na niewielkie różnice w częstotliwości zmian obciążenia i pracy jarzma oraz charakter przebiegu zmian obciążenia (sygnał niesinusoidalny obejmuje pasmo o pewnej szerokości - zob. rys. 14b) podczas separacji nie jest możliwe wyekstrahowanie pełnej informacji dotyczącej obciążenia. Na rysunkach 15a-d przedstawiono wpływ liczby próbek użytych do filtracji z wykorzystaniem zerowania FFT. Czym większa liczba próbek w FFT użyta jest w procesie rekonstrukcji sygnału -tym lepiej rekonstruowany jest sygnał będący źródłem modulacji AM pochodzącej od zmian obciążenia.

Zdaniem autora między innymi tym faktem można tłumaczyć odstępstwa rzeczywistych sygnałów obwiedni od teoretycznych przebiegów obciążenia. Nie do pominięcia są również czynniki wynikające wprost ze sposobu prowadzenia eksploatacji górniczej (sterowania procesem urabiania).



Rys. 14. Przebiegi czasowe stanowiące sygnały modulujące: zmiany obciążenia (0.55Hz) i nieprawidłową pracę jarzma (4Hz) i widmo sumy tych sygnałów



Rys. 15. Wpływ liczby próbek na postać rekonstruowanego sygnału obwiedni związanej z obciążeniem: a) 180 próbek – idealna rekonstrukcja, b) 20 próbek, c) 10próbek,
d) 8 próbek – wyraźne różnice w przebiegu sygnału w porównaniu z wzorcowym sygnałem

## 7. NORMALIZACJA

Koncepcje eliminacji wpływu zmiennego obciażenia na postać sygnału drganiowego zaproponowanej przez Standera [1] ilustruje rys.16. Koncepcja ta bazuje na zjawisku modulacji amplitudowej sygnału o częstotliwości zazębienia [9] przez sygnał wolnozmienny charakteryzujący fluktuacje obciążenia. Na rys. 16 pokazano sygnał zmodulowany amplitudowo (funkcja modulująca reprezentowana jako przebieg sinusoidalny), jego obwiednie i sygnał znormalizowany (normalizacja polega na podzieleniu sygnału zmodulowanego przez obwiednie).



Rys. 16. Idea normalizacji sygnału

Podczas testowania tej metody dla sygnałów rzeczywistych zarejestrowanych na przekładni autor napotkał wiele problemów, których wyjaśnienie uzyskano na podstawie opracowanego modelu. Procedura normalizacji polega na:

- demodulacji sygnału,
- odfiltrowaniu użytecznej (związanej ze zmianami obciążenia) części obwiedni (filtracja dolnoprzepustowa),
- podzieleniu sygnału zmodulowanego przez przygotowany sygnał obwiedni.

Jak się okazało kluczowym zagadnieniem jest ekstrakcja użytecznej części obwiedni. Ze względu na występowanie modulacji pochodzącej od obciażenia i od nieprawidłowej pracy jarzma, niewielkie różnice częstotliwości modulujących i złożoną postać sygnału obciążenia oddzielenie tych składowych w sygnale obwiedni jest bardzo utrudnione. Zastosowanie filtracji dolnoprzepustowej z częstotliwości graniczną dobraną tak, aby odseparować częstotliwość pochodzącą od jarzma powoduje zniekształcenia sygnału (część energii sygnału obciążenia jest tracona). Pozyskanie zniekształconej postaci sygnału obciążenia powoduje zniekształcenie sygnału po normalizacji (rys. 17 i 19).

Przeprowadzony eksperyment symulacyjny polegający na zwiększeniu częstotliwości granicznej filtru dał bardzo dobre rezultaty (brak zniekształceń w znormalizowanym sygnale) i potwierdził hipotezę, że główną przyczyną błędów w normalizacji jest zniekształcona obwiednia. (rys. 18 i 20).

Występowanie jednoczesne modulacji pochodzących od obciążenia i od nieprawidłowej pracy jarzma powoduje dodatkowe kłopoty procesie normalizacji. Na 17-20 W rys. wyniki przedstawiono eksperymentów symulacyjnych dla częstotliwości jarzma f<sub>JARZMA</sub>=4.5 Hz oraz f<sub>JARZMA</sub>=45 Hz. W pierwszym przypadku widoczne są zniekształcenia przebiegu spowodowane deformacją pozyskanego sygnału obciążenia natomiast w drugim przypadku wynik jest zadowalający (aczkolwiek można zauważyć niewielkie zniekształcenia).



Rys.17. a) Sygnał zmodulowany amplitudowo (tylko obciążenie), filtracja f<sub>LP</sub>=4Hz, b) sygnał znormalizowany względem obciążenia



Rys.18. a) Sygnał zmodulowany amplitudowo (obciążenie), filtracja f<sub>LP</sub>=40Hz, b) sygnał znormalizowany względem obciążenia



Rys. 19. a) Sygnał podwójnie zmodulowany amplitudowo (obciążenie oraz jarzmo f=4.5Hz), filtracja f<sub>LP</sub>=4Hz, b) sygnał znormalizowany względem obciążenia



Rys. 20. a) Sygnał podwójnie zmodulowany amplitudowo (obciążenie oraz jarzmo f=45Hz), filtracja f<sub>LP</sub>=40Hz, b) sygnał znormalizowany względem obciążenia

## 8. WNIOSKI

W artykule przedstawiono uproszczony model sygnału generowanego przez przekładnię planetarną pracującą w zmiennych warunkach obciążenia. Model bazuje na zjawiskach modulacji amplitudowej i częstotliwościowej i uwzględnia wpływ czynników eksploatacyjnych (zmiennego cyklicznie obciążenia zewnętrznego powodującego zmienne odkształcenia zębów oraz cyklicznie zmiennego obciążenia zewnętrznego powodującego zmianę punktu pracy na charakterystyce silnika, co powoduje zmianę prędkości obrotowej na wejściu przekładni) oraz wpływ zmiany stanu reprezentowanej przez nieprawidłową pracę jarzma. Zaproponowany model wykorzystany został między innymi do testowania procedury normalizacyjnej Standera. Wykazano, że ze względu na zbliżone częstotliwości jarzma i obciążenia oparta na filtracji ekstrakcja sygnału zawierającego informacje o obciążeniu jest utrudniona. Pozyskanie niepełnej informacji o obwiedni i wykorzystanie jej w procedurze normalizacji powoduje zniekształcenia unormowanego sygnału.

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2005- 2008 jako projekt badawczy

## LITERATURA

- [1] Stander C. J. And P. S. Heyns W. Schoombie Using Vibration Monitoring For Local Fault Detection on Gears Operating Under Fluctuating Load Conditions. Mechanical Systems And Signal Processing (2002) 16(6), 1005–1024.
- [2] Bartelmus W., Zimroz R.: *Planetary gearbox vibration signal analysis for condition monitoring* COMADEM Conference Cranfield 2005.
- [3] Bartelmus W, Zimroz R, Hryniszyn S: Identyfikacja warunków eksploatacyjnych na potrzeby diagnostyki przekładni planetarnej do

napędu koła czerpakowego, Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka 2006.

- [4] Dabrowski Z., Radkowski S., Wilk A.: Dynamika przekładni zębatych – Badania i symulacja w projektowaniu eksploatacyjnie zorientowanym. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu Warszawa – Katowice – Radom 2000.
- [5] Radkowski S.: Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych. Wyd. ITE Radom 2002.
- [6] Bartelmus W., Zimroz R.: Identyfikacja warunków eksploatacyjnych na potrzeby diagnostyki przekładni planetarnej do napędu koła czerpakowego. submitted to Diagnostyka 1(37)/2006).
- [7] Bartelmus W.: *Diagnostyka Maszyn*. Górnictwo Odkrywkowe wyd. Slask 2000.
- [8] Szepietowski M.: Model obciążenia obwodowego koła czerpakowego w badaniach symulacyjnych napędu koła. IV Międzynarodowa Konferencja Techniki Urabiania TUR 2005.
- [9] Randall R. B.: A new method of modeling gear faults. 1982 Journal of Mechanical Design 104, 259–267.



Dr inż. Radosław ZIMROZ. Absolwent Akustyki Wydziału Elektroniki PWr 1998, doktorat na Wydziałe Górniczym PWr. 2002 (z wyróżnieniem). Od 1998 w Zakładzie Systemów Maszynowych IG PWr. Staż naukowy (9 miesięcy) w Wielkiej Cranfield University

Brytanii w Cranfield University (SOE/PASE/AMAC). Zainteresowania: modelowanie i diagnostyka przekładni zębatych, przetwarzanie sygnałów drganiowych, zastosowania metod sztucznej inteligencji w diagnostyce maszyn, systemy monitorowania i diagnozowania stanu maszyn na podstawie drgań.

## SYSTEM ZAAWANSOWANEGO MONITOROWANIA I DIAGNOSTYKI PROCESÓW PRZEMYSŁOWYCH 'AMandD'\*

## Jan Maciej KOŚCIELNY, Michał SYFERT, Paweł WNUK

Institute of Automatic Control and Robotics, Warsaw University of Technology ul. Chodkiewicza 8, 02-525 Warsaw, Poland e-mail: {jmk, m.syfert, p.wnuk}@mchtr.pw.edu.pl

#### Streszczenie

W artykule zaprezentowano strukturę oraz właściwości użytkowe systemu zaawansowanego monitorowania i diagnostyki AMandD. System ten przeznaczony jest dla złożonych procesów przemysłowych. Przedstawiono opis wykorzystanych w systemie nowoczesnych algorytmów modelowania oraz detekcji i lokalizacji uszkodzeń jak i wykorzystanych rozwiązań informatycznych. Na zakończenie zarysowano także kierunki dalszych badań i rozwoju systemu.

Słowa kluczowe: system wspomagania decyzji, nadzorowanie, diagnostyka uszkodzeń, symulatory procesów.

# ADVANCED MONITORING AND DIAGNOSTIC SYSTEM OF INDUSTRIAL PROCESSES 'AMandD'

#### Summary

The paper presents structure and functional properties of the Advanced Monitoring and Diagnostic System 'AMandD' dedicated for large scale industrial processes. Applied in the system up-to-date algorithms of modeling methods and fault detection and isolation were described in the paper. Also a brief description of used IT solutions was presented. As a conclusion, the further directions of development and researches were mentioned.

Keywords: decision support systems, supervision, fault diagnosis, process simulators.

#### 1. PRZEZNACZENIE SYSTEMU

Głównym zadaniem systemu AMandD (rys. 1) jest dokładne wczesne rozpoznawanie i nieprawidłowych stanów procesu przemysłowego uszkodzeń urządzeń technologicznych, oraz wykonawczych i pomiarowych. W stanach nienormalnych i awaryjnych system wspomaga operatorów procesu poprzez przekazywanie im generowanych diagnoz uszkodzeniach 0 komunikatów ewentualnie doradczych informujacych niezbednych działaniach 0 zabezpieczających. Diagnozy znacznie dokładniej określają stan procesu niż sekwencje alarmów generowanych we współczesnych systemach automatyki. Dodatkowo system wyposażony jest w zaawansowane narzędzia do modelowania obiektów, co umożliwia tworzenie programowych sensorów i analizatorów. Dzięki rozbudowanemu

modułowi przetwarzania zmiennych przy jego pomocy można również łatwo budować symulatory procesów.

System jest przeznaczony do zastosowania w przemyśle energetycznym, chemicznym, farmaceutycznym, hutniczym, spożywczym i innych.

System jest rozwiązaniem unikatowym w skali światowej. Został on opracowany w Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej. Wcześniejsze rozwiązania systemów diagnostycznych (np. systemy MODI firmy ABB i KNOBOS firmy Siemens były zorientowane na konkretne obiekty - kotły bloków energetycznych i funkcjonowały wg innych zasad). Z drugiej strony - dostępne na rynku pakiety modelowania procesów są zazwyczaj dość silnie zintegrowane z jakimś systemem automatyki (przykładowo ShadowPlant firmy Honeywell) oraz nie mają możliwości łączenia modeli fizykochemicznych modelami Z

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Praca powstała w ramach Programu Wieloletniego PW-004 pn. "Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004-2008", ustanowionego przez Radę Ministrów RP; grant zamawiany nr PW-004/ITE/07/2005 nt. "Zaawansowany system i urządzenia diagnostyczne dla aparatów technologicznych i procesów".

identyfikowanymi na podstawie danych procesowych. *AMandD* ze względu na otwartą architekturę umożliwia połączenie z praktycznie dowolnym systemem automatyki z jednej strony, z drugiej – zawiera implementację szerokiej gamy najnowszych algorytmów, zarówno w dziedzinie diagnostyki, jak i identyfikacji, czego nie oferują produkty komercyjne dostępne na rynku.



Rys. 1. Podstawowe zadania systemu AMandD

## 2. FUNKCJE SYSTEMU

System *AMandD* umożliwia realizację następujących zadań:

- modelowanie procesów zarówno przy wykorzystaniu modeli identyfikowanych w formie "czarnej" czy "szarej skrzynki", jak i budowę modeli bilansowych czy fizykochemicznych. Modele budowane przy pomocy systemu AMandD mogą być wykorzystywane w czasie rzeczywistym,
- przetwarzanie zmiennych procesowych konfigurowalne w postaci schematu bloków funkcyjnych, dzięki czemu proste staje się tworzenie systemów obliczeń bilansowych/ sprawnościowych, a także praktycznie dowolne przekształcanie mierzonych zmiennych zgodnie z algorytmami wprowadzonymi przez użytkownika,
- budowę programowych sensorów i analizatorów bazujących na modelach procesów oraz rekonstrukcję wartości zmiennych procesowych. W oparciu model (analityczny lub 0 identyfikowany) przy wykorzystaniu systemu AMandD jest możliwe zarówno odtwarzanie pomiarów, które tymczasowo są niedostępne (np. z powodu uszkodzenia czujnika) jak i nieosiągalne pomiarowo w czasie rzeczywistym (np. zawartość cześci palnych w popiele),
- budowę programowych symulatorów procesów ogólnego stosowania, ze szczególnym uwzględnieniem szkolenia załogi,
- detekcję uszkodzeń system umożliwia \_ wykrywanie faktu wystąpienia uszkodzenia w nadzorowanej instalacji, niezależnie od tego czy jedno uszkodzeniu uległo z urzadzeń technologicznych, pomiarowych czy wykonawczych,

- lokalizację uszkodzeń nagłych i powoli narastających. System jest w stanie precyzyjnie wskazać zaistniałe uszkodzenie lub podzbiór możliwych uszkodzeń oraz w przypadku urządzeń podlegających powolnej degradacji – oszacować stopień niesprawności urządzenia,
- wizualizację wyników diagnozowania,
- wspomaganie decyzji operatorów w stanach nienormalnych i awaryjnych, przez co rozumie się automatyczne dostarczanie operatorom instrukcji postępowania w przypadku sytuacji nienormalnej – awaryjnej.

Należy natomiast podkreślić że system *AMandD* nie realizuje bezpośrednio zadania sterowania instalacją. Pełni on rolę systemu nadzorczodoradczego.

Ze względu na otwartą architekturę oraz zastosowanie nowoczesnych technologii informatycznych funkcje systemu *AMandD* mogą zostać w łatwy sposób rozszerzone. Rozszerzenia takie realizowane są w ramach planowego rozwoju sytemu podczas, którego dodawane są nowe moduły implementujące kolejne algorytmy zaawansowanego monitorowania i diagnostyki. Możliwe jest także tworzenie specjalistycznych modułów systemu przeznaczonych do realizacji specjalizowanych zadań związanych z konkretną aplikacją.

## 2.1. Symulacja i modelowanie

Stosowanie nowych strategii zarzadzania procesami przemysłowymi coraz częściej wymaga tworzenia modeli procesu czy też jego części. Modele wiernie naśladujące przebieg rzeczywistego procesu są potrzebne między innymi w celu optymalizacji pracy instalacji, testowania nowych strategii sterowania czy też szkolenia operatorów. Modele znacznie mniejszej skali, wyliczające tylko pojedyncze zmienne procesowe (np. model zawartości CO2 w spalinach czy temperatury w reaktorze) można wykorzystywać jako analityczną redundancję rzeczywistego pomiaru, czy też jako jego odpowiednik w przypadku, gdy pomiaru brakuje.

Do tworzenia modeli globalnych całej instalacji w pakiecie *AMandD* wykorzystywany jest moduł *CalcPaths*. Natomiast modele fragmentów procesu czy też poszczególnych zmiennych procesowych uzyskiwane są zazwyczaj na drodze identyfikacji, prowadzonej przy wykorzystaniu istniejących archiwalnych przebiegów zmian wartości poszczególnych sygnałów.

W pakiecie AMandD do celów identyfikacji przeznaczony jest moduł MITforRD. Umożliwia on tworzenie modeli poszczególnych części instalacji technologicznej bez konieczności znajomości analitycznej postaci związków pomiędzy poszczególnymi pomiarami. Przykładowo w celu utworzenia modelu temperatury w reaktorze nie jest wymagana od inżyniera wiedza o reakcji tam zachodzącej czy też postać równań opisujących daną reakcję, lecz jedynie dostępność archiwalnych pomiarów modelowanej wielkości oraz zmiennych, od których dana wielkość zależy.

*MlTforRD* pozwala na identyfikację modeli zarówno statycznych jak i dynamicznych różnych typów, poczynając od szeroko znanej transmitancji liniowej, a kończąc na modelach neuronowych i rozmytych. Identyfikacja prowadzona jest w trybie off-line z wykorzystaniem danych pomiarowych zbieranych i archiwizowanych w systemach automatyki DCS lub SCADA.



Rys. 2. Analiza i wstępne przetwarzanie danych w module *MITforRD* 

Oprogramowanie umożliwia komfortową pracę z danymi pomiarowymi (rys. 2). Wbudowany edytor pozwala na zmianę wartości poszczególnych próbek, sygnały mogą być wyświetlane na kilka sposobów, z wygodnymi funkcjami powiększania i przesuwania wykresów oraz prezentacji wielu serii danych na jednym wykresie. Analiza danych jest możliwa plugin) dzieki szeregowi wtyczek (ang. umożliwiających m. in. wyświetlanie korelacji, spektrum mocy, histogramów, trendów, filtrację oraz swobodne przekształcanie sygnałów wg wprowadzonego przez użytkownika wyrażenia matematycznego. Całości dopełniaja funkcje importu danych z zewnętrznych formatów oraz funkcje umożliwiające łączenie danych.

Sam proces identyfikacji obiektu wykorzystuje koncepcję asystentów wspierających użytkownika i sprowadza się do potrzeby udzielenia odpowiedzi na kilka prostych pytań, np. o wybór sygnałów wejściowych, typu modelu (liniowy, neuronowy, rozmyty, itp.) oraz określenia podstawowych parametrów procedury identyfikacyjnej (rys. 3). W odróżnieniu od innych programów tego typu w pakiecie MITforRD nie wymaga się od użytkownika głębokiej wiedzy z dziedziny identyfikacji i umiejętności programowania. Jest to także jedyne środowisko o tak szerokiej gamie dostępnych typów modeli zaopatrzonych w jednolity interfejs użytkownika, możliwych do natychmiastowego zastosowania w pracy on-line.



W celu automatycznego poszukiwania struktury modeli pakiet stosuje najnowsze algorytmy z dziedziny inteligencji obliczeniowej (algorytmy genetyczne, roju cząstek, uczenie maszynowe), co pozwala na uzyskanie modeli wysokiej jakości nawet w przypadku niewystarczającej wiedzy o modelowanych procesach.



Real Time Simulator w trybie on-line

W trybie on-line moduł *MIIIforRD* na podstawie bieżących wartości pomiarowych wylicza zmienne procesowe będące wyjściami modeli. W ten sposób realizowana jest redundancja informacyjna (rys. 4). Wirtualne sensory mogą służyć między innymi do rekonstrukcji wartości sygnałów w przypadku uszkodzonych lub czasowo odłączonych torów pomiarowych. Moduł *MIIIforRD* wylicza także na bieżąco wartości residuów, tj. różnice między wartościami sygnałów mierzonych i modelowanych.

Aktualnie przy pomocy modułu *MITforRD* mogą być identyfikowane (rys. 5) modele statyczne i dynamiczne następujących typów:

- klasyczne modele liniowe w formie transmitancji dla czasu dyskretnego G(z). Identyfikacja jest prowadzona na podstawie minimalizacji kryterium LS (Least Square) przy wykorzystaniu algorytmu SVD, przy czym poszukiwane są również prawidłowe wartości opóźnień oraz rząd modelu,
- modele w formie sztucznych sieci neuronowych (ANN) o klasycznej strukturze, tzn. w formie wielowarstwowej sieci neuronowej. Dostępne są różnorodne algorytmy uczenia sieci, poczynając od wstecznej propagacji błędu, poprzez metodę gradientów sprzężonych, a kończąc na symulowanym wyżarzaniu czy też optymalizacji genetycznej,



Rys. 5. Przykład modelowania sygnałów z w systemie AmandD

- modele rozmyte 0 strukturze TSK, identyfikowaną z strukturą, parametrami rozmywania oraz współczynnikami równań opisujących zachowanie obiektu się w poszczególnych obszarach. Funkcja następnika ma postać wielomianową, co jest rozwiązaniem unikalnym. Identyfikacja takich modeli jest wykonywana przy pomocy specjalizowanego algorytmu ewolucyjnego.
- modele wielomianowe (identyfikacja struktury wielomianu oraz estymacja współczynników).

Powyższa lista nie zamyka wszystkich możliwych typów modeli. Dzięki otwartej architekturze, opartej na wtyczkach (*ang. plugin*) możliwa jest łatwa rozbudowa listy dostępnych modeli, zarówno poprzez autorów systemu, jak i jednostki niezależne.

Budowanie modeli analitycznych (np. bilansowych) w systemie *AMandD* jest możliwe przy zastosowaniu modułu *CalcPaths*.

## 2.2. Przetwarzanie zmiennych procesowych

W systemie *AMandD* możliwe jest swobodne projektowanie torów przetwarzania poszczególnych zmiennych systemowych (procesowych). Zadanie to realizowane jest przez moduł *CalcPaths* (rys. 6). Moduł ten umożliwia tworzenie torów przetwarzania poszczególnych sygnałów przy pomocy różnego rodzaju bloków funkcyjnych, zarówno statycznych jak i dynamicznych, w sposób zbliżony do rozwiązania zastosowanego w pakiecie Matlab Simulink.

Moduł *CalePaths* może pobierać dane zarówno z procesu (przez odpowiednie bloki łączące) jak też z innych źródeł oraz działać jak generator sygnałów. Obliczone wartości wyjściowe mogą być przekazane zarówno do innych modułów systemu *AMandD*, jak i z powrotem do systemu automatyki.

Użytkownik ma do dyspozycji szereg bloków realizujących podstawowe operacje matematyczne i logiczne, operacje wejścia i wyjścia, sterowanie przepływem sygnałów, operatory całkowania i różniczkowania, filtrację, specjalistyczne testy diagnostyczne i wiele innych. Ponadto dzięki otwartej architekturze możliwa jest łatwa rozbudowa i tworzenie nowych specjalizowanych bloków w postaci wtyczek.



Rys. 6. Moduł przetwarzania zmiennych procesowych – *CalePaths* 

Moduł *CalcPaths* stosowany może być do budowania modeli analitycznych, bazujących np. na równaniach fizyko-chemicznych, wykorzystywanych potem jako symulatory procesów lub ich części składowych. Moduł zawiera także zbiór prostych algorytmów pozwalających na tworzenie testów heurystycznych dla potrzeb detekcji uszkodzeń. Inne możliwości wykorzystania modułu to: obliczenia bilansowe, wyznaczanie wartości wskaźników sprawności urządzeń, warunkowe sterowanie przepływem informacji, itp.

#### 2.3. Wirtualne sensory i analizatory

Wirtualne sensory budowane z wykorzystaniem modeli analitycznych, neuronowych lub rozmytych stanowią redundancję informacyjną sygnałów pomiarowych. Pomiary niektórych wielkości fizycznych są kosztowne, innych niemożliwe do realizacji w sposób ciągły. W miejsce redundancji sprzętowej w wielu przypadkach korzystniej jest wykorzystać modele procesów do wyliczania wartości wielkości fizycznych na podstawie innych mierzonych zmiennych procesowych. Przykładowo w energetyce szczególnie celowa jest budowa wirtualnych analizatorów emisji NOx i COx (analizatory sprzętowe sprawiają wiele kłopotów eksploatacyjnych) oraz analizatorów zawartości części palnych w popiele (bezpośredni pomiar w czasie rzeczywistym tej wielkości jest trudno zwykle analizy dokonuje osiagalny. sie w laboratorium z dużym opóźnieniem). Analizatory programowe są strojone z wykorzystaniem wzorcowych analizatorów sprzętowych, bądź też wartości otrzymywanych na drodze analiz laboratoryjnych.

W przypadku stosowania redundancji informacyjnej, jeśli dojdzie do uszkodzenia toru pomiarowego, to wartość zmiennej może być rekonstruowana na podstawie wirtualnego sensora lub analizatora (rys. 7). Uzyskujemy w ten sposób odporność systemu na uszkodzenia tych torów pomiarowych, dla których istnieją odpowiedniki wirtualne. Odporność ta dotyczy wszelkich obliczeń prowadzonych z wykorzystaniem wartości takich sygnałów (bilansów, obliczeń wskaźników technicznych, ekonomicznych itp.), a także układów sterowania wykorzystujących redundancję informacyjną.



Rys. 7. Przykład walidacji torów pomiarowych bazujący na wykorzystaniu redundancji analitycznej

## 2.4. Symulatory procesów

Współczesne instalacje technologiczne stają się coraz bardziej skomplikowane. Jednocześnie rosną wymagania odnośnie niezawodności i ciągłości pracy takich instalacji, jak też utrzymywania punktu pracy w pobliżu maksimum wydajności. Wymaga to z jednej strony niezawodnych systemów automatyki i diagnostyki procesu oraz stosowania procedur optymalizacyjnych, drugiej doskonale z wyszkolonych i przygotowanych operatorów. Wymaganie dotyczące stopnia przygotowania operatorów jest szczególnie trudne do spełnienia. Stwierdzono bowiem, że wraz ze wzrostem stopnia automatyzacji i niezawodności instalacji procesowej kwalifikacje operatorów w zakresie podejmowania właściwych działań w sytuacjach nietypowych i awaryjnych ulegają zmniejszeniu.

Ponadto szkolenia operatorów na rzeczywistej i pracującej instalacji są nieefektywne ze względu na: ograniczone możliwości działania w warunkach uszkodzenia, rozruchu czy też zmiany punktu pracy instalacji, brak możliwości wprowadzania zwiększenie rzeczywistych uszkodzeń oraz zatrudnienia ze względu na potrzebny długi okres szkolenia pod okiem bardziej doświadczonych operatorów. Nawet przy najdłuższym okresie szkolenia zazwyczaj nie zdarzą się wszystkie możliwe stany pracy instalacji, co prędzej czy później doprowadzi do sytuacji, kiedy operator będzie musiał pracować w warunkach, do których nie został przygotowany (przykładowo wystąpienie awarii, która nie wystąpiła w okresie jego szkolenia).

Uniknięcie wszystkich wymienionych wyżej niedogodności jest możliwe dzięki zastosowaniu symulatorów procesów. Symulator taki zazwyczaj składa się z systemu automatyki, który nadzoruje daną instalację oraz oprogramowania, które symuluje zachowanie się rzeczywistego procesu. System *AMandD* może zostać wykorzystany do tworzenia tego typu symulatorów. Dzięki modułowi *CalcPaths* można zbudować fizykochemiczny model procesu, przy czym kluczowe czy też najbardziej skomplikowane fragmenty mogą być modelowane przy pomocy modeli cząstkowych

uzyskanych na drodze identyfikacji przez pakiet *MITforRD*. Modele tworzone przy pomocy modułu *CalsPatch* można w łatwy sposób dostroić do pracy rzeczywistego obiektu z wykorzystaniem danych archiwalnych. Model jest łączony z systemem automatyki i przez niego sterowany dokładnie tak, jak rzeczywista instalacja. Dzięki takiemu podejściu operatorzy pracują w środowisku identycznym do docelowego stanowiska pracy, co pozwala na maksymalne uwiarygodnienie szkolenia. Prowadzący szkolenie może wprowadzać wszelkie możliwe uszkodzenia do modelowanej instalacji. Szkoleni trenuja sterowanie stanach w nienormalnych i awaryjnych, mogą przeprowadzać dowolnie dużo rozruchów i zatrzymań procesu, zmian punktów pracy, itp. Ewentualne błędy trakcie szkolenia nie operatorów w mają negatywnych konsekwencji, co w rezultacie daje możliwość pełnego przeszkolenia załogi.

Symulator procesu opracowany dla celów szkolenia operatorów można później wykorzystać również do testowania nowych strategii sterowania lub optymalizacji pracy procesu.

#### 2.5. Detekcja uszkodzeń

Pierwszym zadaniem stawianym systemowi diagnostyki procesów jest wykrycie uszkodzenia. W niektórych przypadkach problem jest trywialny (przecięcie kabla zasilającego czujnik spowoduje alarm w systemie automatyki), lecz często samo wykrycie istnienia uszkodzenia jest niemożliwe przy zastosowaniu klasycznych metod. Przykładem takiego uszkodzenia może być wyciek substancji trującej ze zbiornika o regulowanym poziomie. W trakcie pracy w trybie automatycznym wyciek zostanie skompensowany przez regulator. i w rezultacie operatorzy oraz dozór techniczni nie będą w stanie wykryć faktu istnienia uszkodzenia.



W systemie *AMandD* do detekcji uszkodzeń stosowane są metody bazujące na modelach analitycznych, neuronowych i rozmytych oraz metody heurystyczne wykorzystujące różnego rodzaju relacje między zmiennymi procesowymi [1, 2] (rys. 8), które pozwalają wykryć znacznie większą liczbę uszkodzeń niż klasyczny system alarmowy. Dodatkową zaletą jest czułość tych metod, która w wielu przypadkach pozwala na

wczesne wykrycie uszkodzenia o małych rozmiarach (np. zarastanie gniazda zaworu regulacyjnego lub początek reakcji pasożytniczej w reaktorze chemicznym), zanim ujawnią się negatywne jego skutki. Istnieje w takim przypadku możliwość podjęcia odpowiednich działań zabezpieczających lub naprawczych, ograniczających skutki i straty spowodowane uszkodzeniami.

Detekcja uszkodzeń z zastosowaniem modeli poszczególnych sygnałów polega na ocenie tzw. residuów, tj. różnicy między wartością sygnału mierzonego y oraz wyjściem modelu  $y_M$ . W stanie normalnym wartość residuum r jest bliska zera, natomiast po wystąpieniu uszkodzenia w kontrolowanej części obiektu wartość residuum odbiega od zera, co stanowi symptom uszkodzenia. Metody heurystyczne pozwalają zapisać w systemie



Rys. 9. Detekcja uszkodzenia zaworu regulacyjnego

diagnostycznym dodatkową wiedze o prawidłowym działaniu instalacji. Metody te wykorzystuja proste a także bardziej złożone zależności pomiędzy zmiennymi procesowymi, np. relacje gradientu temperatur w kolumnach i piecach, gradient spadku ciśnienia w rurociągach czy bilanse strumieni mediów. Zależności tego typu są niedoceniane i pomijane przy tworzeniu systemów alarmowych. Tymczasem doświadczenie projektowe wskazuje, iż stanowią one bardzo istotne i pewne źródło informacji o stanie procesu i występujących w nim uszkodzeniach. Wiedza o tego typu związkach jest często w posiadaniu technologów, automatyków i operatorów procesu, natomiast AMandD dostarcza narzędzi do jej zapisania i wykorzystania w trakcie bieżącej diagnostyki instalacji.

Rezultatem algorytmów detekcyjnych są sygnały diagnostyczne niosące informację o wykrytych uszkodzeniach. Na podstawie analizy wartości sygnałów diagnostycznych prowadzona jest lokalizacja uszkodzeń, czyli dokładne określenie uszkodzonego komponentu, oraz stopnia jego uszkodzenia.

Detekcja uszkodzeń realizowana jest w modułach: *MITforRD* (wyliczanie residuów bazujących na modelach), *CalcPaths* (wyznaczanie dodatkowych testów diagnostycznych) oraz w module *iFuzzy-FDI* (rozmyta ocena residuów oraz wyników innych sprawdzeń diagnostycznych). Na rys. 9 pokazano przebiegi mierzonego i modelowanego przepływu kondensatu do kondensatora oraz przebieg wyznaczanego residuum. Symulowano uszkodzenie zaworu regulacyjnego poprzez jego ręczne przymknięcie przez operatora procesu. Osiągnięcie przez residuum wartości spoza zakresu normalnej pracy jest symptomem wprowadzonego uszkodzenia. Badania przeprowadzono w Zakładach Azotowych Puławy S.A. na instalacji produkcji mocznika.

## 2.6. Lokalizacja uszkodzeń

Do lokalizacji uszkodzeń w przypadku instalacji przemysłowych mało przydatne są metody wymagajace danych wzorcowych dla stanów nienormalnych i awaryjnych (do tej klasy metod należa np. sieci neuronowe). Pozyskanie danych uczących dla wszystkich stanów nienormalnych (z uszkodzeniami) jest praktycznie niemożliwe, z drugiej strony groźne uszkodzenia występujące po raz pierwszy powinny być szybko rozpoznane. Największe znaczenie praktyczne w diagnostyce przemysłowych metody procesów maja wykorzystujące wiedzę ekspercka do zaprojektowania relacji symptomy - uszkodzenia. W systemie AMandD relacja ta określana jest na podstawie wiedzy dotyczącej funkcjonowania obiektu, która oprócz projektantów posiadają m.in. technolodzy, automatycy i operatorzy procesu.

Przy diagnozowaniu procesów przemysłowych występuje wiele niepewności, które utrudniają wnioskowanie diagnostyczne. Niepewne sa symptomy uszkodzeń wykrywanych zarówno z zastosowaniem modeli jak też bez wykorzystania modeli. Trudności sprawia określenie wartości progowych, których przekroczenie świadczy o wystapieniu uszkodzenia. Wiedza ekspertów o relacji między uszkodzeniami a zaobserwowanymi symptomami jest często również niepewna. Wszystkie powyższe niepewności powinny być uwzgledniane W wnioskowania. procesie Skutecznym sposobem przetwarzania informacji niepewnej i nieprecyzyjnej jest logika rozmyta. jest stosowana Dlatego Ζ powodzeniem w algorytmach lokalizacji uszkodzeń do oceny wartości residuów oraz wnioskowania diagnostycznego.

Na rys. 10 pokazano ideę rozmytej oceny residuów. Parametry zbiorów rozmytych mogą być ustalane automatycznie na podstawie analizy statystycznych parametrów przebiegu danego residuum w stanie normalnym procesu lub ręcznie przez inżyniera systemu.

W systemie *AMandD* lokalizacja uszkodzeń prowadzona jest na podstawie zbioru bieżących wartości sygnałów diagnostycznych oraz zapisanej w bazie wiedzy relacji między uszkodzeniami oraz symptomami (rys. 11) [1, 2]. Jest to prosty system oparty na regułach zapisywanych w postaci zbliżonej do języka naturalnego.



Rys. 10. Trójwartościowa rozmyta ocena wartości residuum



Rys. 11. Schemat algorytmu wnioskowania w module *iFuzzy-FDI* 

Konfiguracja modułu lokalizacji uszkodzeń sprowadza się do wprowadzenia zbioru takich reguł. Samo wnioskowanie prowadzone jest według metody iDTS (*Industrial – Dynamic Table of States*) stanowiącej połączenie i uogólnienie metod DTS, F-DTS oraz T-DTS [1, 2] opracowanych w Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej.

Metoda iDTS wykorzystuje logikę rozmytą do oceny residuów oraz wnioskowania diagnostycznego. Generowane diagnozy wskazują uszkodzenia wraz ze współczynnikami pewności ich wystąpienia.

Do podstawowych zalet metody iDTS można zaliczyć:

- wykorzystanie logiki rozmytej do wielowartościowej oceny residuów oraz wnioskowania diagnostycznego, co pozwala na uwzględnienie różnego rodzaju niepewności,
- możliwość uwzględnienia opóźnień powstawania symptomów uszkodzeń w celu zwiększenia ich rozróżnialność oraz ograniczenia występowania fałszywych diagnoz,
- realizację wnioskowania szeregowo równoległego, umożliwiającego formułowanie aktualnej diagnozy w każdym kroku wnioskowania,
- wykorzystanie dynamicznie tworzonych wątków diagnostycznych, co powoduje zmniejszenie możliwości wypracowania fałszywych diagnoz oraz umożliwia detekcję i lokalizację uszkodzeń krotnych,
- implementację dwupoziomowej struktury wnioskowania z możliwością wykorzystania dekompozycji obiektu,

- podawanie w wypracowanych diagnozach współczynnika pewności obecności wskazywanych uszkodzeń,
- implementację automatycznej rekonfiguracji systemu wnioskowania w zależności od zbioru dostępnych zmiennych procesowych, wiarygodnych sygnałów diagnostycznych i stwierdzonych wcześniej uszkodzeń.

Lokalizacja uszkodzeń w systemie AMandD prowadzona jest przez moduł iFuzzy-FDI.

## 2.7. Wizualizacja wyników diagnozowania

System *AMandD* jest przygotowany do dwustronnego sprzężenia z systemem automatyki. Oznacza to, że wypracowywane przez niego diagnozy mogą być prezentowane w systemie SCADA lub DCS na synoptykach procesu, wraz z bieżącymi wartościami pomiarów, co pozwala na utworzenie jednolitego środowiska pracy dla operatora.



Rys. 12. Schemat generatora pary z rozpoznanymi uszkodzeniami "wyciek ze zbiornika" lub "uszkodzenie toru pomiarowego L1"

W skład systemu AMandD wchodzi również moduł wizualizacji InView Jego własny podstawowym zadaniem jest prezentacja uszkodzeń synoptycznych na schematach procesu oraz odrębnym oknie diagnoz. schematach w Na synoptycznych rozmieszczone wskaźniki są odpowiadające poszczególnym uszkodzeniom, na których wyświetlana jest wartość wskaźnika pewności istnienia danego uszkodzenia w zakresie 0-1 (rys. 12). Jeśli wartość wskaźnika jest wysoka, to słupek ilustrujący tę wartość ma kolor czerwony. Przy niższych wartościach przyjmuje on kolejno kolor fioletowy, żółty, a przy wartościach bliskich zera ma kolor biały.

Wizualizacja obejmuje ponadto:

- wykresy przebiegów zmiennych procesowych,
- zbiorcze wykresy przebiegów zmiennych procesowych rzeczywistych i modelowanych,
- wykresy przebiegów residuów,
- wskaźniki stanu residuów.

#### 2.8. Wspomaganie decyzji operatorów

Na podstawie diagnoz system może dodatkowo wspomagać decyzje operatorów w stanach nienormalnych i awaryjnych. W fazie projektowania dla wszystkich lub niektórych uszkodzeń systemu moga zostać opracowane strategie postępowania, które w czasie rzeczywistym po rozpoznaniu uszkodzenia wyświetlane są obsłudze razem z diagnozą. Strategie te mają postać dowolnych dokumentów przygotowanych wcześniej przez projektantów systemu, i mogą zawierać zarówno postepowania, schematv algorvtm jak i uszkodzonych urządzeń czy też możliwości rekonfiguracji instalacji.

#### 2.9. Inne zadania systemu

Omówione wcześniej moduły osiągnęły pełną funkcjonalność i mogą być wdrażane w praktyce. Niemniej jednak na nich nie kończą się możliwości samego systemu. Znajduje się on w stanie rozbudowy poprzez dołączanie nowych części realizujących dodatkowe zadania. Aktualnie rozwijane są w systemie *AMandD* moduły do:

- archiwizacja diagnoz,
- przesyłanie alarmów w sieci GSM,
- uzasadnianie diagnoz,
- generacja raportów diagnostycznych.

Ponadto możliwa jest również rozbudowa systemu o dodatkowe, specjalizowane moduły.

## 3. WŁASNOŚCI SYSTEMU AMandD

System *AMandD* jest dostosowany do modelowania i diagnozowania złożonych instalacji technologicznych. Z tego względu ma zaimplementowane mechanizmy pozwalające na rozwiązywanie problemów spotykanych w instalacjach wielkiej skali.

Moduł identyfikacji umożliwia maksymalnie autonomiczną pracę, pozwalając na szybkie uzyskiwanie modeli poszczególnych zmiennych procesowych bez dogłębnej i kosztownej analizy związków między nimi. W przypadku przetwarzania archiwów zawierających ogromne ilości pomiarów nieocenione są mechanizmy kompresji danych uczących dla modelu oraz wbudowane rozproszone środowisko obliczeniowe, znacznie zmniejszające czas potrzebny na identyfikację czy też dostrajanie modelu.

W złożonych instalacjach przemysłowych liczba możliwych uszkodzeń jest bardzo duża. Z tego względu system ma wbudowane mechanizmy dynamicznej i statycznej dekompozycji obiektu. Dla dużych obiektów istnieje możliwość rozdzielenia funkcji diagnostycznych na wiele równolegle pracujących jednostek komputerowych diagnozujących poszczególne części instalacji. W wielu przypadkach celowa jest także dodatkowa dekompozycja części procesu diagnozowanego przez pojedynczy komputer na fragmenty diagnozowane przez odrębne zadania programowe. Zmniejsza to nakłady obliczeniowe i zwiększa niezawodność obliczeń. W trakcie wnioskowania w wydzielonych podsystemach stosowana jest tzw. strategia dynamicznej dekompozycji, której celem jest wyodrębnienie części obiektu z uszkodzeniem już na podstawie pierwszego zaobserwowanego symptomu. Stosowane podejście znacznie ułatwia rozpoznawanie uszkodzeń wielokrotnych (uszkodzeń różnych elementów występujących tym samym czasie). Niezależnie od tego w systemie AMandD zastosowano własny w oryginalny algorytm rozpoznawania uszkodzeń wielokrotnych.

Zastosowane w systemie rozwiązania umożliwiają ponadto:

- stałą rozbudowę w trakcie eksploatacji,
- uwzględnienie niepewności symptomów oraz relacji symptomy-uszkodzenia,
- stosowanie oprócz dwuwartościowej także wielowartościowej oceny residuów, w celu zwiększenia rozróżnialności uszkodzeń,
- prawidłowe wnioskowanie (automatyczna adaptacja) przy zmianach zbioru dostępnych sygnałów pomiarowych,
- możliwość automatycznego dostosowywania do zmian struktury obiektu (wyłączenia lub włączenia zespołów obiektu),
- uwzględnienie dynamiki rozprzestrzeniania się symptomów awarii (różne symptomy spowodowane wystąpieniem tego samego uszkodzenia pojawiają się niejednocześnie nieuwzględnienie tego zjawiska może prowadzić do generowania fałszywych diagnoz).

System *AMandD* wyposażony jest w algorytmy uwzględniające wymienione problemy, dzięki czemu diagnozowanie prowadzone jest efektywnie i skutecznie.

Na podstawie systemu *AMandD* mogą zostać opracowane specjalizowane rozwiązania, przystosowane do diagnozowania określonych klas obiektów, np. kotłów bloków energetycznych, zaworów regulacyjnych w instalacjach itp. Takie rozwiązania mogą w większym stopniu uwzględniać specyfikę obiektu i zapewniać łatwiejszą obsługę.

## 4. KOMUNIKACJA Z SYSTEMAMI AUTOMATYKI

System *AMandD* jest dostosowany do współpracy z różnymi zdecentralizowanymi systemami automatyki (DCS), jak również systemami nadzorowania i monitorowania procesów (SCADA) (rys.13). Dane pomiarowe do systemu diagnostycznego doprowadzane są na drodze transmisji cyfrowej pomiędzy systemem automatyki a systemem *AMandD* z wykorzystaniem standardu OPC lub innych rozwiązań komunikacyjnych.



Rys. 13. Przykłady komunikacja systemu *AMandD* z zewnętrznymi systemami automatyki

#### 5. ROZWIĄZANIA INFORMATYCZNE

System AMandD jest systemem rozproszonym, pracującym na standardowych komputerach PC pod kontrolą MS Windows. W jego skład wchodzi kilka modułów w postaci niezależnych programów bądź też serwisów systemu operacyjnego. Komunikacja między poszczególnymi modułami pracującymi on-line odbywa się przez wymianę komunikatów za pośrednictwem natywnego serwera komunikacyjnego MRIaS lub przy pomocy serwera MOM (Message Oriented Middleware) XML Blaster. Część off-line systemu służy głównie do jego konfiguracji. Jest to zestaw oddzielnych konfiguratorów opartych na koncepcji asystentów znanych z Windows. Całość charakteryzuje się wspólnym, jednolitym interfejsem użytkownika oraz wspólna baza danych konfiguracyjnych.



Rys. 14. Rozproszone środowisko obliczeniowe modułu *MITforRD* 

Oprogramowanie służące do identyfikacji modeli umożliwia bezproblemową pracę z dużymi zbiorami danych, pochodzącymi z archiwów procesowych. Dodatkowo, udostępniane jest samokonfigurujące się rozproszone środowisko obliczeniowe (rys. 14), pozwalające na wykorzystanie wolnych mocy obliczeniowych klasycznych biurowych komputerów klasy PC. Oprogramowanie wykorzystuje technologię wtyczek. Ta cecha wraz z otwartą architekturą oraz zastosowaną metodą komunikacji powoduje, iż system *AMandD* jest elastyczny i łatwy w rozbudowie oraz dostosowywaniu do konkretnych aplikacji.

#### 6. PILOTOWE APLIKACJE

System AMandD został pilotowo wdrożony do diagnozowania części instalacji IDR w zakładzie produkcji mocznika w Zakładach Azotowych Puławy. W reaktorze R-R1 diagnozowane były tory pomiarowe temperatury mediów wpływających i wypływających z reaktora pomiary temperatury w samym reaktorze. W kondensatorach E-E3 i E-E4 diagnozowane przetworniki były przepływu kondensatu parowego oraz zespoły wykonawcze. Testy przeprowadzono w lutym 2004 roku. Ich celem było sprawdzenie poprawności działania systemu oraz jego współpracy z systemem automatyki instalacji technologicznej IDR. Modele części procesu zostały opracowane na podstawie archiwalnych zmiennych procesowych zawierający zapis pracy instalacji technologicznej w stanie pełnej zdatności.



Rys. 15. Widok głównej synoptyki systemu diagnostycznego w Cukrowni Lublin

Prawidłowe działanie systemu zostało potwierdzone także podczas badań przeprowadzonych w laboratorium Uniwersytetu w Lille. System został wdrożony do diagnozowania instalacji generatora pary. Na rys. 12 widoczna jest wizualizacja uszkodzeń na schemacie instalacji.

W 2004 roku badania systemu były prowadzone również w cukrowni LUBLIN (rys. 15).

#### 7. PODSUMOWANIE

Dokładne i szybko uzyskane diagnozy stwarzają możliwość przeprowadzenia niezbednych akcji zabezpieczających. Systemy diagnostyczne stanowią zatem wraz z działaniami zabezpieczającymi drugi, wyższy poziom systemu zabezpieczeń procesu, klasyczne podczas gdy układy blokad technologicznych standardowych układów i zabezpieczeń stanowią pierwszy, niższy poziom systemu zabezpieczeń procesu. Wyższa warstwa zabezpieczeń procesu, dzięki dokładnej i szybko osiąganej informacji diagnostycznej, daje możliwość redukcji lub eliminacji konsekwencji uszkodzeń (przebieg procesu oznaczony linią przerywaną na rys. 16).



Rys. 16. Przebiegi procesu w systemie bez diagnostyki i z diagnostyką

Umożliwia to uniknięcie zadziałania niższego poziomu zabezpieczeń, co w wielu przypadkach jest przyczyną zatrzymania przebiegu procesu lub niepotrzebnego ograniczenia jego wydajności.

Efektem zastosowania systemu diagnostycznego *AMandD* powinno być:

- zwiększenie bezpieczeństwa procesu dzięki szybkiej i dokładnej informacji o pojawiających się uszkodzeniach,
- zmniejszenie zagrożeń dla środowiska naturalnego,
- ograniczenie strat w stanach awaryjnych,
- ograniczenie kosztów obsługi remontowej
- eliminacja przeciążenia informacyjnego operatorów,
- zwiększenie pewności informacji w systemie automatyki (eliminacja błędów w wyliczanych wskaźnikach technicznych i ekonomicznych, bilansach itp. dzięki rozpoznawaniu uszkodzeń torów pomiarowych).

Zastosowanie systemu pozwala na realizacje szeregu dodatkowych funkcji, jak przykładowo wirtualne sensory i analizatory czy też możliwość stworzenia symulatora procesu. Dzięki swojej elastyczności i łatwej rozbudowie z jednej strony, i szerokiej gamie algorytmów optymalizacyjnych, komunikacyjnych i wbudowanym mechanizmom charakterystycznym dla systemów eksperckich z drugiej, istnieje także możliwość łatwej implementacji przy jego pomocy szeregu zadań z dziedziny optymalizacji czy zarządzania procesem.

## LITERATURA

- [1] Korbicz, J., Kościelny J. M., Kowalczuk Z. and Cholewa W. (2004). Fault Diagnosis: Models, artificial intelligence methods, applications. Springer.
- Kościelny J. M. (2001). Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych. Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa.



Prof. dr hab. inż Jan Maciej KOŚCIELNY, zatrudniony Automatyki w Instytucie Politechniki Robotyki Warszawskiej. Zajmuje się problemami diagnostyki procesów przemysłowych, а szczególnie metodami detekcji lokalizacji i uszkodzeń przeznaczonymi

dla złożonych instalacji technologicznych oraz systemami diagnostycznymi. Autor ponad 180 publikacji naukowych. Kierował ponad 60 pracami badawczymi, w wyniku których m.in. opracowano i wdrożono w przemyśle systemy monitorowania i diagnostyki procesów. Jest członkiem International Editorial Board czasopisma naukowego International Journal of Applied Mathematics and Computer Science oraz redaktorem działowym czasopisma Pomiary-Automatyka-Kontrola.



Dr inż. Michał SYFERT od 2004 zatrudniony w Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej na stanowisku adiunkta. Prowadzone przez niego prace badawcze dotyczą głównie problemów projektowania algorytmów detekcji i lokalizacji uszkodzeń dla złożonych

i niepewnych systemów technicznych. Autor lub współautor 7 rozdziałów w monografiach oraz 44 artykułów (w tym 9 w czasopismach). Uczestnik trzech projektów badawczych Unii Europejskiej prowadzonych w zakresie diagnostyki elementów wykonawczych oraz procesów przemysłowych. Jeden z głównych autorów dwóch systemów diagnostycznych dla procesów przemysłowych: systemu DIAG i AMandD.



Dr inż. Paweł WNUK od 2005 zatrudniony roku Instytucie Automatyki W Robotyki Politechniki i Warszawskiej na stanowisku adiunkta. W pracy badawczej zajmuje się głównie identyfikacja modeli nieliniowych obiektów dynamicznych różnych

typów, ze szczególnym uwzględnieniem modeli rozmytych. Główny projektant i wykonawca oprogramowania identyfikacyjnego MITforRD, współautor systemu AMandD. Autor badź współautor 22 publikacji w czasopismach naukowotechnicznych oraz na konferencjach. Interesuje się programowaniem rozproszonym, technikami sztucznej inteligencji, ruchem wolnego oprogramowania, fantastyką, amatorsko uprawia narciarstwo, tenis i squash.

# OCENA WSPÓŁPRACY TENSOMETRYCZNYCH PRZETWORNIKÓW SIŁY STOSOWANYCH W SYSTEMACH WAŻENIA

Piotr BASZUN, Henryk KRÓL

Wojskowa Akademia Techniczna Wydział Elektroniki Instytut Systemów Elektronicznych ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa; fax: 022-683-91-25; e-mail: pbaszun@wat.edu.pl, hkrol@wat.edu.pl

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono niektóre zagadnienia związane z wyborem oraz analizą połączeń tensometrycznych przetworników siły wykorzystywanych w systemach pomiaru masy. Analiza dotyczy impedancyjnego równania macierzowego przetwornika (czwórnika), macierzy hybrydowych odwróconych oraz nieokreślonych admitancyjnych macierzy układów wielokońcówkowych. Podano przykładowe wyniki badań laboratoryjnych współpracy dwóch pełnomostkowych przetworników siły.

Słowa kluczowe: tensometryczny przetwornik siły, macierz admitancyjna, czwórnik.

# EVALUATION OF COOPERATION MULTIPLE STRAIN GANGE FORCE SENSORS IN LOAD MEASUREMENT SYSTEMS

#### Summary

There are presented some topics connected with choosing and analysis of different connections of the strain gauge force matrix. Those sensors are used in mass measurement systems. The analysis was concerned with matrix eguation of the sensor (four-terminal network) reverse hybrid matrix and undetermined admittance matrix of multi-terminal networks. As an example results of laboratory experiments two full-bridge force sensors are presented.

Keywords: strain gauge sensor, admittance matrix, four-terminal network.

#### 1. WSTĘP

Tensometryczne przetworniki siły są szeroko stosowane w nowoczesnych elektromechanicznych systemach ważenia, np. taśmociągowych lub pomostowych wagach samochodowych oraz kolejowych.

Powszechnie stosowane niezrównoważone mostki tensometryczne zasilane prądem stałym, umożliwiające proste i szybkie zerowanie układu oraz uzyskanie małego błędu nieliniowości mogą współpracować z udoskonalonymi wysokostabilnymi wzmacniaczami prądu stałego opartymi o technologie układów scalonych (bardzo dobra liniowość i stałość wzmocnienia). Dzieki właśnie temu jesteśmy świadkami szybkiego rozwoju konstrukcji tensometrycznej aparatury pomiarowej zasilanej pradem stałym (np. firmy SCHENK) wykorzystującej układy z tzw. pełną kompensacją mostków tensometrycznych.

Rodzaje konstrukcji oraz podstawowe parametry metrologiczne i właściwości tensometrycznych przetworników siły podane są np. w  $[3, 4, 7 \div 9]$ .

Jednym z podstawowych zadań przy pomiarze masy z wykorzystaniem tensometrycznych przetworników pomiarowych siły jest dobór i stabilizacja układów zasilających oraz wybór rodzajów połączeń współpracujących ze sobą wyżej wymienionych przetworników. Artykuł dotyczy tylko niektórych z tym związanych zagadnień. Istotną jego część stanowi analiza możliwości współpracy pełnomostkowych przetworników tensome-trycznych siły pod kątem wykorzystania ich w systemach pomiaru masy.

### 2. ANALIZA MACIERZOWA PEŁNOMOSTKOWEGO TENSOMETRYCZNEGO PRZETWORNIKA SIŁY

Tensometryczny przetwornik siły może być przedstawiony w postaci pasywnego czwórnika – mostka prądu stałego (rys. 1), do zacisków wejściowych którego podłączone jest źródło zasilania w postaci siły elektromotorycznej E o rezystancji wewnętrznej  $R_w$ , a do zacisków wyjściowych obciążenie, którym jest rezystancja wejściowa  $R_0$  przyrządu pomiarowego (wskaźnika równowagi).



Rys. 1. Mostek tensometryczny jako czwórnik pasywny

Analizując równanie macierzowe impedancyjne czwórnika oraz przyjmując oznaczenie na względną zmianę rezystancji tensometru

$$\rho = \frac{\Delta R}{R} \tag{2.1}$$

po wprowadzeniu zależności

$$k = \frac{R_0}{R} \tag{2.2}$$

wyrażenie na transmitancję napięciową mostka (względną wartość napięcia wyjściowego) przyjmuje postać:

$$K_{U} = \frac{U_{2}}{U_{1}} = \frac{k\rho}{k+1-\rho^{2}}$$
(2.3)

Równanie (2.3) jest podstawą do analizy problemu nieliniowości charakterystyki statycznej przetwornika  $\frac{U_2}{U_1}(\rho)$  przy k = const i U<sub>1</sub> = const.

W praktyce podstawowe znaczenie ma dla nas charakterystyka dla przypadku gdy  $\rho \in (0.005)$ . Jest to typowy zakres roboczy tensometrycznego przetwornika siły. Dla analizowanego układu mostkowego parametr  $\rho$  można także wyrazić w funkcji wydłużenia jednostkowego  $\varepsilon$ powstającego w elemencie sprężystym przetwornika, gdyż:

$$\frac{\Delta R}{R} = \rho = k_t \,\varepsilon \tag{2.4}$$

gdzie:

 $k_t$  – stała czułości odkształceniowej tensometru (dla tensometrów metalowych  $k_t \approx 2$ ),

$$\varepsilon$$
 - wydłużenie jednostkowe ( $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ )

l – długość tensometru,

Δl – przyrost długości tensometru.

W przypadku pomiaru większych odkształceń względnych np.  $\varepsilon > 1 \%_{00}$  lub istnienia wymagań szczególnej dokładności przetwarzania liniowego należy zawsze uwzględniać występującą nieliniowość mostka.

Błąd względny nieliniowości  $\delta_n^{\%}$  wyrażony w procentach dla danego rozstrojenia rezystancji ramion  $\rho$  można wyrazić zależnością

$$\delta_n^{\%} = \frac{K_U - K_U}{K_U} 100\%$$
(2.5)

gdzie:

 $K_{\rm U}$  – rzeczywista transmitancja napięciowa (2.3),

K'<sub>U</sub> – transmitancja napięciowa dla bardzo małych przyrostów rezystancji tensometrów ( $K'_U = \frac{\Delta R}{R}$ ).

Korzystając z zależności (2.3) można określić także czułość przetwornika, jako:

$$S_U = \frac{d(\frac{U_2}{U_1})}{d\rho} \quad \text{przy } \mathbf{k} = \text{const}$$
(2.6)

Wynosi ona:

$$S_U = k \frac{k+1+\rho^2}{(k+1-\rho^2)^2}$$
(2.7)

Na przykład dla k = 0,  $S_U$ = 0, a przy k =  $\infty$ ,  $S_U$ = 1.

#### 3. RODZAJE POŁĄCZEŃ UKŁADÓW POMIAROWYCH TENSOMETRYCZNYCH PRZETWORNIKÓW SIŁY

W zależności od sposobu połączenia między sobą przetworników wchodzących w skład jednego układu (systemu pomiarowego) rozróżnia się następujące rodzaje współpracy:

- połączenie przetworników równolegleszeregowe (rys. 2a),
- połączenie przetworników równoleglerównoległe (rys. 2b),
- układ połączeń dwóch przetworników o niezależnym zasilaniu (rys. 3).



Rys. 2. Schematy połączeń dwóch współpracujących przetworników



Rys. 3. Układ połączeń dwóch przetworników o niezależnym zasilaniu

Przy połączeniu równolegle-równoległym napięcie wyjściowe zgodnie z metodą napięć międzywęzłowych ulega n-krotnemu zmniejszeniu (n – liczba przetworników) przy rezystancji obciążenia układu  $R_0 = \infty$ .

W przypadku połączenia równolegleszeregowego przetworników, ich napięcia wyjściowe nie sumują się. Okazuje się, że na skutek niespełnienia warunku regularności [2] nie można stosować metod analizy macierzowej czwórników.

W konkretnym przypadku nie można sumować macierzy hybrydowej odwróconej obu mostków (rozpatrywanych w postaci czwórnikowej). W tym przypadku można stosować analizę układów wielokońcówkowych w oparciu o nieokreśloną macierz admitancyjną [2, 5, 6]. Warunek regularności spełniony będzie w przypadku niezależnego zasilania układów połączeń mostków (rys. 3).

### 3.1. ANALIZA UKŁADU POŁĄCZEŃ DWÓCH PRZETWORNIKÓW TENSOMETRYCZNYCH O NIEZALEŻNYM ZASILANIU NAPIĘCIOWYM

Po wyznaczeniu parametrów hybrydowych odwróconych czwórnika zastępczego

$$[g] = [g'] + [g''] \tag{3.1}$$

i uwzględnieniu zależności (2.2) ostateczne wyrażenie na transmitancję układu przyjmuje postać

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{1 + \frac{1}{k}(2 - \rho_1^2 - \rho_2^2)}$$
(3.2)

#### 3.2. ANALIZA POŁĄCZEŃ UKŁADU RÓWNOLEGŁO-SZEREGOWEGO Z WYKORZYSTANIEM MACIERZY ADMITANCYJNYCH NIEOKREŚLONYCH

#### 3.2.1. Układ dwóch przetworników

Chcąc dokonać analizy wielobiegunnika powstałego przez połączenie przetworników A oraz B (rys. 4) z wykorzystaniem nieokreślonych macierzy admitancyjnych należy w pierwszym etapie dostosować rząd każdego z przetworników (4-ro biegunników) składowych tak, aby był on zgodny z rzędem wynikowego wielobiegunnika, powstałego z ich wzajemnego połączenia. Technicznie operacja ta jest przedstawiona na rys. 4, gdzie do każdego z czterech biegunników nastąpiło dołączenie dodatkowego "ślepego" zacisku (dla przetwornika A jest to zacisk 5 o prądzie I<sub>3</sub> = 0) tzn. zacisku galwanicznie izolowanego.

Na rys. 4 admitancje  $y_a \div y_j$  wynoszą:

$$y_a = y_c = \frac{1}{R + \Delta R_1} = \frac{Y}{1 + \rho_1},$$
gdzie

$$Y_{b} = y_{d} = \frac{Y}{1 - \rho_{1}}$$

$$y_{f} = y_{h} = \frac{Y}{1 + \rho_{2}}$$

$$y_{g} = y_{j} = \frac{Y}{1 - \rho_{2}}$$

$$(3.3)$$



Rys. 4. Mostki A i B po rozszerzeniu rzędu biegunów

Zasady badań wielobiegunników podane w [2] wykorzystano w [1] do analizy macierzy admitancyjnej nieokreślonej wielobiegunnika zastępczego. Efektem końcowym tego opracowania było uzyskanie zależności na transmitancję

$$\frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2 + \frac{1}{k}(2 - \rho_1^2 - \rho_2^2)}$$
(3.4)

Porównując wzory (3.4) i (3.2) przy  $R_0 = \infty$ i  $U_{we} = \text{const.}$  dla  $\rho_1 \neq 0$  i  $\rho_2 \neq 0$  potwierdzamy fakt dwukrotnego zmniejszenia napięcia wyjściowego przy jednym wspólnym źródle zasilania.

#### 3.2.2. Układ czterech przetworników

Do analizy przyjęto cztery tensometryczne przetworniki siły pokazane na rysunku 5.

Przeprowadzono analizę macierzy admitancyjnej nieokreślonej wielobiegunnika zastępczego według zasad podanych w [2]. W jej wyniku uzyskano zależność na transmitancję napięciową w postaci

$$\frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{\rho_1 + \rho_4}{2 + \frac{1}{k}(2 - \rho_1^2 - \rho_4^2)}$$
(3.5)

Wzory (3.4) i (3.5) są do siebie bardzo zbliżone, różnią się tylko odmiennymi indeksami przy drugiej uwzględnianej we wzorach wartości względnej zmiany rezystancji p.





#### 3.2.3. Układ trzech przetworników

Przy doborze 3 współpracujących czwórników uwzględniamy trzy pierwsze mostki z rys. 5. pamiętając, że w analizie nie bierzemy pod uwagę 7-ego "ślepego" zacisku. Postępując jak w p. 3.2.2. określono transmitancję napięciową wielobiegunnika zastępczego w postaci:

$$\frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{\rho_1 + \rho_3}{2 + \frac{1}{k}(2 - \rho_1^2 - \rho_3^2)}$$
(3.6)

Przeprowadzona analiza dla trzech oraz czterech mostków tensometrycznych połączonych w układzie równolegle-szeregowym w oparciu o macierze admitancyjne nieokreślone (w analogiczny sposób jak dla dwóch mostków tensometrycznych) pozwala uogólnić równanie (3.4) dla n przetworników

$$\frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{\rho_1 + \rho_n}{2 + \frac{1}{k}(2 - \rho_1^2 - \rho_n^2)}$$
(3.7)

## 4. BADANIA LABORATORYJNE WSPÓŁPRACY MOSTKÓW TENSOMERTRYCZYCH

Dokonano badań laboratoryjnych współpracy dwóch pełnomostkowych przetworników tensometrycznych siły typu Z6A o zakresie nominalnym 200N, klasie 0,04% firmy Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, zasilanych napięciem  $U_Z = 10V$ , o czułości napięciowej 2 mV/V.

Wykorzystano program napisany w języku programowania obiektowego Delphi służący do przystępnej wizualizacji wyników uzyskanych w trakcie współpracy przetworników pomiarowych, a otrzymanych w oparciu o zastosowanie wyprowadzonych wzorów (3.2) oraz (3.4).

Przykładowe wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 6. i 7.



Rys. 6. Charakterystyki U<sub>wy</sub>(F<sub>1</sub>; F<sub>2</sub>) układu dwóch tensometrycznych przetworników siły przy zasilaniu napięciowym równoległym (jedno źródło) i wyjściu napięciowym szeregowym





## **5. PODSUMOWANIE**

Na podstawie przeprowadzonych rozważań teoretycznych oraz potwierdzających je badań laboratoryjnych można stwierdzić, że:

- 1. Analiza macierzowa pełnomostkowego przetwornika siły pozwoliła na określenie jego podstawowych parametrów (czułość, nieliniowość itp.) oraz ustalenie zakresu ich zmienności gwarantujących przykładową liniowość układu przy  $\rho \in (0 \div 0,005)$ .
- 2. W przypadku niezależnego zasilania układu dwóch współpracujących mostków i wyjściu warunek regularności szeregowym, połączenia [2] jest zachowany. Można stosować tu metodę analizy macierzowej czwórników i sumować macierze hybrydowe przetworników odwrócone obu (n) (rozpatrywanych w postaci czwórnikowej). pomiarów Potwierdzaja wyniki to przedstawione na rys. 7.
- 3. Przy współpracy dwóch (lub n) mostków zasilanych ze wspólnego źródła napięciowego nie można stosować metod analizy czwórnikowej ze względu na niespełnienie warunku regularności. Zalecana jest wtedy analiza w postaci nieokreślonych admitancyjnych macierzy układów wielokońcówkowych.
- Równoległe zasilanie n przetworników tensometrycznych powoduje n-krotne zmniejszenie sygnału na zrównoleglonym wyjściu układu przy R<sub>0</sub> = ∞, w stosunku do sygnału jednego przetwornika (metoda napięć międzywęzłowych).

5. W przypadku połączeń równolegleszeregowym dwóch przetworników, stwierdzamy fakt zmniejszenia dwukrotnego napięcia wyjściowego w stosunku do przypadku niezależnego zasilania obu przetworników – wzór (3.4) i rys. 6. (przy R<sub>0</sub>

 $=\infty$  i U<sub>we</sub> = const,  $\rho_1 \neq 0$  i  $\rho_2 \neq 0$ ).

6. Niezależnie od liczby współpracujących ze sobą, zasilanych ze wspólnego źródła napięciowego w układzie równolegleszeregowym pełnomostkowych tensometrycznych przetworników siły wyjściowy sygnał z tego układu, będzie zależał jedynie od zmian p dwóch przyległych, skrajnie od siebie oddalonych, mostków. Uzasadnia to przeprowadzona powyżej (pkt. 3.2.) analiza teoretyczna, która podstawie na wyprowadzonych tam zależności analitycznych dla układu dwóch, trzech oraz i czterech mostków niektórych weryfikujących je badań laboratoryjnych (pkt. 4.) pozwala przeprowadzone rozważania uogólnić na układ współpracujących ze sobą n przetworników (3.7). Z tego powodu układy składające się z trzech i większej równolegle-szeregowo połaczonych pełnomostkowych przetworników zasilanych ze wspólnego źródła napięciowego, z praktycznego punktu widzenia nie kwalifikują się do pomiaru masy.

## LITERATURA

- Baszun P., Senatorski M.: The analysis of the metrological features of the measuring bridge systems of tensometr trausducers. 4– th International Congress and Exhibition, Delhi, Nov. 21 ÷ 23, 1990.
- [2] Mitra S. K.: Analysis and synthesis of linear active networks. 1969 by Wiley & Sons, Inc., New York.
- [3] Chwaleba A., Czajewski J.: Przetworniki pomiarowe i defektoskopowe. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998.
- [4] Szumielewicz B. i in.: *Pomiary elektroniczne w technice*. WNT, Warszawa 1982.
- [5] Osiowski J., Szabatin J.: *Podstawy teorii* obwodów. T. III. WNT, Warszawa 2006.
- [6] Osowski S., Siwek K., Śmiałek M. : Teoria obwodów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
- [7] Firma CompArt Automation. Przetworniki siły do wag elektronicznych pracujące na zasadzie mostka tensometrycznego. Dostępne w wielu wykonaniach przeznaczone do różnego rodzaju wag (szalkowe, platformowe, wiszące, samochodowe itd.).
- [8] Warsza L. Z.: Immitancyjne układy czterobiegunowe w pomiarach wieloparametrowych. PIAiP, Warszawa 2004.
- [9] Zakrzewski J.: *Czujniki i przetworniki pomiarowe.* Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004.



Dr inż. **Piotr BASZUN** jest wieloletnim nauczycielem akademickim Instytutu Systemów Elektronicznych WAT. Bierze aktywny udział w pracach badawczych Zakładu. Jest autorem lub współautorem kilkudziesięciu artykułów i referatów w czasopismach oraz na konferencjach krajowych i zagranicznych.



Dr inż. **Henryk KRÓL** jest absolwentem Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej oraz Akademii Obrony Narodowej. Jego zainteresowania zawodowe koncentrują się wokół metod oceny systemów, a obecnie w szczególności systemów informacyjno-pomiarowych.

# OCENA STABILNOŚCI ZAMOCOWANIA SZTUCZNEJ PANEWKI STAWU BIODROWEGO

Janusz PŁOMIŃSKI<sup>3</sup>, Zbigniew WATRAL<sup>1</sup>, Andrzej MICHALSKI<sup>1,2</sup>, Jan SIENKIEWICZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, <u>zwatral@wel.wat.edu.pl</u>

<sup>2</sup> Politechnika Warszawska, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno Pomiarowych <sup>3</sup> Wojskowy Instytut Medyczny, Klinika Ortopedii

#### Streszczenie

W referacie przedstawiono problematykę stabilności zamocowania panewki sztucznego stawu biodrowego po zabiegu rewizyjnym. Wykonano badania eksperymentalne na modelach cielęcego stawu biodrowego z zacementowaną na warstwie ubitych przeszczepów kostnych panewką polietylenową. Po zacementowaniu panewki obciążano ją siłą 1kN przez 100000 cykli a następnie sprawdzano jej stabilność przykładając na jej krawędź siłę ścinającą. Badano wpływ grubości warstwy przeszczepów oraz kierunku działania siły obciążającej na stabilność panewki.

Słowa kluczowe: protezoplastyka rewizyjna stawu biodrowego, przeszczepy kostne, panewka stawu biodrowego.

## FIXING STABILITY ASSESMENT OF ARTIFICIAL ACETABULUM OF A HIP JOINT

#### Summary

The paper deals with the problem of stability of artificial acetabulum after revision hip arthroplasty. Experimental tests on calf joint with artificial acetabulum cemented into it were performed. Cemented acetabulum was subjected to a cyclic load of 1 kN through 100000 cycles and then the fixing stability was verified by applying a shearing force to its edge. The influence of thickness of bone grafts layer and the direction of loading force on the overall stability was investigated.

Keywords: revision hip arthroplasty, bone grafts, acetabulum of a hip joint.

#### 1. WPROWADZENIE DO PROBLEMATYKI PROTEZOPLASTYKI STAWU BIODROWEGO

Byłoby dobrze gdyby wszczepienie sztucznego stawu biodrowego rozwiązywało problem raz na zawsze. Niestety, często zachodzi potrzeba wykonania powtórnego zabiegu, który nazywany jest zabiegiem rewizyjnym.

Protezoplastyka rewizyjna to wymiana jednego lub obu obluzowanych bądź uszkodzonych elementów protezy stawu biodrowego. W 75% przypadków wskazaniem do protezoplastyki rewizyjnej jest utrata stabilności mechanicznej elementów protezy stawu. Pozostałe przypadki wymagają operacji rewizyjnych na przykład z powodu zwichnięcia protezy, złamania trzpienia, złamania okołoprotezowego lub zakażeń. Liczba protezoplastyk rewizyjnych znacznie zwiększa się i w różnych ośrodkach waha się miedzy 10 a 20% liczby protezoplastyk pierwotnych.

Zabiegi protezoplastyki rewizyjnej wymagają zastosowania odpowiedniej techniki operacyjnej. Wiąże się to z wykorzystaniem specjalistycznego instrumentarium do zabiegów rewizyjnych. Rozległość obluzowania i wielkość uszkodzenia loży kostnej jest najważniejszym czynnikiem wpływającym na wynik zabiegu rewizyjnego. Wczesne wyniki protezoplastyk rewizyjnych są zachęcające. Z czasem wyniki pogarszają się, zmniejszając średni czas przeżycia protezy. Zaobserwowano 32% zakażeń pooperacyjnych po zabiegach rewizyjnych aseptycznych obluzowań stawu biodrowego. Kavanagh i wsp. [1] zanotowali 20% obluzowań panewek. Pellici i wsp. [2] po 8 latach od zabiegu stwierdzili 29% złych wyników.

Na podstawie badań doświadczalnych protezoplastyk rewizyjnych na zwłokach Dohmae i wsp. [3] stwierdzili osłabienie stabilizacji panewki w porównaniu z protezoplastyką pierwotną o 80%,

a w przypadku ponownej rewizji o 93%.

Przyczyn tego stanu rzeczy szuka się głównie w reakcjach immunologicznych i braku przebudowy przeszczepów. Upatruje się je również z w wadach materiałów użytych do produkcji protez, nadmiernym ścieraniu elementów polietylenowych, złej stabilizacji pierwotnej na cemencie kostnym czy wreszcie w nieprawidłowej technice operacyjnej. W większości przypadków to jednak sztuczna panewka ulega wcześniejszemu obluzowaniu niż trzpień endoprotezy.

Lekarze przeprowadzający tego typu zabiegi sugerują, że dla prawidłowego prowadzenia pooperacyjnego konieczna jest wiedza o pierwotnym zamocowaniu panewki. Właśnie we wczesnym okresie pooperacyjnym dochodzi do przemieszczania panewki (osiadania na przeszczepach) pierwszych objawów i jej obluzowania. Wzrastająca liczba niepowodzeń po protezoplastyce stawu biodrowego skłania wiele ośrodków do szukania ich przyczyn.

Stabilne osadzenie implantu jest, głównym celem tej techniki operacyjnej i stanowi pierwotny warunek do przyszłej przebudowy przeszczepów [4] zaś według Kärrholma [5] pierwotnie najważniejsza jest sztywność ubitych przeszczepów. W czasie obserwacji klinicznych wykonywanych zabiegów stwierdzono związek między zjawiskiem ubijania przeszczepów a ich gęstością i stopniem ich twardości. Ścisłe relacje między tymi zjawiskami nie zostały jednak do końca poznane i opisane.

W Polsce wykonywanych jest rocznie około 12 tvs. pierwotnych protezoplastyk stawu biodrowego (brak dokładnych danych), przy liczbie oczekujących sięgającej 30 tys. chorych rocznie Specjalisty Krajowego ds. (dane Ortopedii i Traumatologii). Liczba wykonywanych tego typu operacji z roku na rok znacząco rośnie. Wzrost liczby wykonywanych protezoplastyk sztucznego stawu biodrowego wpłynął na rozwój używanych wszczepów oraz zwiększył liczbę stosowanych typów protez do 300 rodzajów. Żadna ze stosowanych dotychczas endoprotez nie zapewnia jednak 100% dobrego wyniku odległego w czasie. Za dobre i bardzo dobre wyniki pierwotnych protezoplastyk stawu biodrowego przyjmuje się, co najmniej 15 letni okres "przeżycia wszczepu".

Leczenie operacyjne choroby zwyrodnieniowej stawu biodrowego ma na celu odtworzenie prawidłowej biomechaniki stawu. Nieprawidłowe położenie osi obrotu oraz zaburzenie zborności sztucznego stawu nieuchronnie prowadza do niepowodzenia, jakim jest obluzowanie elementów protezy. Już po 20 latach liczba obluzowań elementów protezy sięga około 30%. Rosnąca liczba pierwotnych protezoplastyk pociąga za sobą wzrost protezoplastyk liczby rewizyjnych stawu Zabieg operacyjny biodrowego. powtórnego (rewizyjnego) wszczepienia endoprotezy z punktu widzenia operatora jest o wiele trudniejszy i droższy niż zabieg protezoplastyki pierwotnej. Koszt protezoplastyki pierwotnej to średnio około 7000 złotych natomiast rewizyjnej około 24000 złotych. Składa się na to zarówno cena potrzebnych implantów (specjalne wszczepy panewkowe, trzpienie, siatki stropowe i denne oraz udowe, przeszczepy kostne), drogie koszyczki, instrumentarium oraz koszty zabiegu operacyjnego z przedłużonym pobytem chorego w szpitalu i długotrwała rehabilitacja.

Obecnie najbardziej rozpowszechnioną metodą protezoplastyki rewizyjnej z użyciem przeszczepów

kości jest operacja według R. Linga i T. J. J. Sloofa [6, 7, 8, 9]. Po usunięciu zniszczonej panewki polietylenowej, tkanek martwiczych i zapalnych usuwa się dokładnie cement kostny. Ubytki w dnie panewki wypełnia się przeszczepami litymi korowogąbczastymi z talerza biodrowego lub warstwowo położonymi przeszczepami rozdrobnionymi kości dennymi gabczastej, siatkami i ponownie przeszczepami rozdrobnionymi. Lożę dla panewki modeluje się przez ubijanie pobijakami, o określonej wielkości, dla ponownie cementowanej panewki. Wytrzymałość uzyskiwanej loży kostnej w panewce jest trudna do oceny. Niejednokrotnie podczas obserwuje ubijania przeszczepów się przemieszczanie ubijaka do wnętrza miednicy. Uzyskanie, zatem dobrej stabilizacji panewki uzależnione jest od kilku elementów. Po pierwsze od pierwotnego łoża kostnego, a w drugiej kolejności od wtórnej loży uzyskanej poprzez ubijane przeszczepy. Ważne jest także prawidłowe panewki zacementowanie w miejscu odpowiadającemu jej pierwotnemu położeniu. Określenie jednak jej anatomicznego położenia w sytuacji ubytków segmentarnych jest bardzo trudne.

O wadze problemu, jakim jest protezoplastyka stawu biodrowego świadczy ogromna liczba publikacji z tego zakresu. Najczęściej opisuje ona badania na modelach dotyczących stabilizacji trzpienia protezy w kości udowej. Niewiele jest natomiast doniesień na temat badania stabilności panewki stawu biodrowego. W wiekszości przypadków to jednak ona ulega wcześniejszemu obluzowaniu niż trzpień endoprotezy. Na stabilność długoczasową sztucznego stawu biodrowego, oprócz dokładności ustawienia parametrów geometrycznych tego stawu, ma również wpływ zastapienie współpracujących elementów sprężystych (głowa kości udowej - naturalna panewka miednicy) elementami sztywnymi endoprotezy (głowa trzpienia - sztuczna panewka - cement). Ważny wpływ na prace endoprotezy ma również naruszenie trakcie operacji systemu przyczepów w mięśniowych i wiązadeł oraz brak możliwości ich odtworzenia.

# 2. CEL BADAŃ

Zasadniczym celem badań jest identyfikacja czynników wpływających na stabilność panewki w protezoplastykach rewizyjnych stawu biodrowego w celu zwiększenia trwałości i przedłużenia czasu pracy protezy. Badania eksperymentalne umożliwią określenie czynników wpływających na stabilizację panewki w loży cementowej i przeszczepach kości zamrożonej oraz stwierdzenie, które z nich mają decydujący wpływ na zmianę zborności sztucznego stawu (wielkość i kierunek działającej siły, grubość warstwy przeszczepów). Ma to istotne znaczenie zwłaszcza w czasie rehabilitacji we wczesnym okresie pooperacyjnym. Początkowy okres po operacji to ochrona układu panewka–cement–przeszczepy–kość w taki sposób, aby następował niezaburzony proces wgajania przeszczepów dających w przyszłości biologiczną stabilność panewki. Z drugiej zaś strony zgodnie z prawem Wolffa obciążanie stawu sprzyja procesowi przebudowy i remodelingu przeszczepów.

Dla realizacji tak postawionego celu opracowano metodę i narzędzia pomiarowe do badania stabilności panewki sztucznego stawu biodrowego, mocowanej podczas protezoplastyki rewizyjnej, na podłożu z zamrożonych przeszczepów kostnych.

Wobec znacznych kosztów pierwotnej, a szczególnie rewizyjnej, protezoplastyki stawu biodrowego szukanie sposobów na przedłużenie prawidłowego funkcjonowania endoprotezy może być źródłem oszczędności finansowych.

#### 3. STANOWISKO I METODYKA BADAŃ

Do prowadzenia badań wytrzymałościowych i zmęczeniowych wykorzystano stanowisko bazujące na maszynie INSTRON 8501PLUS (rys. 1). Maszyna ta umożliwia wykonywanie badań statycznych oraz dynamicznych z oddziaływaniem na badane próbki (elementy) siłami rozciągającymi i/lub ściskającymi o maksymalnej wartości ± 100 kN i prędkości przesuwu tłoka 0÷50 mm/s.

Maszyna może być wykorzystywana w trzech opcjach sterowania: położeniem (przesuwem tłoka siłownika), obciążeniem (wartością siły działającej na badaną próbkę) oraz odkształceniem (wartością odkształcenia badanej próbki).



Rys. 1. Widok maszyny wytrzymałościowej Instron 8501

W belce górnej zamocowana jest na stałe głowica pomiaru siły o zakresie pomiarowym  $\pm 100$  kN. W przypadku prowadzenia badań o obciążeniu poniżej 5 kN do głowicy jest dopinana mniejsza głowica o zakresie obciażenia  $\pm 5$  kN.

Stanowisko umożliwia zadawanie obciążeń statycznych lub dynamicznych o różnym kształcie stosując kontrolę procesu za pomocą pomiaru siły bądź pomiaru przemieszczenia. Dokładność pomiaru siły obciążającej wynosi 0,5% zakresu pomiarowego głowicy tensometrycznej, natomiast przemieszczenie można mierzyć z dokładnością 0,01mm.

Na omawianym stanowisku prowadzono badania wytrzymałościowe i zmęczeniowe na modelach panewki stawu biodrowego z wszczepioną sztuczną panewką polietylenową.

Dotychczasowe badania w tej dziedzinie, opisywane w literaturze światowej, ukierunkowane były zwykle na poznanie własności ubijanych przeszczepów kostnych w zależności od rodzaju i wielkości przeszczepów oraz siły i czasu ich ubijania.





Rys. 2. Model układu do obciążania zacementowanej panewki a) model układu do zrywania panewki b)

W odróżnieniu od wcześniejszych opracowań [10, 11, 12, 13, 14, 15] prowadzone w ramach tej pracy badania realizowane były na modelu odwzorowującym rzeczywisty kształt warstwy przeszczepów, jaki powstaje podczas operacji rewizyjnej stawu biodrowego. Modele układów, jakie były poddawane badaniom na omawianym stanowisku przedstawiono na rys. 2.

Do wszystkich eksperymentów stosowano przeszczepy kostne uzyskiwane z głów kości udowych. Rozdrobnione przeszczepy kostne przygotowywano usuwając z nich chrząstkę stawową. Szpik kostny i tkankę tłuszczową usuwano płucząc przeszczepy w soli fizjologicznej o temperaturze 70 stopni. Stosowano przeszczepy kostne o nieregularnym kształcie i wielkości od 5 do 7 mm. Zróżnicowana wielkość przeszczepów umożliwia dokładniejsze ich ubicie poprzez wypełnianie wolnych przestrzeni miedzy większymi przeszczepami mniejszymi. Osuszone przeszczepy przechowywano w zamrażarce w temperaturze -25<sup>0</sup>C. Nie stosowano sterylizacji przeszczepów kostnych.

Każda próbka do badań zawierała 3 warstwy przeszczepów ubijanych kolejno ubijakami o coraz mniejszej średnicy aż do uzyskania wymaganego kształtu do zacementowania sztucznej panewki.

Do ubijania wykorzystywano młotek ortopedyczny o masie 0,7 kg. Ubijano ręcznie 3 warstwy przeszczepów uzyskując ostatecznie warstwę o grubości od 5 do około 10 mm.

W zależności od rodzaju prowadzonych badań zadawano obciążenie statyczne lub sinusoidalnie zmienne za pomocą ubijaka umieszczonego na trzpieniu mocowanym do tensometrycznej głowicy pomiarowej pulsatora hydraulicznego. Wielkość odkształcenia przeszczepów kostnych określano za pomocą zmiany położenia stolika umieszczonego na ruchomym trawersie maszyny wytrzymałościowej.

## 4. BADANIE STABILNOŚCI PANEWKI POLIETYLENOWEJ ZACEMENTOWANEJ W ZWIERZĘCYM STAWIE BIODROWYM -WYNIKI BADAŃ

Model do badań z kości cielęcej przygotowywano w specjalnym prostopadłościennym naczyniu jak na rys. 3.

Fragmenty kości cielęcej mocowane były w naczyniu wykonanym z blachy stalowej na podłożu odlanym z cementu montażowego Ceresit CX-5.

Zwierzęcą panewkę wklejano w formę cementową na duracrylu szybkopolimeryzującym. Po wklejeniu kości dokonywany był zabieg rewizyjnego wszczepienia panewki polietylenowej. Ubytek loży kostnej panewki wykonywano poprzez rozwiercanie panewki rozwiertakiem o średnicy 60 mm. Następnie ubijano ręcznie odpowiednią warstwę przeszczepów i cementowano polietylenową panewkę, którą następnie poddawano cyklicznemu obciążaniu siłą 1 kN przez 100000 cykli. Badania prowadzono dla: różnej grubości warstwy przeszczepów (D=5 lub 10 mm) i różnych kątów działania siły obciążenia cyklicznego (0°, 30° i 60°).



Rys. 3. Widok fragmentu kości stawu zwierzęcego z zacementowaną panewką polietylenową

Badania wytrzymałościowe polegające na cyklicznym obciążaniu panewki pod różnymi kątami siłą 1kN o kształcie sinusoidalnym i częstotliwości 5Hz przez 100000 cykli prowadzone były w układzie jak na rys. 4.



Rys. 4. Widok modelu z zacementowaną panewką polietylenową poddawaną cyklicznemu obciążaniu pod kątem 30° względem normalnej do równika panewki

Po wykonaniu próby wytrzymałościowej sprawdzano jakość zamocowania panewki poddając ją działaniu siły ścinającej przykładanej na krawędzi panewki jak pokazano na rys. 5.

Wykaz przeprowadzonych eksperymentów wraz z opisami zestawiono w tabeli 1. Kolejne eksperymenty (próby) oznaczono numerami od 1 do 7.



Rys. 5. Widok zacementowanej polietylenowej panewki poddawanej działaniu siły ścinającej

#### Tabela 1

Wykaz badań wykonanych na zwierzęcym stawie biodrowym

Nr próby	Grubość przeszcz D [mm]	Kąt działania siły obciąż. α [°]	Siła nacisku F [kN]	Liczba cykli N [–]
1	5	0	0	0
2	5	0	1	100000
3	5	30	1	100000
4	5	60	1	100000
5	10	30	1	100000
6	10	60	1	100000
7	0-20	30	1	100000

Tabela 2

Przemieszczenie panewki pod wpływem obciążania siła F=1kN przez 100000 cvkli

Nr próby	Grubość przeszcz. D [mm]	Kąt działania siły obciąż. α [°]	Przemieszcz. panewki po 100000 cyklach L [mm]
1	5	0	0
2	5	0	0,26
3	5	30	0,3

4	5	60	1,76
5	10	30	0,47
6	10	60	0,73
7	0-20	30	1,47

Podczas cyklicznego obciążania panewki zaobserwowano niewielkie przemieszczenie panewki w kierunku działania siły. Wielkość tego przemieszczenia zależy od grubości warstwy przeszczepów oraz kąta działania siły obciążającej panewkę. Wartości przemieszczenia panewki dla kolejnych prób przedstawiono w tabeli 2.

Przemieszczenie (L) panewki w zależności od wartości kąta działania siły ( $\infty$ ) przedstawiono na wykresie słupkowym na rys. 6. Otrzymane wyniki poddano analizie porównawczej stosując kryterium podobnych parametrów metrologicznych modelu.



Rys. 6. Przemieszczenie zacementowanej panewki pod działaniem siły obciążającej

Po cyklicznym obciążaniu zacementowanej panewki poddawano ją następnie działaniu siły ścinającej jak na rys. 5.

Otrzymane charakterystyki zmian siły ścinającej  $F_c$  w funkcji przemieszczenia panewki przedstawiono na kolejnych rysunkach grupując je według podobnych cech.



Rys. 7. Zależność siły ścinającej w funkcji przemieszczenia panewki dla prób 1 i 2

Na rys. 7 przedstawiono przebiegi zarejestrowanego procesu zrywania panewki tj. zależności siły  $F_c$  w funkcji przemieszczenia L dla prób 1 i 2. Takie zestawienie prób pokazuje wpływ cyklicznego obciążania na stabilność w odniesieniu do przypadku, kiedy panewka była "zrywana" bezpośrednio po zacementowaniu.

Na rys. 8 zestawiono przebiegi sił ścinających dla prób 2, 3 i 4 tj. przypadków, kiedy dla tej samej grubości przeszczepów zmieniano kąt działania siły obciążającej.





Na rys. 9 porównano wartości siły ścinającej dla próby 5 i 6 dla różnych kątów, lecz takiej samej grubości warstwy przeszczepów.



Rys. 9. Zależność siły ścinającej w funkcji przemieszczenia panewki dla prób 5 i 6

Na rys. 10 przedstawiono zależność siły ścinającej dla panewki zamocowanej na warstwie przeszczepów o równomiernej grubości (próba 3) oraz panewki zacementowanej niecentrycznie, kiedy to grubość przeszczepów wokół panewki zmieniała się od 0 do 2 cm.

Grubsza warstwa przeszczepów znajdowała się na kierunku działania siły natomiast po przeciwnej stronie grubość warstwy przeszczepów była minimalna.



#### **5. PODSUMOWANIE**

Badania stabilności polietylenowej panewki zacementowanej na ubitych przeszczepach kostnych w zwierzęcym stawie biodrowym przybliżyły laboratoryjne warunki prowadzonych badań do warunków klinicznych i umożliwiły sprawdzenie innych czynników mających wpływ na stabilność zacementowania panewki takich jak: cykliczne działanie sił obciążających pod różnym kątem oraz grubość warstwy przeszczepów.

Warunkiem dobrego odległego w czasie wyniku protezoplastyki rewizyjnej z wykorzystaniem kostnych techniki uzupełniania ubytków przeszczepami kostnymi jest uzyskanie dobrej pierwotnej stabilności panewki oraz niezaburzony proces wgajania przeszczepów. Pierwotna stabilność panewki zależy od jakości ubicia przeszczepów sposobu mocowania panewki. Wczesne przemieszczenie panewki w warstwie przeszczepów skutkuje zwykle jej obluzowaniem.

Na podstawie badań wytrzymałościowych zamocowania panewki stwierdzono zależność pierwotnej stabilności od kierunku działania siły obciążającej oraz grubości warstwy przeszczepów.

Z porównania otrzymanych wyników badań wytrzymałościowych dla próby 1 i 2 (tab. 1) widać, że działanie siłą 1kN przez 100000 cykli prostopadle do równika panewki nie powoduje zbyt dużego osiadania przeszczepów (0,26 mm). Spowodowane jest to zapewne niezbyt grubą warstwą przeszczepów dodatkowo spenetrowaną i usztywnioną przez cement kostny.

Porównując przebiegi zmian siły ścinającej w funkcji przemieszczenia dla prób 1 i 2 przedstawione na rys. 7 nie widać znaczącej różnicy miedzy nimi. Widać, że stabilność zamocowania panewki na przeszczepach poddawanych i nie poddawanych obciążaniu jest bardzo zbliżona.

Jeśli przyjrzeć się wynikom dla prób 2, 3 i 4 (tab. 1) to można ocenić, jaki jest wpływ kąta działania siły obciążającej panewkę na wielkość jej przemieszczenia (tab. 2) i stabilność (rys. 8). Na podstawie prób 2, 3 i 4 stwierdzono zależność przemieszczenia panewki od kąta działającej siły dla tej samej grubości warstwy przeszczepów. Wzrost kąta nachylenia obciążającej siły do 60 stopni powoduje gwałtowny wzrost przemieszczenia powodowany znacznie panewki mniejszym pierwotnym ubiciem przeszczepów w górnej strefie panewki (blisko równika). Badania wykazały, że zwiększenie kąta działającej siły skutkuje większym przemieszczeniem panewki. Wynika z tego, że niekorzystne jest cementowanie panewki pod kątem 60°. W wyniku obciążania pod kątem 60° składowa poprzeczna siły powoduje na kierunku działania siły silne ubijanie przeszczepów, ale jednocześnie po stronie przeciwnej panewki następuje odspojenie przeszczepów od podłoża kostnego panewki. Po takim obciążaniu stabilność panewki znacznie się zmniejsza i jest ona bardziej podatna na zerwanie (rys. 8). Z kolei obciążanie panewki pod kątem 30° poprawia ubicie przeszczepów, powoduje lepsze wnikanie cementu w przeszczepy a w konsekwencji poprawia stabilność panewki w stosunku do przypadku, kiedy obciążana jest ona pod kątem 0. Wynika z tego, że do pewnego stopnia wzrost kąta działania siły obciążania panewki (30°) powoduje

poprawę jej stabilności, natomiast zbyt duży kąt (60°) sprawia, że panewka staje się mniej stabilna niż dla kąta 0°.

Badania stabilności zacementowanej polietylenowej panewki na przeszczepach kostnych wskazują również na duże znaczenie grubości warstwy cementu. Jest szczególnie ważne dla cienkiej warstwy przeszczepów.

Dla warstwy 0,5cm stwierdzono brak wpływu cyklicznego obciążania na wielkość siły zrywającej panewkę. Na tej podstawie można stwierdzić, że penetracja cementu w cienką warstwę przeszczepów uniemożliwia dalsze ich ubicie i przyczynia się do dobrej pierwotnej stabilności. Z drugiej jednak strony całkowita penetracja cementu w warstwę przeszczepów uniemożliwia ich przebudowę, co może skutkować wtórnemu obluzowaniu panewki w późniejszym okresie.

Na rys. 9 porównano przebiegi siły ścinającej dla próby 5 i 6 dla takich samych kątów jak w próbach 2, 3 i 4, lecz nieco grubszej (1cm) warstwy przeszczepów. W tym przypadku podobnie jak na rys. 8 panewka ma wieksza stabilność dla kata 30° niż dla 60°. Porównujac miedzy soba charakterystyki z rys. 8 i 9 odpowiednio dla tych samych kątów, lecz różnej grubości przeszczepów widać, że nachylenie charakterystyk zwiększa się wraz z grubością warstwy przeszczepów. Dla 0,5cm grubości warstwy przeszczepów siła zrywająca jest około dwa razy większa niż dla warstwy 1cm. Świadczy to o większym prawdopodobieństwie obluzowania panewki przy grubszej warstwie przeszczepów.

Ponadto zaobserwowano, że niecentryczne zacementowanie panewki w warstwie przeszczepów powoduje wieksze (próba7) znacznie przemieszczenie podczas cyklicznego obciażania niż w próbach 3 i 5. Spowodowane jest to wtórnym ubijaniem grubszej warstwy przeszczepów położonych w górnej strefie panewki. Niecentryczne panewki zacementowanie sprzyja również łatwiejszemu jej obluzowaniu (rys. 10).

We wszystkich próbach zaobserwowano przemieszczenie zacementowanej panewki. Jest to zgodne z obserwacjami Slooffa [7]. Wielkość tego przemieszczenia zależała od grubości warstwy przeszczepów. Dla warstwy 1cm stwierdzono znacznie większe przemieszczenie panewki niż dla warstwy przeszczepów o grubości 0,5cm, ale bez cech utraty jej stabilności. Powodem tego może być większa grubość warstwy przeszczepów, w którą nie wnika cement. Powoduje to ich wtórne ubijanie przez działające siły i obserwowane przemieszczenie panewki.

Stwierdzono także korelację między wielkością przemieszczenia oraz stabilnością panewki a kątem działania siły. Większemu kątowi działającej siły odpowiada większe przemieszczenie i gorsza stabilność.

#### LITERATURA

- Kavanagh B. F., Ilstrup D. M., Fitzgerald R. J.: *Revision total hip arthroplasty*. J Bone Joint Surg. 1985;67-A: 517-526.
- Pellcci P. M., Wilson P. J., Sledge C. B.: Longterm results of revision total hip replacement. A foloow-up report. J Bone Joint Surg. 1985; 67A: 513-516.
- [3] Dohmae Y, Bechtold JE, Sherman RE, Puno RM, Gustilo RB: *Reduction in cement-bone interface shear strength between primary and revision arthroplasty*. Clin Orthop. 1988; 236: 214-220.
- [4] Ling R. S. Femoral component revision using impacted morsellised cancellous graft. J Bone Joint Surg (Br) 1997; 79: 874-875.
- [5] Ling R. S. Femoral component revision using impacted morsellised cancellous graft. J Bone Joint Surg (Br) 1997; 79: 874-875.
- [6] Slooff T. J. J. H: *Revision total hip arthroplasty with bone grafts*. Katholieke Universiteit Nijmegen, 1997.
- [7] Slooff TJ, Buma P, Schreurs BW, Schimmel JW., Huiskes R, Gardeniers J. Acetabular and femoral reconstruction with impacted grafts and cement. Clin Orthop 1996; 324: 108-116.
- [8] Slooff TJ, Schimmel JW, Buma P. Cemeneted fixation with bone grafts. Orthop Clin North Am 1993;24: 667-677.
- [9] Slooff TJ, Buma P, Schimmel JW, Gardeniers J, Huiskes R. Impaction grafting and cement in acetabular revision arthroplasty. In Orthopaedic Allograft Surgery. AA Czitrom, H Winkler Eds. 125-134. Sprinter. Wien New York 1996.
- [10] Slooff TJ, Buma P, Schreurs BW, Schimmel JW., Huiskes R, Gardeniers J. Acetabular and femoral reconstruction with impacted grafts and cement. Clin Orthop 1996; 324: 108-116.
- [11] Slooff TJ, Horn van J, Lemmens A, Huiskes R: Bone grafting for total hip replacement in acetabular protrusion. Acta Orthop Scand. 1984; 55: 593-597.
- [12] Bavadekar A., Cornu O., Godts B., Delloye Ch., Van Tomme J., Banse X.: Stiffness and compactness of morselized grafts during impaction. An in vitro study with human femoral heads. Acta Orthop Scand, 2001; 72(5): 470-476.
- [13] Giesen E. B., Lamerigts N. M., Verdonschot N., Buma P., Schreurs B.W., Huiskes R. Mechanical characteristics of impacted morsellised bone grafts used in revision of total hip arthroplasty. J Bone Joint Surg (Br) 1999; 81:1052-1057.
- [14] Tägil M., Aspenberg P. Fibrous tissue armoring increases the mechanical strength of an impacted bone graft. Acta Orthop Scand 2001; 72 (1):78-82.

[15] Ullmark G., Nilsson O. Impacted corticocancellous allografts: recoil and strength. J Arthroplasty 1999; 14:1019-1023
# SYSTEMY AUTOMATYCZNEJ KONTROLI WYMIAROWEJ MIKROZIAREN ŚCIERNYCH

# Adam BARYLSKI

Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk, fax: 058 347 10 25, email: <u>abarylsk@pg.gda.pl</u>

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono skomputeryzowaną analizę wielkości i kształtu mikroziaren ściernych przy użyciu specjalnego oprogramowania MultiScan v 6.08 oraz zautomatyzowane pomiary z wykorzystaniem analizatora laserowego Analysette 22. Analizator laserowy jest uniwersalnym urządzeniem do pomiarów wymiarów ziaren i mikroziaren. Światło lasera pada na ziarno i jest odbijane; w ten sposób powstaje siatka dyfrakcyjna. Rozmiar cząstek jest określany ze struktury powstających siatek. Specjalny czujnik mierzy rozkład kąta i związany z nim rozkład natężenia światła laserowego.

Słowa kluczowe: mikroziarna ścierne, wielkość, kształt, pomiary.

## AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS OF ABRASIVE MICROGRAINS SIZE

#### Summary

The computer analysis of size and shape micrograins abrasive using special software MultiScan v 6.08 and laser particle sizer Analysette 22 for automated measurement is presented in the paper. Laser particle sizer is a universal instrument for determining the size of grains and micrograins. Particles or drops introduced into the path of a laser bean divert the light through diffraction. A special multielement detector measures the angle distribution and the related light intensity distribution which a computer program translates into a particle size distribution.

Keyword: abrasive micrograins, size, shape, measurement.

### 1. WSTĘP

W docieraniu, narzędziami aktywizowanymi (zbrojonymi) w sposób swobodny lub wymuszony, zasadniczy wpływ na jakość obróbki mają właściwości mikroziaren ściernych (rodzaj, gatunek i numer miroziarna, a więc jego twardość, stereometria, zdolność ścierna i wytrzymałość na ściskanie [13, 33, 34]), sposób dawkowania (okresowe lub ciągłe), a także rodzaj i udział wagowy nośników ścierniwa. Skład ziarnowy mikroziaren i stereometria ściernych ma podstawowe znaczenie w kształtowaniu struktury geometrycznej docieranej powierzchni [15, 32]. W praktyce technologicznej, dla uzyskania wymaganej chropowatości powierzchni obrabianego przedmiotu, dobierany jest normatywny numer mikroziarna. Pojawia się więc problem określenia wielkości mikroziaren ściernych, które jako bryły przestrzenne o złożonych kształtach są obiektami trudnymi do analizy [10, 11, 31, 35].

Znanych i rozpowszechnionych jest dotąd kilka sposobów oceny wielkości i kształtu mikroziaren. Są to metody sedymentacyjne [4], mikroskopowe [8] i laserowe [1, 7, 9, 14]. Segregacja wielkościowa jest możliwa przez strumień wirującego lub zmieniającego kierunek powietrza, rozdział w wyniku wymywania wodą, przez czy sedymentację grawitacyjną odśrodkową. lub Możliwe jest wykorzystanie absorpcji światła w fotosedymentatorach lub pomiary oporności elektrolitu przez licznik Coultera [5]. W analizie stopnia zużycia mikroziaren zalecić można mikroskopię skaningową [2], mikroanalize rentgenowską lub wykorzystanie [3] skomputeryzowanego analizatora obrazu [6, 12].

# 2. ANALIZATORY LASEROWE

W przypadku pomiarów wielkości mikroziaren ściernych bardzo dobre parametry użytkowe ma analizator laserowy. Spektrometryczna technika laserowo-dyfrakcyjna, stosowana w diagnostyce stereometrii ziaren i mikroziaren, rozwijana jest obecnie przez wiele specjalistycznych firm [16-30]. firma LECO produkuje Przykładowo, serię analizatorów wielkości cząstek LECOTRAC<sup>TM</sup> wykorzystujących zjawisko statycznego lub dynamicznego rozpraszania światła (tabl. 1). W zależności od zastosowanego układu optycznego (system potrójnych lub pojedynczych laserów) oraz rodzaju analizowanej próbki (proszek lub zawiesina) możliwy jest pomiar wielkości ziaren w zakresie od 0,003 do 2000 µm. W pomiarach cząstek większych niż 0,7 µm wykorzystywane jest zjawisko statycznego rozpraszania światła (typ LTS-150 i LTL-200). W tym przypadku wiązka światła z pojedynczego lasera jest kierowana do obszaru pomiarowego, gdzie następuje jej ugięcie, a następnie rozproszenie przez badane ziarna. Kąt rozproszenia jest odwrotnie proporcjonalny do wielkości cząstek (np. mikroziaren ściernych). Rozproszone światło trafia poprzez układ optyczny na tablice fotodetektorów (o charakterystyce logarytmicznej), po czym, już jako sygnał elektryczny, przeliczane jest na wynik końcowy (za pomocą odpowiedniego algorytmu). Dla cząstek mniejszych (LT-100) układ pojedynczego lasera zastąpiono zespołem trzech laserów, w celu umożliwienia detekcji promieniowania świetlnego o bardzo dużym kacie rozproszenia. W przypadku bardzo małych ziaren, poniżej 0,02 µm, do pomiarów wykorzystano ziawisko dynamicznego rozproszenia światła (LTU-150 i LTU-251).

Tablica 1. Charakterystyka ogólna analizatorów laserowych firmy LECO [22]

LTU -150											
Тур	LT-100	LTS-	LTL-	LTU-							
		150	200 .	150 1 TU							
				$251^{2}$							
Zakres	0.02-	0.69-	3.2-	0.003-							
nomiarowy	704	704	2000	6 54							
[µm]	, , , ,	, , , ,	2000	0,0 1							
Rodzaj	proszek	proszek	proszek	proszek							
próbki	lub	lub	-	-							
-	zawiesi	zawiesi									
	na	na									
Układ	trzy	jeden	jeden	jeden							
optyczny	lasery	laser	laser	laser							
Układ	dwie	tablica	tablica	falowód							
detekcji	tablice	fotodete	fotodete	Z							
	fotodete	ktorów	ktorów	fotodete							
	ktorów			ktorem							
Wymiary	30x33x	30x33x	30x33x	15x10x							
[cm]	56	56	56	38							

 Można przystosować do analiz zawiesiny, w zakresie ziaren 3,2÷1000 μm.

<sup>2)</sup> Możliwa współpraca z podajnikiem automatycznym.

Bardzo drobne cząsteczki zawieszone w cieczy poruszają się ruchami Browna z prędkościami odwrotnie proporcjonalnymi do ich rozmiarów. Ze względu na odbicie światła od ruchomych cząstek, odbity i powracający do detektora promień jest opisany przez efekt Dopplera, (obowiązuje zasada proporcjonalności do prędkości cząstek). Ponadto część światła ulega odbiciu od granicy ośrodków: filtr optyczny – medium robocze, po czym powraca do detektora jako wiązka odniesienia (referencyjna). Tak otrzymany sygnał optyczny jest przetwarzany przez tablice fotodetektorów na sygnał elektryczny, który jest następnie wzmacniany, filtrowany i poddany końcowej obróbce. Analizatory LT-100 i LTS-150 współpracują z systemem recyrkulacji medium roboczego (automatycznym lub półautomatycznym). Niezależnie od typu użytego recyrkulatora, analizatory LT-100 i LTS-150 moga współpracować dodatkowo układem Z automatycznego podawania próbek [22].

Widok ogólny i zasadę działania przykładowego analizatora laserowego (firmy Horiba Ltd) przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Analizator laserowy wielkości cząstek LA-920 firmy Horiba Ltd: a) widok ogólny aparatury, b) schemat działania [20]

Modułowa budowe podobnego urządzenia zastosowała firma Sympatec GmbH, wykorzystując czujnik dyfrakcji laserowej HELOS, który jest pierwszym systemem wykorzystania zjawiska Fraunhofera w całym zakresie pomiarowym, od 0,1 do 8750 µm. Możliwa jest analiza wielkości cząstek na sucho i na mokro - zarówno pyłów, zawiesin, emulsji, czy areozoli. System zbudowany jest z części pomiarowej, dyspergującej i obliczeniowej. Modułowa konstrukcja zapewnia wymienność wszystkich układów (rys. 2). Dyfraktometr laserowy przyrzadem HELOS/F klasycznym jest wykorzystującym spójne światło lasera. Dla materiałów suchych sposób podawania badanych

ziaren (dawka od kilku do 100 g) opiera się na ich rozpraszaniu w strumieniu powietrza (RODOS i RODOS M). Zestaw może być uzupełniony o przystawkę ASPIROS do analizy substancji toksycznych. Do pomiarów cząstek swobodnie opadających stosuje się system dyspersji grawitacyjnej GRADIS. Dla zawiesin lub emulsji proponowane są układy dyspersji w zakresie pomiarowym od 0,1 do 3500 µm (QUIXEL, SUCELL i CUVETTE). Pomiar wielkości cząstek w areozolach jest możliwy dzięki systemowi SPRAYER (cząstki wprowadzane do przestrzeni pomiarowej przy pomocy urządzenia INHALER). Fotonowy miernik wielkości cząstek NANOPHOX umożliwia analizę w zakresie nanometrycznym (od 1nm do 10 µm), zarówno emulsji jak i zawiesin (pojemność komory 4 ml). Analizator QICPIC bada zarówno rozkład uziarnienia, jak i kształt cząstek (w zakresie pomiarowym od 1 µm do 10 mm) [28].



Rys. 2. Modułowa konstrukcja analizatorów firmy Sympatec GmbH do pomiarów:
a) materiałów suchych, b) zawiesin lub emulsji, c) mikroziaren w zakresie nanometrycznym, d) wielkości i kształtu ziaren i mikroziaren [28]

Permanentnie, konstrukcje analizatorów laserowych rozwijane są przez firmę Fritsch GmbH, dzięki uprzejmości której wykonano badania mikroziaren ściernych, prezentowane w następnym rozdziale. Zakres pomiarowy produkowanego obecnie systemu Analysette 22 wynosi od 0,01 do 1000 μm (rys. 3).



Rys. 3. Laserowe mierniki wielkości cząstek Analysette 22 firmy Fritsch GmbH: a) Nano Tec (zakres pomiarowy: 0,01÷1000 μm – na mokro, 0,1÷1000 μm – na sucho),
b) Micro Tec (0,1÷600 μm – na mokro i na sucho), c) COMPACT (0,3÷300 μm – na mokro i na sucho); objętość próbki: 0,1÷2 cm<sup>3</sup> – na mokro, 5÷50 cm<sup>3</sup> – na sucho (czas pomiaru 10 s) [18]

Do analizy wykorzystywane jest oprogramowanie opracowane na podstawie VISUAL DESIGN GUIDES (w środowisku WINDOWS <sup>TM</sup>, Microsoft) – rys. 4.

🖄 Analysette 22 3202 Fritsch Geol	ин (с),7000		
File Setup Special Configuration	on 1990 al 1291 cat 🛥		
Des (1) Relation			
Tradelled Show di Values		Setting Hago Lee Canbi Version	-
Ind.12 Control Card D-Values		Yeston Text	$\square$
User Spes	104	The Labert Day Dispensing Unit	
Rearues	100	Beausters	- Aktywne okna
Fiber Monuments and a fiber Fiber Fiber Fiber Fiber Fiber And Fibe	Inactive	[" Backgourd Measurement	
Detection of Elongation Ratio	Inactive	Minimum Sample Dilution 15	Pase
Cel Distance Nano Measurement activated	20 mm Active	T Bruneneri	szybkiego dostępu
Full Meanuing Range Full Resolution	0.01 - 51.30 micron 51 channels	Number of Scans 100 (d) Report 121	
SoldName	Descatherer	C Dear Fill before Mean.	Men
Sold Reliactive Index Sold Abusption Coefficient	154	P Dean Fill alter Meas. 1 P	
Liquid Name Liquid Reliactive Index	Watter 1.33	UB allows Action	Okna komunikacvine
Write fixed values to ASCI file	Inative	P Utracorics permanently	
Write values to database Automatic pietos a after mean person	Inactive	Derive Sample Diston(b)     Derive Sample Diston(b)	
Automatic Saving of Results RS232 Part external Trigger activated	Inactive Inactive	/ After Sample Dilution (s) 99	
Fixed particle szes	Active	CONTRACTOR OF A DESCRIPTION OF A DESCRIP	Status system.
Calculation Method Fixed particle sizes litename	Undersize C1Phopsenne1a22_32VRITSOPP		
Fixed percentage volumes tilename	Active		
Calculation Method Fixed particle sizes Rename	C Vhogramne/a22_32VPETSCH1	1985	Programowalny przebieg pomiaru
	Load Settings Last Me	Stat Measurement	trans
D.d.r		96.00 9694 14.44	

Rys. 4. Menu główne programu ANALYSETTE 22, 32Bit Fritsch GmbH (C) 2000 [18]

# 3. WYNIKI BADAŃ

Badania Z wykorzystaniem analizatora laserowego poprzedziła analiza mikroskopowa mikroziaren ściernych (badania płaskiego obrazu mikroskopowego rzutów mikroziaren na płaszczyznę obserwacji). Jako parametry diagnostyczne wielkości mikroziarna przyjęto wymiary jego obrazu (długość l i szerokość b), a także pole powierzchni A. Pomiary przeprowadzono skomputeryzowanym na stanowisku, wyposażonym mikroskop w stereoskopowy, kamerę CCD i oprogramowanie MultiScan v. 6.08 (rys. 5).



Rys. 5. Schemat stanowiska pomiarowego do automatycznej analizy mikroskopowej rozmiarów mikroziaren ściernych

Na początku obserwacji obraz mikroskopowy nie może być bezpośrednio wykorzystany do automatycznej analizy, gdyż występują różne odcienie tła i stopnie szarości ziaren. Koniecznym jest zastosowanie filtrów binaryzujących, zawartych w programie (rys. 6).



Rys. 6. Obraz mikroskopowy mikroziaren 98C F320/29: a) przed binaryzacja, b) po binaryzacji







Rys. 8. Wyniki pomiarów mikroziaren 98C F320/29: a) rozkład długości l, b) rozkład szerokości b, c) rozkład pola powierzchni A

Tablica 2. Charakterystyki badanych rozkładów

Mikroziarno	99A F320/29	98C F320/29						
Długość obrazu mikroziarna l [mm]								
X <sub>śr</sub>	0,0760	0,0636						
с	0,0831	0,0441						
x <sub>m</sub>	0,0781	0,0368						
Xd	0,0631	0,0324						
$s^2$	0,000898	0,000163						
S	0,0300	0,0128						
d	0,0245	0,0104						
v	39 %	35 %						
а	0,239	0,0496						
e	-0,800	0,142						
Szerokoś	ć obrazu mikrozia	rna b [mm]						
X <sub>śr</sub>	0,0509	0,0574						
с	0,0649	0,0720						
x <sub>m</sub>	0,0542	0,0599						
Xd	0,0446	0,0491						
$s^2$	0,000411	0,000383						
S	0,0203	0,0196						
d	0,0163	0,0160						
v	40%	34%						
а	0,708	0,0617						
e	-0,00331	0,0779						
Pole powierze	chni obrazu mikro	ziarna A [mm <sup>2</sup> ]						
X <sub>śr</sub>	0,00270	0,00160						
с	0,00410	0,00225						
x <sub>m</sub>	0,00300	0,00140						
Xd	0,00230	0,00110						
$s^2$	0,000000290	0,000000700						
S	0,00169	0,000864						
d	0,00130	0,0007						
v	62%	55%						
а	0,879	0,787						
e	0,207	0,126						

Podano: charakterystyki położenia - średnia arytmetyczna  $x_{sr}$ , środek rozstępu c, mediana  $x_m$ , wartość modalna  $x_d$ ; charakterystyki rozproszenia wariancja  $s^2$ , średnie odchylenie kwadratowe s, odchylenie przeciętne d, współczynnik zmienności v; charakterystykę asymetrii - współczynnik asymetrii a; charakterystykę skupienia - eksces e.

Porównując otrzymane wyniki (rys. 7 i 8 oraz tabl. 2) można stwierdzić, że badane szeregi mają asymetrię dodatnią, przy czym dla mikroziaren 99A F320/29 jest ona większa. Charakteryzują się też zbliżonymi wartościami współczynnika zmienności; natomiast mają różną miarę koncentracji. Rozkład empiryczny długości l i szerokości b obrazu mikroziarna elektrokorundu szlachetnego ma eksces ujemny (czyli rozkład jest spłaszczony), zaś dla czarnego weglika krzemu (o tym samym numerze mikroziarna) - eksces jest dodatni (rozkład jest wysmukły, w stosunku do skupienia szeregu reprezentatywnego dla populacji o rozkładzie normalnym). Różnic tych nie wykazują rozkłady pola powierzchni obrazu mikroziarna (rozkład wysmukły). Średnie współczynniki kształtu (K=l/b) analizowanych ścierniw są zbliżone i wynoszą odpowiednio: K=1,56 dla 99A F320/29 i K=1,64 dla 98C F320/29.

Porównując rozkład otrzymany na podstawie analizy laserowej (rys. 9) z wynikami z rys. 2b, łatwo zauważyć, iż średnia arytmetyczna określona metodą mikroskopową (tabl. 2) znacznie odbiega od wymiaru charakterystycznego (normatywnego) jaki przyporządkowany jest mikroziarnom 98C F320/29. Rozkład z rys. 9 ma następujące parametry: średnia arytmetyczna 26,14 µm, wartość modalna 28,68 µm, odchylenie standardowe 15,37 µm, współczynnik zmienności 58,82 %, mediana 25,05 µm; co jest bliższe wymiarom normatywnym ustalonym na podstawie analizy sedymentacyjnej.

# 4. UWAGI OGÓLNE

W każdej metodzie pomiarowej wielkości i kształtu ścierniwa konieczne jest przestrzeganie zasady, aby sam proces analizy nie spowodował rozdrobnienia ziaren (pękanie) lub powiększenia (zrosty). W praktyce, wybrany sposób analizy zależy głównie od rodzaju i rozmiarów cząstek, zaś czasochłonność i dokładność poszczególnych pomiarów jest bardzo zróżnicowana.

Zastosowane w badaniach automatyczne sposoby pomiaru wielkości mikroziaren ściernych należy zaliczyć obecnie do metod wydajnych, o dużym stopniu informatywności. Zastąpienie tradycyjnej analizy sedymentacyjnej metodą spektrometrii laserowej można uznać za kierunek właściwy, pamiętając o modyfikacji obowiązujących norm. Stosowanie zaś skomputeryzowanego systemu analizy mikroskopowej ułatwi między innymi ocenę zmian kształtu mikroziaren przed podjęciem decyzji o ich wykorzystaniu w procesach ściernej obróbki bardzo dokładnej.

lessounder	1	164 0	atun		2	eit		Res	iduus:		0.0562	1	Overl	Ite	rations	56	Strahla	ibso	5.	£ 00.
Probe 2 F Franhofe	320.	/29							fahf a i	Fraun	hofer						1 - 1	inhf	e = (	0.000
5.001 75.001	(	10.5	0 p 0 p		15.00% 85.00%	(	15. 34.	59 µ 53 µ	25.00 95.00	(	18.70	ļ	40.00 99.00	a ( a (	22.61 µ 59.54 µ		60.001 99.901	(	27.4	4 µ 7 µ
10.00% 60.00%	ć	13.5 27.4	3 p 4 p		20.00% 70.00%	(	17.	24 µ 87 µ	30.00 80.00	(	20.06 32.71	ł	40.00 90.00	nt ( nt (	22.61 µ 37.32 µ		50.00% Volumen	( Vei	25.0	5 µ 109
Mittl. ar Mittl. ge Mittl. qu Mittl. ha	rith. eon. uadr.	Durc Durc Durc Durc	cha. ha. cha.		26.1 23.5 30.2 19.0	4 ca 2 ca 8 ca 8 ca		Varia Stand Maria	nz ard Abweid dulus) tionskoef	chung fizie	: : nt :	236 15 0 58	.32 sqr .37 un .00 un .82 1	(u)	Schie Kurto Weite Gleic	fe sis hažB	igkeit			10.36 200.52 0.53 0.61
Modal				:	28.6 Spez.	8 un Ober	fläc	Hedia he		0.3	: 144 sq	25 r(n)/	.05 m cc		fors fak	ned1 tor	1		:	1.04



Rys. 9. Wyniki pomiarów na analizatorze laserowym mikroziaren 98C F320/29 (Analysette 22, Fritsch GmbH)

# LITERATURA

- [1] An H., Mori Y., Kataoka T., Endo K., Inagaki K., Yamamura K., Yamauchi K., Fukuike T.: A New Apparatus for Measuring Particle Size of the Order of Nanometr (2<sup>nd</sup> Report). Evaluation of Measuring System by using Standard Particles. In. J. Japan Soc. Prec. Eng., vol.28, 1994, nr 4, str.356-361.
- [2] Barylski A.: Analiza kształtów i rozmiarów mikroziaren ściernych za pomocą mikroskopu skaningowego. Szkło i Ceramika, 1985, nr 1, str.34-36.
- [3] Barylski A.: Ocena rozmiarów mikroziaren ściernych z wykorzystaniem mikroanalizatora rentgenowskiego. Szkło i Ceramika, 1985, nr 3-4, str.108-110.
- [4] Barylski A.: Pomiary wielkości mikroziaren ściernych. [Materiały] Krajowy Kongres Metrologii, Pol. Warsz., Warszawa, 24-27.06.2001, t.1, str.217-222.
- [5] Barylski A.: Systemy pomiarowe wielkości mikroziaren ściernych. [Materiały] Konf. Nauk.-Tech. "Metrologia w technikach wytwarzania", Pol. Krak., Kraków, 25-27.09.2003, str.41-52.
- [6] Barylski A.: Wykorzystanie automatycznego analizatora obrazu do oceny wielkości mikroziaren ściernych. Szkło i Ceramika, 1984, nr 5-6, str.185-188.
- [7] Bikker A., Konert M.: Determining the particle size distribution of BCR samples with selected laser diffraction spectrometers. Internal. report of the Free Univ. of

Amsterdam. Institute of Earth Science, Sediment Analysis Laboratory, 1992.

- [8] Borowik S., Wiśniewski D.: Proszki testowe w badaniach efektywności filtrów oraz wrażliwości zanieczyszczeniowej elementówi rozkładów hydraulicznych. [Materiały] V Ogólnopolska Konf. Nauk.-Tech. POLTRIB'99. Tribologia dla eksploatacji. Polskie Towarzystwo Tribologiczne, Centrum Szkolenia "Explonaft", Szczyrk, 16-18.06.1999, str.135-151.
- [9] Bumiller M.: Particle Size Analysis of Powder Metal Using Laser Diffraction. Industrial Heating, 1997, June, str.41-45.
- [10] Hager H.: Rechnerische Ermittlung der Streuungawerte in den Korazahlen von Schleifkornmischungen. Radex Rdsch., 1971, nr 2, str.435-441.
- [11] Hagiwara S., Obikawa T., Yanai H.: Evaluation of lapping grains based on shape characteristics. J. of the Japan Soc. of Prec. Eng., vol. 61, 1995, str.1760-1764 (jap.).
- Karpiński T.: Badanie kształtu ziaren ściernych przy użyciu analizatora Quantimet-720. Prace Inst. Bud. Maszyn WSI Koszalin. II Nauk. Szk. Obr. Ściernej, Koszalin-Cetuń, 1979, str.132-142.
- [13] Leavers V.F.: An active angularity factor for the characterization of abrasive particles. Wear, vol. 239, 2000, str.102-110.
- [14] Niebuhr D., Pülm S., Witt W.: Analysis, conversion and visualization of particle size data combined with a data based control system for particulate processes. [Materiały] 7. Europ. Symposium Particle Charact., 1998, str.1209-1213.
- [15] Nevljudov I. Š., Dudko P. D.: Issledovanie razrušenija almazno-abrazivnych zeren v processe dovodki. Rez. i Instrument, vyp. 19, 1978, str.11-17.
- [16] Materiały firmy BIA (Holtsville).
- [17] Materiały firmy CILAS (Marcoussis).
- [18] Materiały firmy Fritsch GmbH (Idar-Oberstein).
- [19] Materiały firmy Gilson Company, Inc. (Worthington).
- [20] Materiały firmy Horiba Ltd (Kyoto).
- [21] Materiały firmy Hosokawa Alpine AG (Augsburg).

- [22] Materiały firmy LECO Polska Sp. z o.o. (Katowice).
- [23] Materiały firmy Malvern Instruments Ltd (Malvern).
- [24] Materiały firmy Micromeritics (Norcross).
- [25] Materiały firmy Microvision Instruments (Evvy, Cadex).
- [26] Materiały firmy Particle Sizing Systems (Santa Barbara).
- [27] Materiały firmy Rotex Inc. (Cincinnati).
- [28] Materiały firmy Sympatec GmbH (Clausthal-Zellerfeld).
- [29] Materiały firmy TST (St. Paul).
- [30] Materiały firmy W.S. Tyler (Mentor).
- [31] Peng Z., Kirk T.B.: Wear particle classification in a fuzzy grey system. Wear, vol. 225-229, 1999, str.1238-1247.
- [32] Reznikov A. N., Gavrilov G. M.: Approksimacija raspedelenija razmerov zeren v almaznych poroškach. Sin. Almazy, vyp. 4, 1974, str.10-13.
- [33] Stachowiak G. W.: *Particle angularity and its relationship to abrasive and erosive wear.* Wear, vol. 241, 2000, str.214-219.
- [34] Stachowiak G. W., Podsiadlo P.: *Surface characterization of wear particles*. Wear, vol. 225-229, 1999, str.1171-1185.
- Yoshioka M., Hagiwara J.: Simulation of [35] Time-dependent Distribution of Abrasive Lapping (2<sup>nd</sup> Grain Size in Report). Discussion on Breakage Probability, *Multiplication* Rate **Transition** and Probability of Abrasive Grains. J. of the Japan Soc. of Prec. Eng., vol. 61, 1995, str.1270-1274 (jap.).



Dr hab. inż. Adam BARYLSKI jest profesorem Politechniki Gdańskiej, dziekanem Wydziału Mechanicznego. Od ponad 30 lat w Katedrze Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji prowadzi badania z zakresu precyzyjnej obróbki ściernej. W swoich publikacjach zajmuje

się szczególnie podstawami i technologią docierania materiałów metalowych i ceramicznych oraz problemami kształtowania technologicznej warstwy wierzchniej.

# REZERWA POTENCJAŁOWA W UKŁADZIE KOMUNIKACJI – WYBRANE ASPEKTY

Marcin BEDNAREK<sup>\*</sup>, Tadeusz DĄBROWSKI<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Katedra Informatyki i Automatyki, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Rzeszowska, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, fax (17) 854 29 10, e-mail: <u>bednarek@prz.rzeszow.pl</u> <sup>\*\*</sup>Instytut Systemów Elektronicznych, Wydział Elektroniki, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, fax (22) 683 91 25, e-mail: <u>tdabrowski@wel.wat.edu.pl</u>

#### Streszczenie

Scharakteryzowano wybrane zagadnienia związane z potencjałowym ujęciem eksploatacji układu komunikacji. Podano przykłady charakterystyk niezbędnej rezerwy potencjałowej w funkcji prawdopodobieństwa udanego przesyłu zbioru komunikatów. Przytoczone charakterystyki mogą ułatwić odpowiednie zaprogramowanie systemu dozorująco-terapeutycznego.

Słowa kluczowe: układ komunikacji, rezerwa potencjałowa.

## A POTENTIAL REDUNDANCY OF A COMMUNICATION SYSTEM – SELECTED ASPECTS

## Summary

The selected questions related to a potential approach of the operation of a communication system are discussed in the article. The examples of the characteristics of necessary potential redundancy in a function of the probability of successful transmission of messages set are given. They may be used to the required programming of the supervisor and therapeutic system.

Keywords: communication system, potential redundancy.

# 1. WPROWADZENIE

Przytoczone w referacie rozważania dotyczą układu potencjałowego ujęcia komunikacji łaczącego urządzenia komunikujące się poprzez sieć komputerową. Realizuje on przesył komunikatów cząstkowych - składających się na komunikat całościowy (zadanie globalne) - pomiędzy stacjami systemu. W przypadku rozproszonych systemów sterowania układ komunikacji łączy ze sobą stacje operatorskie, inżynierskie, diagnostyczne [5, 7, 9]. Z kolei, zgodnie i procesowe terminologią stosowaną w odniesieniu do Z systemów i urządzeń dozorujących stan w aspekcie bezpieczeństwa, układ komunikacji postrzegany jest jako "system transmisji alarmu: urządzenie i sieć przesyłania wykorzystywane do informacji dotyczącej stanu jednego lub większej liczby podsystemów alarmowych do jednego lub większej liczby alarmowych centrów odbiorczych" [12, 13]. W każdym z wymienionych przykładów mamy do czynienia z realizacją wymiany komunikatów (pomiędzy urządzeniami), od której oczekujemy wysokiej niezawodności.

Z punktu widzenia diagnozowania, czy też dokładniej prognozowania zachowania się układu komunikacji wymagane jest przede wszystkim zachowanie stanu zdatności zadaniowej, tzn. realizacja zadania globalnego (tj. komunikatu całościowego złożonego z komunikatów cząstkowych).

Potenciałowe ujecie eksploatacji układu komunikacji wprowadza pojęcia efektywności i efektu oraz potencjalności i potencjału [1÷4, 6, 11]. Krótko je wyjaśniając, posłużmy się skrótowym cytatem z [10]. "Chwilowa miara skutku (wyniku) działania układu jest efektywność (wydajność), natomiast chwilową miarą możliwości układu kontekście realizowanego zadania - jest w potencjalność. Wyróżnia się także wielkości opisujące przedziałowe miary skutków eksploatacyjnych i możliwości eksploatacyjnych układu komunikacji. Tymi wielkościami są odpowiednio efekt i potencjał. W rozważanym tu przypadku zadania użytkowego polegającego na potrzebie przesłania określonej liczby komunikatów cząstkowych (składających się na komunikat całościowy globalny) posługujemy się pojęciami potencjału i efektu odpowiednio cząstkowego oraz globalnego."

Czynniki destrukcyjne powodują niszczenie części przesyłanych komunikatów cząstkowych. Dlatego powinien istnieć pewien nadmiar potencjału potrzebny do uzupełnienia zniszczonych komunikatów cząstkowych. Aby układ pozostawał w stanie zdatności zadaniowej, nadmiar ten - tzn. potencjałowa powinien zostać rezerwa uruchomiony (wykorzystany) gdy tylko pojawia się taka potrzeba i występuje odpowiednia rezerwa czasowa. Jeżeli wszystkie zamówione zadania (komunikaty cząstkowe) zostaną przesłane w wymaganym czasie można mówić o utrzymaniu zdatności zadaniowej układu komunikacji.

Moduł gromadzący efekty cząstkowe (urządzenie adresata), postrzega efekt globalny (komunikat całościowy - globalny) jako sumę arytmetyczną efektów cząstkowych (komunikatów cząstkowych). Oznacza to, że kolejne, poprawnie przesłane komunikaty cząstkowe zwiększają gromadzony efekt globalny. Błąd przesyłu komunikatu cząstkowego nie powoduje utraty dotychczas zgromadzonego efektu. Element gromadzący efekt zatrzymuje poprawnie przesłane komunikaty i umożliwia wykonanie powtórnych transmisji komunikatów cząstkowych zdiagnozowanych jako błędne.

#### 2. NIEZBĘDNA REZERWA POTENCJAŁOWA

Jak wspomniano we wprowadzeniu, dla utrzymania zdatności zadaniowej układu komunikacji, w przypadku zakłóceń w przesyle komunikatów cząstkowych, powinna istnieć pewna rezerwa potencjałowa umożliwiająca uzupełnienie efektu globalnego do niezbędnej wartości. Oznacza to, że niezbędna jest rezerwa potencjałowa, której wartość może być określona potencjałem destrukcyjnym zmierzającym do zniszczenia wszystkich komunikatów cząstkowych tj.:

$$\Delta F_{Pn} = F_{P\,destr} \tag{1}$$

gdzie:

 $F_{P destr}$  - potencjał **destrukcyjny** - wyrażony liczbą niszczonych komunikatów cząstkowych ( $n_{nzre}$ ),

lub też jako różnica wartości potencjału wymaganego do zrealizowania zadania użytkowego [14] i potencjału niezbędnego:

$$\Delta F_{Pn} = F_{Pwym} - F_{Pnzb} \tag{2}$$

gdzie:

- $F_{P wym}$  potencjał **wymagany** wyrażony liczbą  $n_{rea}$  zadań cząstkowych, które **należy wykonać** w wymaganym czasie w celu zapewnienia zdatności zadaniowej;
- $F_{P_{nzb}}$  niezbędny potencjał wyrażony liczbą zamówionych zadań cząstkowych ( $n_{zre}$ ).

Niezbedna rezerwa potenciałowa wyraża sie wiec liczbą zadań, które należy dodatkowo uruchomić, aby zwiększyć wartość potencjału wykonawczego do wartości zamówionej przez odbiorcę. Znając wartość pojedynczego nieuszkadzalności komunikatu cząstkowego, oraz rozkład prawdopodobieństwa zmiennej losowej w postaci liczby komunikatów cząstkowych przesłanych poprawnie lub błędnie dla założonej wartości "progu ufności" dostarczenia komunikatu globalnego (całościowego) można, sumując oszacowane wartości zrealizowanych zadań dla każdej "z powtórek" transmisji, określić wartość niezbędnej rezerwy potencjałowej. Rys. 1 przedstawia przykładowe wartości rezerwy (wysokość słupków *n* ponad osią *p*) dla trzech różnych liczb komunikatów zamówionych i różnych założonych prawdopodobieństw realizacji poprawnego przesyłu zbioru komunikatów (zamieszczone przykłady zostały zrealizowane przy założeniach zawartych w [11, 14]).





Rys. 1. Tendencja zmian niezbędnej rezerwy potencjałowej dla wybranych wartości prawdopodobieństwa (*p*) dostarczenia całościowego (globalnego) komunikatu i liczby zamówionych komunikatów czastkowych (*n*<sub>-re</sub>)

#### 3. NIEZBĘDNA WZGLĘDNA REZERWA POTENCJAŁOWA

Innym wskaźnikiem diagnostycznym przydatnym w podejmowaniu decyzji terapeutycznych przez system realizujący wysyłanie komunikatów cząstkowych jest wartość niezbędnej względnej rezerwy potencjałowej wyrażonej jako:

$$\delta F_{Pn} = \frac{\Delta F_{Pn}}{F_{Pnzb}} 100\% \tag{3}$$

Wskaźnik ten określa procentowo liczbę zadań realizowanych dodatkowo (ze względu na występujące błędy realizacji) w stosunku do liczby zadań zamówionych. Przykłady niezbędnej względnej rezerwy potencjałowej dla przyjętych wcześniej liczb komunikatów z rys. 1 przedstawiono na rys. 2. Można zauważyć, że dla zilustrowanego przypadku, liczba zadań niezrealizowanych, która powinna być "pokryta" przez zadania w ramach wykorzystania niezbędnej rezerwy potencjałowej, rośnie wolniej od liczby zamówionych zadań przy założonym progu ufności (tutaj: 0,99) dostarczenia komunikatu całościowego (tj. zadania globalnego).





Istotne informacje o zmianach wartości niezbednej względnej rezerwy potencjałowej w zależności od prawdopodobieństwa dostarczenia zamówionej liczby komunikatów przy "sztywno" przyjętej wartości nieuszkadzalności pojedynczego komunikatu (np. wyznaczonej wcześniej doświadczalnie) można uzyskać z wykresów kołowych przedstawionych na rys. 3. Na tej podstawie "inteligentny" system dozorującoterapeutyczny może podjąć decyzję terapeutyczną w sytuacji niedoboru czasu (np. może obniżyć wartość progu ufności dostarczenia komunikatów czastkowych).

## 4. POTENCJAŁ DESTRUKCYJNY

Jak wspomniano w p. 2. wartość niezbędnej rezerwy potencjałowej równa jest wartości potencjału destrukcyjnego. Ten ostatni wyraża się liczbą niezrealizowanych zadań cząstkowych. Zatem informacja o niezrealizowanych przesyłach komunikatów cząstkowych może być pomocna w prognozowaniu wartości rezerwy potencjałowej niezbędnej do uzupełnienia zniszczonych komunikatów. Ilustracją tego zagadnienia jest zależność maksymalnej liczby niezrealizowanych zadań (co charakteryzuje potencjał destrukcyjny) od wartości nieuszkadzalności pojedynczego komunikatu założonej wartości przy nieuszkadzalności komunikatu całościowego (rys. 4). Z podanych graficznie przebiegów można graniczne odczytać (oszacować) wartości nieuszkadzalności pojedynczego komunikatu dla założonej wartości potencjału destrukcyjnego.









dobieństwa p = 0,99 dostarczenia całościowego komunikatu składającego się z  $n_{zre} = 150$  komunikatów cząstkowych

## 5. ZAKOŃCZENIE

Przedstawione zależności i wyznaczone na ich podstawie wartości mogą być traktowane jako

predefiniowane parametry, wykorzystywane do sterowania procesem wysyłania komunikatów przez system dozorująco-terapeutyczny układu komunikacji.

Informacja ta może być przydatna dla projektanta scenariusza wvmian komunikatów driver'a komunikacyjnego celu odpowiedniego w zaprojektowania działania komunikacji oraz układu bieżąco diagnozująco-terapeutycznego na modyfikującego proces wymiany komunikatów. Dodatkowymi informacjami ułatwiającymi zaprojektowanie działania układu komunikacji sa nieuszkadzalności zależności (rys. 5) zadania globalnego w funkcji nieuszkadzalności zadania czastkowego dla różnej maksymalnej liczby niezrealizowanych zadań cząstkowych.



Rys. 5. Zależność pomiędzy nieuszkadzalnością zadania globalnego (komunikatu całościowego)  $R_s = p$  a nieuszkadzalnością zadania cząstkowego (pojedynczego komunikatu)  $R_e$ 

# LITERATURA

- Bednarek M., Będkowski L., Dąbrowski T.: Wieloprocesowe ujęcie eksploatacji układu komunikacji. Diagnostyka, nr 34/2005, str.31-36.
- [2] Bednarek M., Będkowski L., Dąbrowski T.: Charakterystyka układu komunikacji jako wielozadaniowego obiektu diagnozowania. Materiały XXXIII Sympozjum "Diagnostyka Maszyn". Węgierska Górka, 06.÷11.03.2006.
- [3] Dąbrowski T.: Diagnozowanie systemów antropotechnicznych w ujęciu potencjałowoefektowym. WAT, Warszawa 2001.
- [4] Bednarek M., Będkowski L., Dąbrowski T.: Układ komunikacji jako obiekt wielozadaniowy typu sieć - w ujęciu potencjałowym. Materiały XXXIV Zimowej Szkoły Niezawodności. Szczyrk, 9÷14.01.2006, str. 31-40.
- [5] Modicon Modbus Protocol Reference Guide. Modicon, June 1996.
- [6] Bednarek M., Będkowski L., Dąbrowski T.: Wybrane wskaźniki realizacji zadań globalnych złożonych z komunikatów cząstkowych. Materiały XXXIII Sympozjum "Diagnostyka Maszyn". Węgierska Górka, 06.÷11.03.2006.

- [7] Bednarek M., Będkowski L., Dąbrowski T.: *Procedury przeciwdestrukcyjne układu komunikacji w ujęciu wieloprocesowym*. Materiały XXXIII Sympozjum "Diagnostyka Maszyn". Węgierska Górka, 28.02÷05.03.2006.
- [8] Będkowski L., Dąbrowski T., Bednarek M.: Niedomiar potencjalności przeciwdestrukcyjnej systemu katalizatorem niezdatności. Materiały XXXIII Zimowej Szkoły Niezawodności. Szczyrk, 9÷16.01.2005, str. 32-43.
- [9] Bednarek M.: Analiza niezawodności systemu programowalnego w ujęciu wieloprocesowym. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, Z. 3 (143), vol. 40, Radom 2005, str. 47-60.
- [10] Bednarek M., Będkowski L., Dąbrowski T.: Układ komunikacji jako obiekt diagnozowania w ujęciu potencjałowo-efektowym. Diagnostyka, nr 1(37)/2006.
- [11] Bednarek M., Będkowski L., Dąbrowski T.: Potencjałowe wskaźniki niezawodności przesylu zbioru komunikatów. Diagnostyka, nr 1(37)/2006.
- [12] Wójcik A.: Mechaniczne i elektroniczne systemy zabezpieczeń. Verlag Dashöfer, Warszawa 2001.
- [13] Norma PN-EN 50131-1.
- [14] Bednarek M., Będkowski L., Dąbrowski T.: Dozorowanie układu komunikacji w ujęciu potencjałowym. Diagnostyka, nr 33/2005, str. 13-18.



Tadeusz hab. inż. Dr **DABROWSKI** jest zatrudniony stanowisku profesora na nadzwyczajnego i pełni funkcję dyrektora Instytutu Systemów Elektronicznych Wydziału Elektroniki WAT. Zainteresonaukowe koncentruje wania w obszarze teorii eksploatacji głównie diagnostyce na

technicznej. Do ważniejszych zagadnień, którymi się zajmował i/lub zajmuje należą: diagnostyka systemów antropotechnicznych (w aspekcie użytkowym i bezpiecznościowym); optymalizacja procesów diagnostyczno-obsługowych; komputerowe wspomaganie procesu diagnostyczno-obsługowego.



Dr inż. Marcin BEDNAREK jest absolwentem Wydziału Elektrycznego, Politechniki Rzeszowskiej. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał na Wydziałe Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Pracuje na stanowisku adiunkta w Katedrze Informatyki i Automatyki Wydziału

Elektrotechniki i Informatyki, Politechniki Rzeszowskiej. Głównym obszarem jego zainteresowań jest diagnostyka systemów, komunikacja w sieciach komputerowych oraz wizualizacja procesów.

# IDENTYFIKACJA NIEWYWAŻENIA WIRNIKÓW OKRĘTOWYCH TURBINOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH W TRYBIE OFF LINE

Andrzej GRZĄDZIELA

Zakład Napędów Okrętowych, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów, Wydział Mechaniczno – Elektryczny, Akademia Marynarki Wojennej 81-103 Gdynia, ul. Śmidowicza 69 tel. (58) 626 27 24, e-mail a.grzadziela@amw.gdynia.pl

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono metodę nadzoru wibroakustycznego okrętowych turbinowych silników spalinowych. Analiza rejestrowanych parametrów umożliwia identyfikację niewyważenia układów wirnikowych oraz określa tolerowane wartości symptomów. Przedstawiona metoda pozwala na archiwizację i przetwarzanie danych pomiarowych dla potrzeb diagnozowania silników.

Słowa kluczowe: turbinowy silnik spalinowy, diagnostyka techniczna, drgania, baza danych.

# IDENTYFICATION OF ROTOR UNBALANCING OF GAS TURBINE ENGINES USING OFF LINE PROCEDURESS

#### Summary

Paper presents a vibration method of engineering supervision of marine gas turbine engines. Analysis of measured parameters enables diagnosis of rotors unbalancing and indicates tolerated values of diagnosing symptoms. Presented method, makes possible to keep store and data processing for diagnosing process of engines.

Keywords: gas turbine engines, technical diagnostics, vibration, data base.

#### 1. WPROWADZENIE

podstawowych Jednym zagadnień z diagnozowania okrętowych turbinowych silników kontrola dopuszczalnego spalinowych jest niewyważenia wirników [1, 5]. Wielosymptomowe badania diagnostyczne na okrętach Marynarki Wojennej RP są realizowane w tym zakresie od ponad 20 lat. Powstały Zespół Diagnostyczny Okrętowych Turbinowych Silników Spalinowych realizował badania na 4 typach silników [2]. W przypadku napędu okrętów uderzeniowych procedury diagnostyczne są ograniczone z kilku przyczyn. Najważniejszą jest konieczność stałej gotowości do uruchomienia silnika związana z wymaganiami taktyczno - technicznymi. Inne to o parametrach braku dotyczace informacji konstrukcyjnych, ograniczeniach W zakresie gwarancji oraz niepełna baza zestawów naprawczych. W referacie przedstawiono metode identyfikacji przekroczenia tolerowanych wartości niewyważenia wirników okrętowych turbinowych silników spalinowych.

# 2. OBIEKTY I WARUNKI BADAŃ

W skład jednostek pływających Marynarki Wojennej RP objętych stałym bazowym systemem diagnostycznym wchodzą obecnie fregaty typu Oliver Hazard Perry oraz korwety rakietowe projektu 1241 RE. Oba projekty okrętów wyposażone są w kombinowane układy napędowe typu COGAG. Siniki główne jednostek projektu 1241 RE są 3 wirnikowymi silnikami turbinowymi typu DR 76 i DR 77 natomiast fregaty wyposażone zostały w 2 wirnikowe silniki typu LM 2500.

Fregaty typu Oliver Hazard Perry wyposażone zostały w okrętowy system monitoringu, który mierzy drgania silników przetwornikami zamocowanymi do wspornika łożyska środkowego wytwornicy spalin (sygnał GG) - rys. 1 oraz do wspornika łożyska tylnego turbiny napędowej (sygnał PT). Parametrem diagnostycznym jest wartość (peak - to - peak) skuteczna przemieszczeń drgań wyzwalana synchronicznie od prędkości obrotowej wirników wytwornicy spalin - GG oraz turbiny napędowej - PT. Określone wartości sygnałów ostrzegających (warning sign) alarmowych (shutdown) reagują tylko na i przekroczenie tolerowanych wartości. System nie realizuje procedur analizy trendu zmian, relacji poszczególnych harmonicznych oraz wartości harmonicznych charakterystycznych dla poszczególnych stopni wirnikowych. Nie posiada również standardowej procedury umożliwiającej swobodny dostęp do analizowanych parametrów, w tym drganiowych.



Rys. 1. Miejsce montażu akcelerometru nad wytwornicą spalin

Dla potrzeb opracowanego w AMW systemu diagnostycznego wstępną analizę trendu parametrów drganiowych oparto jedynie o parametry producenta. Takie podejście umożliwiło wykorzystanie archiwizowanych wyników pomiarów przez okrętowy system pomiarowy. Badania drganiowe, według standardów producenta silników, obejmują wykonanie pomiaru wartości skutecznej przemieszczeń drgań w wymiarze [mils], co oznacza 1/1000 cala. Analiza obejmuje zakres częstotliwości odpowiadającej I harmonicznej prędkości obrotowej wytwornicy spalin - (GG/GG) i (GG/PT) oraz turbiny napędowej - (PT/PT) i (PT/GG), mierzonych jednocześnie przetwornikami zamontowanymi na wspornikach środkowego łożyska wytwornicy spalin oraz tylnego łożyska turbiny napedowej.

W celu uzyskania wiarygodnych parametrów diagnostycznych, badania własne turbinowych silników spalinowych LM 2500 realizowane przez zespół z Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów oparto o model diagnostyki wielosymptomowej, której jednym z zasadniczych elementów jest rejestracja oraz analiza sygnałów wibroakustycznych.

Identyfikację symptomów diagnostycznych oraz ocene ich wrażliwości przeprowadzono poprzez uproszczonych wirników. analize modeli Rozpatrywane badania dotyczyły wyłącznie niewyważenia dynamicznego jako podstawowego źródła reakcji na podporach w przypadku pracy wirników Schemat procesu niewyważonych. decyzyjnego wykorzystywanego dla identyfikacji niewyważenia wirników przedstawiono na rys. 2.

Układy napędowe korwet 1241 RE nie zostały wyposażone w systemy monitoringu drgań. Identyfikacja niewyważenia wirników jest realizowana w oparciu o zalecenia producenta oraz badania własne. Rejestrację sygnałów dokonano mocując czujniki drgań typu akcelerometrycznego B&K 4383 na kołnierzu sprężarki niskiego ciśnienia prostopadle do osi wirowania – rys. 3.



Rys. 2. Schemat przyjętego procesu decyzyjnego



Rys. 3. Miejsce montażu przetworników drgań na silnikach DR 76 i DR 77

Przyjęta metodyka badań zakłada przeprowadzenie pomiarów wartości skutecznej prędkości drgań (Yrms) oraz analizy harmonicznej, w wyniku której określa się wartości sygnałów podstawowych od prędkości SNC (sprężarki niskiego ciśnienia), SWC (sprężarki wysokiego ciśnienia). W trakcie badań realizowanych według własnej metodyki dokonano analizy bezwymiarowych współczynników niewyważenia wirników tj:

 a) S 1 – czyli stosunku wartości uśrednionej amplitudy prędkości drgań odpowiedniego wirnika (I harmoniczna) do składowej odpowiadającej II harmonicznej częstości wymuszeń odpowiedniego wirnika;

 b) S 2 - czyli stosunku wartości uśrednionej amplitudy prędkości drgań odpowiedniego wirnika (I harmoniczna) do składowej odpowiadającej III harmonicznej częstości wymuszeń odpowiedniego

Minimalne wartości parametrów S1 i S2 przy obciążeniach nominalnych wynoszą odpowiednio:

- dla silników DR 76 i DR 77:
- $S1_{SNC} = \min 1,0$
- $S2_{SNC} = \min 1.5$
- $S1_{SWC} = min 1,0$
- $S2_{SWC} = \min 1.5$

gdzie: SNC – sprężarka niskiego ciśnienia, SWC – sprężarka wysokiego ciśnienia.

# 3. REALIZACJA POMIARÓW

Na silnikach LM 2500 badania wykonuje się w pobliżu punktów pomiarowych, które przyjął w procedurze monitoringu producent. Istotą wyboru miejsca montażu przetwornika było wyeliminowanie zakłóceń sygnałów. W przypadku łożysk nośnych wirników należało kierować się wyborem takiego wspornika oprawy łożyska, który wewnątrz nie posiada kanałów innych mediów. Jedynym takim elementem jest wspornik nr 5 ("PUSTY") - rysunek 4. Uchwyt akcelerometru dla potrzeb badań własnych został zamontowany nad tym elementem.



Rys. 4. Miejsce montażu czujnika drgań

Na podstawie analizy przydatności parametrów drganiowych, dla relacji "defekt - symptom", jako sygnały użyteczne dla silników LM 2500 wytypowano wartość pierwszej harmonicznej amplitudy prędkości drgań związanej ze sprężarką wytwornicy spalin -  $Y_{GG}$  [mm/s], turbiny napędowej –  $Y_{PT}$  [mm/s] oraz wartości skuteczne amplitud przyspieszeń drgań  $Y_{X-st}$  [mm/s<sup>2</sup>] charakterystyczne dla częstotliwości poszczególnych stopni wirników.

W celu opracowania jednolitych procedur oceny niewyważenia wirników silników turbinowych o różnym stopniu zużycia eksploatacyjnego przyjęto koncepcję znalezienia bezwymiarowych parametrów charakteryzujących ten stan. Biorąc pod uwagę analizę teoretyczną wymuszeń oraz wyniki badań nadzoru diagnostycznego, jako najbardziej wrażliwe symptomy stanu wytypowano [3]: S 1 – stosunek wartości uśrednionej amplitudy prędkości drgań odpowiedniego wirnika (I harmoniczna) do składowej odpowiadającej II harmonicznej częstości wymuszeń odpowiedniego wirnika i S2 - stosunek wartości uśrednionej amplitudy prędkości drgań odpowiedniego wirnika (I harmoniczna) do składowej odpowiadającej III harmonicznej częstości wymuszeń odpowiedniego wirnika.

Dla potrzeb organizacyjnych parametry drganiowe podzielono na 3 grupy – Tabela 1.

W przypadku silników DR 76 i DR 77 idea miejsca montażu pozostała ta sama przy uwzględnieniu odmienności konstrukcji Przetworniki drgań zamontowano wykorzystując uchwyty stalowe własnej konstrukcji umieszczone nad przednim łożyskiem nośnym wirnika sprężarki niskiego ciśnienia. Uchwyty zostały wykonane tak, aby częstotliwość rezonansowa w osi pomiarowej nie nakładała się na podstawowe harmoniczne związane

z prędkościami obu wirników. Kierunek pomiaru określono jako prostopadły do osi wirowania. montażu Wyboru kierunku akcelerometrów dokonano uwzględniając analize teoretyczna wymuszeń wynikających wirowania Ζ niewyważonego wału oraz w oparciu o dokonane wcześniej badania wstępne na innych obiektach [3, 4]. Identyfikacja niewyważenia wirników silników DR 76 i DR 77 jest realizowana przy jednoczesnym spełnieniu wymogów producenta oraz analizy bezwymiarowych symptomów niewyważenia S1 i S2.

Tab.1. Podział grup symptomów dla silników LM 2500

Grupa	Parametry drganiowe								
1	I harmoniczna GG/GG [mm/s],								
	I harmoniczna GG/PT [mm/s],								
	I harmoniczna PT/GG [mm/s],								
	I harmoniczna PT/PT [mm/s],								
2	S1 GG [-], S2 GG [-], S1 PT [-], S2 PT [-]								
3	wartości skuteczne amplitudy								
	przyspieszeń drgań częstotliwości								
	charakterystycznych dla poszczególnych								
	stopni wirnikowych wytwornicy spalin.								

# 4. ANALIZA TRENDU SYMPTOMÓW DIAGNOSTYCZNYCH

Analiza dokumentacji eksploatacyjnej sprzed przejęcia do Polskiej Marynarki Wojennej silników LM 2500 pozwoliła wykorzystanie na wcześniejszych wyników badań dla procesu diagnozowania. W trakcie realizowanych badań własnych dokonano uproszczenia polegającego na przyporządkowaniu stanu technicznego silnika po remoncie (a właściwie wartości jego symptomów) do silnika fabrycznie nowego. Tego typu uproszczenia dokonano ze względu na niewielka liczbę badanych obiektów. W celu skrócenia czasu podejmowania decyzji oraz uruchomienia aktywnej bazy danych rozpatrywanych parametrów drganiowych przygotowano oprogramowanie ANALIZA, którego zadaniem jest archiwizacja i przetwarzanie danych pomiarowych dla potrzeb identyfikacji stanu technicznego układów wirnikowych badanych silników. Organizacja przesyłu danych została przedstawiona na rys. 5.



Rys. 5. Organizacja danych w programie ANALIZA

Przygotowany program przetwarza pliki rejestrowane przez system w formie widmowej do poziomu macierzy kolumnowej, w której I kolumna oznacza wartość środkowa częstotliwości, Π nastepne kolumny wartości rozpatrywanego i drganiowego (wartość symptomu skuteczna amplitudy predkości lub przyspieszeń drgań w zależności od grupy symptomu). Każdy z plików ma specyficzną i rozpoznawalną przez program nazwę, która zawiera informację o okręcie, silniku oraz obciążeniu, przy którym dokonano rejestracji drgań. Pozostałe informacje dotyczące sposobu rejestracji są zawarte w nagłówku pliku i rozpoznawalne w procesie obróbki danych. Analizowane widma są rozpatrywane dla dwóch częstotliwości próbkowania  $f_1 = 800 \text{ Hz} - \text{dla oceny}$ 

niewyważenia wirników oraz parametrów S1, S2 i  $f_2$  = 12800 Hz – dla oceny częstotliwości łopatkowych poszczególnych stopni wirnikowych. Ocena trendu zmian badanych parametrów silników LM 2500 wszystkich grup rozpatrywanych symptomów odbywa się jako funkcja czasu eksploatacji przy zmiennej, jaką jest data pomiaru – rys. 6.

Druga procedura diagnostyczna sprowadza się do wykonania charakterystyki prędkościowej rozpatrywanych parametrów – relacji "parametr drganiowy – prędkość obrotowa wirnika wytwornicy spalin". Badania przeprowadza się w stanach ustalonych dla prędkości obrotowych wirnika wytwornicy spalin wynoszących  $n_{GG} = 5000, 6000,$ 7000, 8000 i 9000 obr/min – rys. 7.

Powstałe charakterystyki prędkościowe wszystkich parametrów drganiowych archiwizuje się w postaci 3 D – wymiarowych wykresów gdzie zmiennymi są parametr drganiowy, prędkość obrotowa wytwornicy spalin oraz czas pracy silnika pomiędzy kolejnymi pomiarami.

Identyfikacja niewyważenia wirników niskiego i wysokiego ciśnienia w silnikach DR 76 i DR 77 odbywa się w sposób podobny. Symptomy określone przez producenta analizuje się pod względem nie tylko czasu eksploatacji ale również pod względem aktualnego obciążenia silnika – rys. 8.



Rys. 6. Analiza trendu symptomów S1 i S2 dla wytwornicy spalin



Rys. 7. Charakterystyka prędkościowa parametrów S1 i S2



Rys. 8. Analiza trendu parametrów  $Y_{SNC}$  i  $Y_{SWC}$  silnika DR 76

Również analiza bezwymiarowych symptomów niewyważenia jest realizowana jako funkcja czasu eksploatacji dla każdego z obciążeń eksploatacyjnych – rys, 9.



Rys. 9. Analiza bezwymiarowych symptomów niewyważenia dla przykładowego silnika DR 77

# 5. WNIOSKI

Analiza parametrów rejestrowanych przez okrętowy system monitoringu dla silników LM 2500 umożliwiających nie wykazała zależności jednoznaczne przypisanie zmian wartości któregokolwiek z parametrów z czasem eksploatacji [6]. Zastosowanie opracowanej w AMW metody wykazało wrażliwość wytypowanych analizy symptomów na procesy zużycia, w tym powstałego niewyważenia, co pozwoliło na bardziej racjonalne gospodarowanie czasem użytkowania silników w okresach przedremontowych. Realizacja badań w cyklu półrocznym dostarczyła danych dla realizacji docelowo nowego systemu monitoringu, którego może funkcjonowanie znacznie podwyższyć niezawodność układu napędowego okrętów.

Wdrożony drganiowy system analizy niewyważenia wirników na korwetach 1241 RE zaowocował bezawaryjną pracą całej populacji silników od roku 1989. Wszystkie niesprawności układów wirnikowych zostały znacznie wcześniej zidentyfikowane uniemożliwiając powstanie uszkodzeń katastroficznych.

Analiza wyników pozwoliła na przedstawienie następujących wniosków szczegółowych:

- 1. proponowana koncepcja diagnozowania metodą drganiową umozliwia szybkie uzyskanie oceny stanu technicznego wirników.
- wdrożenie koncepcji oceny stanu technicznego okrętowych turbinowych silników spalinowych w oparciu o analizę trendu wybranych parametrów wibroakustycznych pozwala na wysoce prawdopodobne i wczesne wykrycie niewyważenia wirników oraz stworzenie

wiarygodnej bazy danych dla systemu diagnozowania *on - line*.

 badania trendu rozpatrywanych parametrów pozwalają opracowanie relacji prognozujących zmiany stanu technicznego, co jest szczególnie istotne w przypadku silników o zaawansowanym zużyciu.

# 6. LITERATURA

- Downham E., Woods R.: *The rationale of* monitoring vibration on rotating machinery, ASME Vibration Conference, Paper 71- Vib-96, September 1971.
- [2] Charchalis A., Pojawa B.: Wpływ pogorszenia się stanu technicznego okrętowego turbinowego silnika spalinowego na jego charakterystyki

*rozruchowe*. XXVII DIAGNOSTYKA MASZYN 2000.

- [3] Grządziela A., Charchalis A.: Diagnosing of naval gas turbine rotors with the use of vibroacoustic parameters. International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management COMADEM 2001, Manchester, UK, pp 495 – 502.
- [4] Grządziela A., Charchalis A.: Diagnosing of naval gas turbine rotors with the use of vibroacoustic parameters. The 2001 International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering. The Hague, The Netherands 2001, pp. 268.
- [5] Orłowski Z.: Diagnostyka w życiu turbin parowych. WNT. Warszawa 2001. ISBN 83-204-2642-1.



Dr inż. Andrzej GRZĄDZIELA jest Kierownikiem Zakładu Napędów Okrętowych w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów Wydziału Mechaniczno – Elektrycznego Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni. W swojej działalności zawodowej zajmuje się problemami oceny niewyważenia i oceny współosiowości w okrętowych układach napędowych a także projektowaniem okrętów i doborem układów napędowych. Członek Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej oraz Polskiego Towarzystwa Naukowego Silników Spalinowych.

# METODY POMIARU PRZEPŁYWU NA MAŁYCH OTWARTYCH KANAŁACH PRZEPŁYWOWYCH

Andrzej MICHALSKI<sup>1,2</sup>, Jan SIENKIEWICZ<sup>1</sup>, Zbigniew WATRAL<sup>1</sup>

<sup>1)</sup> Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, <u>jsienkiewicz@wel.wat.edu.pl</u> <sup>2)</sup> Politechnika Warszawska, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno Pomiarowych

#### Streszczenie

W referacie przedstawiono potrzeby oraz metody monitorowania przepływu cieczy na małych otwartych kanałach przepływowych i sposoby realizacji tych przedsięwzięć. Główną uwagę przy pomiarze przepływu zwrócono na metody: hydrauliczne, ultradźwiękowe, elektromagnetyczne i optyczne. Omówiono zasady pomiaru natężenia przepływu cieczy tymi metodami ich wady i zalety oraz ustosunkowano się do niepewności pomiaru. Omówione także metody pomiaru przepływu i wskazano na predyspozycje poszczególnych metod do konkretnych zastosowań praktycznych.

Słowa kluczowe: przepływ, pomiar przepływu, metody pomiaru.

#### EVALUATION OF FLOW MONITORING METHODS IN SMALL OPEN CHANNELS

#### Summary

Presented paper describes the needs and the methods of water flow monitoring in small open channels. The main attention in the paper was paid to hydraulic, acoustic, electromagnetic and optics methods. The good points, flaws and error analysis of the described methods are presented. The practical application and comparison of described methods are given as a summary.

Keywords: flow, flow measurement, measuring methods.

# 1. WSTĘP

Pomiar natężenia przepływu wody w kanałach otwartych jest jednym z podstawowych pomiarów dokonywanych w hydrologii. Cel prowadzonych jest wieloraki, pomiarów uzyskane wvniki wykorzystywane są między innymi do: prognozowania zagrożeń (susza, stany powodziowe itp.), sterowania zapasami wody w zbiornikach retencyjnych, prognozowania stanów pracy dla wodnej energetyki żeglugi śródlądowej, i kontrolowania stanu nawodnienia terenów objętych siecią kanałów melioracyjnych, prognozowanie stanów krytycznych na terenach polderowych.

każdym z przedstawionych W powyżej wymagane sa inne dokładności przypadków pomiarów. Generalnie można liczyć sie z niepewnościami pomiarów w granicach od ±1% do ±10% w zależności od stosowanych metod. Pomimo rozwoju wielu metod pomiarowych oraz wprowadzenia udoskonalonych narzędzi pomiarowych, w wielu przypadkach uzyskiwane niepewności pomiaru nie są satysfakcjonujące. Obserwowany rozwój narzędzi pomiarowych stosowanych w szeroko rozumianej hydrologii ma przede wszystkim na celu zwiększenie dokładności prowadzonych pomiarów oraz zapewnienie ich rzetelności. Szczególnie istotne jest to w stanach awaryjnych, (np. fala powodziowa), kiedy to dotychczasowe techniki były nieskuteczne bądź uzyskiwany wynik pomiaru był obarczony zbyt dużą niepewnością.

W ostatnich trzydziestu latach pojawiło się szereg nowych rozwiązań technicznych wykorzystujących dotychczas nie stosowane techniki pomiarowe, takie jak optyczne, elektromagnetyczne i ultradźwiękowe. Wspólną cechą tych metod, zwanych potocznie "metodami współczesnymi", jest wykorzystywanie zaawansowanych technik przetwarzania sygnałów w procedurze pomiarowej.

Stosowane w pomiarach przepływu metody można podzielić ze względu na ich cechy charakterystyczne na dwie podstawowe grupy wieloparametrowe i jednoparametrowe. W ramach tych grup zazwyczaj dokonuje się dodatkowego podziału uwzględniającego częstotliwość pomiarów, na metody dorywcze i ciągłe. Wśród metod wieloparametrowych dominującą metodą, zarówno w grupie pomiarów ciągłych jak i dorywczych, jest metoda prędkość - powierzchnia. W metodach dorywczych poza metodą predkość - powierzchnia wyróżnia się metody pływakowe oraz metodę spadek-powierzchnia. W pomiarach ciągłych, w grupie metod predkość - powierzchnia coraz istotniejszą rolę pełnią metody ultradźwiękowa, elektromagnetyczna oraz optyczna [1].

W metodach jednoparametrowych stosuje się analogiczny podział na metody dorywcze i ciągłe. W grupie metod dorywczych wyróżnia się dwie metody, metodę *rozcieńczenia wskaźnika* i metodę *objętościową.* Do grupy pomiarów ciągłych zalicza się metody hydrauliczne spiętrzeniowe i zwężkowe. W ramach tej podgrupy, występujący podział związany jest z rodzajem wykorzystywanej budowli hydrologicznej: przelewy miernicze cienkościenne, przelewy miernicze o szerokiej koronie, zwężkowe koryta pomiarowe i przelewy swobodne.

Zakres stosowalności omawianych metod jest bardzo różny: od bardzo małych cieków naturalnych lub sztucznych kanałów przepływowych do rzek o szerokościach niekiedy osiągających setki metrów. Wybór metody dla danego stanowiska pomiarowego związany jest zawsze z określeniem oczekiwań związanych z jakością prowadzonych obserwacji.

Wśród tzw. współczesnych metod pomiaru przepływu wyróżnia się trzy podstawowe grupy metod: ultradźwiękową, optyczną i elektromagnetyczną. Wszystkie te metody należą do grupy metod prędkość – powierzchnia. Wśród tych metod dwie znajdują szerokie zastosowanie zarówno w praktyce terenowej jak i laboratoryjnej, są to metoda elektromagnetyczna metoda i ultradźwiękowa. Grupa metod optycznych znajduje się na początkowym etapie rozwoju, w zastosowaniu do cieków naturalnych, szczególnie, jeżeli analizuje się technikę PIV (ang. Particle Image Velocimetry). Dotychczas metody optyczne znajdowały główne swoje zastosowanie w pomiarach pól prędkości laboratoryjnych w sztucznych, kanałach przepływowych. Ostatnie 5 lat pokazuje, że można je z powodzeniem stosować w aplikacjach terenowych, na dużych rzekach lub naturalnych kanałach przepływowych.

Wszystkie wspomniane grupy metod pozwalają na ciągły pomiar prędkości medium, który jest dalej wykorzystywana w obliczeniach przepływu. Zasadnicza różnica pomiędzy nimi wynika ze zdolności do integracji pola prędkości. W tym aspekcie bezkonkurencyjna iest metoda elektromagnetyczna, której jedną z istotniejszych zalet jest naturalna możliwość integracji pionowej i poziomej pola prędkości w ustalonej strefie pomiarowej. Metoda ultradźwiękowa nie zapewnia integracji prędkości w całym przekroju pomiarowym kanału przepływowego, a jedynie uśrednia mierzoną prędkość na drodze ścieżki ultradźwiękowej w pionie lub w poziomie. Metoda optyczna ze zasady mierzy prędkość punktowa swojej niezależnie od techniki LDA (ang. Laser Doppler Anemometry) czy PIV. Jednak wykorzystując zaawansowane algorytmy przetwarzania sygnałów pomiarowych (PIV) lub odpowiedni osprzęt pomiarowy (LDA) uzyskuje się możliwość przestrzennej integracji pola prędkości. Cechą wspólną wszystkich trzech wspomnianych metod jest elektryczna postać wyjściowego sygnału pomiarowego, co znacznie zwiększa możliwości ich wykorzystania w zinformatyzowanych systemach kontrolno - pomiarowych [2].

Przedstawiony w artykule opis metod pomiaru przepływu w kanałach otwartych ma na celu

przeprowadzenie analizy przydatności każdej z omawianych metod do pomiaru przepływu w małych kanałach przepływowych, którymi mogą być kanały irygacyjne, małe cieki naturalne czy kanały dolotowe w oczyszczalniach ścieków.

## 2. METODY HYDRAULICZNE POMIARU PRZEPŁYWU

hydrauliczne Metody pomiaru natężenia przepływu wykorzystują zależności przepustowości przelewu, kanału ze zwężką lub innej budowli od jego napełnienia. Metody te znajdują główne zastosowanie w pomiarach na małych ciekach, kanałach melioracyjnych, przemysłowych kanałach zrzutowych itp. Pomiar wysokości spiętrzenia ponad krawędzią lub koroną przelewu daje informację o aktualnym przepływie w danym przekroju pomiarowym. W praktyce pomiarowej wyróżnia się cztery podstawowe typy konstrukcji przepływomierzy hydraulicznych: przelewy miernicze cienkościenne, przelewy z profilem zwężkowe kanały pomiarowe praktycznym, i swobodne przelewy [3, 4].

Przelewy miernicze cienkościenne wykonane są w postaci cienkiej płyty ustawionej prostopadle do dna, nad krawędzią, której przepływa woda. Mierząc wysokość poziomu wody ponad krawędzią można wyznaczyć przepływ (rys. 1).



Rys. 1. Przelew z ostrą krawędzią

Rozróżnia się pięć podstawowych typów przelewów cienkościennych: prostokątny bez zwężenia bocznego, prostokątny z obustronnym zwężeniem bocznym, trójkątny, trapezowy i półokrągły (rys. 2).

Przelew podlega laboratoryjnemu wzorcowaniu, w wyniku, którego uzyskuje się empiryczną relację pomiędzy wysokością spiętrzenia ponad krawędzią przelewu a wartością odpływu.



Rys. 2. Przelewy miernicze cienkościenne

Przelewy miernicze cienkościenne są stosowane w kanałach o szerokości do 5 m i głębokości do 1 m. Zakres mierzonych przepływów wynosi od zera do kilku metrów sześciennych na sekundę. Niepewność pomiaru przepływu nie przekracza  $\pm 1\%$  (dla przelewu trójkątnego).

Spośród przelewów z tzw. profilem praktycznym do pomiarów przepływu wody najszersze zastosowanie znajdują dwa typy, przelew o przekroju trójkątnym typu Crumpa oraz przelew o szerokiej koronie (rys. 3). Podstawową zaletą przelewu Crumpa jest stałość współczynnika wydatku w dużym przedziale pomiarowym, wysoki współczynnik zatopienia oraz duża zdolność tranzytu rumowiska dennego. Na większych ciekach, w celu otrzymania dostatecznej dokładności pomiaru przelewem Crumpa, jest stosowany w praktyce podział całego przelewu na kilka sekcji, których korony znajdują się na różnych poziomach. Sekcje te oddzielone są od siebie betonowymi przegrodami.

a)





Przelewy o szerokiej koronie są stosunkowo rzadko stosowane w praktyce pomiarowej.

W praktyce pomiarowej metod zwężkowych wykorzystuje się trzy typy zwężkowych kanałów pomiarowych, Venturiego, Parshalla oraz Saniiri (rys. 4.) Wprowadzając w sposób sztuczny zwężenie kanału przepływowego uzyskuje ścian sie spiętrzenie stanu wody powyżej zawężenia koryta. Wartość przepływu jest określana w oparciu o pomiar poziomu wody powyżej miejsca zawężenia. Relacja pomiędzy poziomem i przepływem jest ustalana teoretycznie oraz metodą wzorcowania. Koryta te budowane są o prostokątnym lub trapezowym przekroju zwężki. Zakres pomiarowy koryt wynosi od 0,01 m<sup>3</sup>/s do kilku m<sup>3</sup>/s w zależności od rozmiarów koryta. Jeden rozmiar koryta Parshalla ma zakres pomiarowy 1: 30, zaś koryta Venturiego 1: 100.

Kanały pomiarowe mają pewną zdolność tranzytu rumowiska dennego oraz wysoki współczynnik zatopienia do 75%. Najbardziej rozpowszechnione są kanały Venturiego, głównie w pomiarach przemysłowych oraz gospodarce komunalnej [2].



Rys. 4. Zwężkowe koryta pomiarowe

# 3. METODY ULTRADŹWIĘKOWE

Metoda ultradźwiękowa, zwana również metodą akustyczną, bazuje na analizie wpływu strumienia mierzonej cieczy na warunki propagacji fali ultradźwiękowej transmitowanej w strefie pomiarowej kanału przepływowego. Metoda ta wyróżnia się na tle innych metod szeregiem niezaprzeczalnych zalet:

- Nie wprowadza do przekroju pomiarowego żadnych zakłóceń w postaci struktur technicznych utrudniających potencjalną żeglugę, nie deformuje bryły przepływu poprzez obecność urządzeń pomiarowych.
- Umożliwia pomiar ciągły przy zapewnieniu integracji prędkości punktowych występujących na drodze ścieżki przelotu fali ultradźwiękowej oraz co wynika bezpośrednio z ciągłości pracy, jest naturalnie przystosowana do monitorowania chwilowych zmian prędkości (np. wezbrań).
- Umożliwia pomiar w bardzo szerokich granicach mierzonych prędkości, począwszy od milimetrów na sekundę, przy jednoczesnym braku jednoznacznie określonej granicy górnej mierzonej prędkości.
- Może być wykorzystywana do pomiaru przepływów cechujących się występowaniem zmiennego kierunku (np. spowodowanego występowaniem cofki).
- Zapewnia dobrą dokładność pomiaru, np. dla kanału przemysłowego niepewność pomiaru nie przekracza 0,5%, dla cieku naturalnego ok. 1%.
- Nie wymaga okresowej kalibracji.
- Wielkością wyjściową proporcjonalną do mierzonej prędkości jest sygnał elektryczny, co w sposób oczywisty ułatwia wykorzystanie

metody w terytorialnie rozproszonych komputerowych systemach kontrolno – pomiarowych.

 Koszt instalacji nie zależy od szerokości kanału przepływowego.

Szerokość kanałów przepływowych, które mogą być objęte ultradźwiękowym pomiarem prędkości, jest limitowana jedynie tłumiennością środowiska, w którym propagowana jest fala ultradźwiękowa. Typowym miejscem aplikacji ultradźwiękowej metody pomiaru przepływu, podobnie jak ma to miejsce w przypadku metody elektromagnetycznej, jest przekrój, gdzie brak jest zdeterminowanej relacji poziom - przepływ oraz istnieje możliwość występowania przepływów zwrotnych, nie ma możliwości, lub jest to ekonomicznie nieuzasadnione, budowy konstrukcji hydrotechnicznych. Jednak jak każda inna metoda nie jest wad. pozbawiona Jednym z zasadniczych problemów jest wpływ występujących gradientów temperatury lub stopnia zasolenia wzdłuż drogi przebiegu wiązki ultradźwiękowej na dokładność pomiaru. Dodatkowo sygnał ultradźwiękowy może być tłumiony przez zawiesiny występujące w przekroju hydrometrycznym, zaś ruchome dno naturalnych w ciekach może zmieniać charakterystykę przekroju pomiarowego, co w efekcie doprowadza do błędów w wyznaczaniu przepływu [5].

Wykorzystanie fali ultradźwiękowej do pomiaru przepływu (prędkości przepływu) opiera się na czterech podstawowych metodach:

- metodzie wykorzystującej różnicę czasów przejścia impulsu ultradźwiękowego w kierunku zgodnym i przeciwnym do kierunku płynącej wody,
- metodzie wykorzystującej zjawisko Dopplera,
- metodzie wykorzystującej zjawisko unoszenia impulsu ultradźwiękowego przez poruszające się środowisko,
- metodzie wykorzystującej zjawisko skorelowania szumów w dwóch odległych od siebie miejscach.

Pierwsza z metod wykorzystuje zmiany prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych (w kierunku innym niż prostopadły) w ośrodku poruszającym się z prędkością  $\mathcal{G}$  (rys. 5). Zmierzony czas przejścia impulsu na znanej długości drogi będzie różnił się od czasu jego przejścia w wodzie stojącej o tej samej temperaturze, zasoleniu, koncentracji rumowiska i głębokości. W metodzie tej informacja pomiarowa o predkości mierzonego medium może być zawarta w różnicy czasów przebiegu fali ultradźwiękowej pod prad i z pradem mierzonego medium, w różnicy faz odbieranych sygnałów lub W różnicy częstotliwości powtarzania impulsów (metoda krążącego impulsu).

Dla metody różnic czasów przebiegu fali ultradźwiękowej, czas przejścia impulsu ultradźwiękowego t<sup>+</sup> w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu wody (rys. 5 A  $\rightarrow$  B) będzie krótszy niż w przypadku pokonania takiej samej odległości w wodzie stojącej

$$t^{+} = \frac{L}{C_{w} + \vartheta_{r} \cos \alpha} \tag{1}$$

gdzie: L – długość ścieżki akustycznej (rys. 5),  $C_w$  – prędkość propagacji fali ultradźwiękowej w wodzie (ok. 1500 m/s),  $\mathcal{P}_r$  - średnia prędkość medium (wody) w strefie pomiarowej,  $\alpha$  - kąt, jaki tworzy ścieżka akustyczna z kierunkiem przepływu.



Rys. 5. Idea metody ultradźwiękowej pomiaru prędkości wody

Czas przejścia impulsu na tej samej drodze w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu wody (rys. 5 B  $\rightarrow$  A) t<sup>-</sup> będzie dłuższy niż w przypadku pokonania takiej samej odległości w wodzie stojącej.

$$t^{-} = \frac{L}{C_{w} - \theta_{r} \cos \alpha}$$
(2)

Różnica czasów przejścia impulsu ultradźwiękowego t i t<sup>+</sup> jest wprost proporcjonalna do poszukiwanej wartość prędkości  $\mathcal{G}_r$ 

$$\Delta t = t^{-} - t^{+} = \frac{L}{C_{w} - \vartheta_{r} \cos \alpha} - \frac{L}{C_{w} + \vartheta_{r} \cos \alpha} = \frac{2L\vartheta_{r} \cos \alpha}{C_{w}^{2}}$$
(3)

ponieważ  $C_w^2 >> (\vartheta_r \cos \alpha)^2$ .

Wyznaczając czas średni przejścia impulsu ultradźwiękowego  $t = \frac{t^+ + t^-}{2}$  można uzyskać zależność na  $\mathcal{G}_r$  nie będącą funkcją prędkości

zaleznose na  $\mathcal{G}_r$  nie będącą funkcją prędkosei propagacji fali ultradźwiękowej w wodzie.

$$t = \frac{t^{-} + t^{+}}{2} = \frac{1}{2} \left( \frac{L}{C_w - \vartheta_r \cos \alpha} + \frac{L}{C_w + \vartheta_r \cos \alpha} \right) = \frac{L}{C_w}$$
(4)

$$9_r = \frac{\Delta t C_w^2}{2L \cos \alpha} = \frac{\Delta t L}{2t^2 \cos \alpha}$$
(5)

Drugą metodą wykorzystującą falę ultradźwiękową do pomiaru prędkości przepływu jest metoda wykorzystująca zjawisko Dopplera. Większość energii impulsu ultradźwiękowego w przypadku pomiaru prędkości przepływu cieczy zostaje zaabsorbowana przez zawiesiny lub odbita w kierunku innym niż źródło fali. Tylko niewielka jej część jest odbita w kierunku źródła i rejestrowana jako sygnał użyteczny. Dopplerowskie przesunięcie częstotliwości spowodowane przemieszczaniem się źródła fali ultradźwiękowej względem obserwatora może być określone zależnością (6):

$$\Delta f = 2f \cdot \left(\frac{g}{C_w}\right) \tag{6}$$

gdzie:  $\Delta f$  – przesunięcie Dopplerowskie częstotliwości [Hz], f – częstotliwość sygnału nadawanego [Hz],  $\mathcal{G}$ 

względna prędkość pomiędzy nadajnikiem

i obserwatorem [m/s],  $C_w$  – prędkość dźwięku [m/s].

Jeżeli źródło fali i obserwator przemieszczają się względem ziemi, ale ich wzajemna odległość jest stała, nie występuje w tych warunkach zjawisko Dopplera. Tylko promieniowy ruch źródła dźwięku względem obserwatora powoduje występowanie efektu Dopplera.

Miarą prędkości poruszającej się drobiny (prędkości wody) jest różnica częstotliwości fali emitowanej przez nadajnik i odbieranej przez odbiornik. Typowa konfiguracja układu pomiarowego wykorzystywana w pomiarach przepływu przedstawiona jest na rys. 6.



Rys. 6. Typowa konfiguracja przepływomierza ultradźwiękowego wykorzystująca efekt Dopplera

Zależność określająca liniową relację pomiędzy zmierzoną różnicą częstotliwości a prędkością mierzonego przepływu, przy założeniu, że drobina odbijająca falę zachowuje tą samą prędkość, co strumień przepływającego medium zarówno, co do wartości jak i kierunku, przedstawiona jest wzorem:

$$\mathcal{P}_r = \frac{C\Delta f}{2f\cos\alpha} \tag{7}$$

gdzie:  $\Delta f$  – różnica pomiędzy nadawaną a odbieraną częstotliwością [Hz],  $C_w$  – prędkość propagacji fali ultradźwiękowej w wodzie, f - częstotliwość sygnału nadawanego,  $\alpha$  - kąt pomiędzy wektorem prędkości wody a ścieżką ultradźwiękową.

Przepływomierze dopplerowskie sa wykorzystywane do pomiaru prędkości w cieczach niejednorodnych zawierających cząstki stałe lub pęcherzyki gazu. Jedną z głównych zalet tego typu przepływomierzy jest brak konieczności precyzyjnego określania długości ścieżki ultradźwiękowej. Najczęściej spotykany zakres czestotliwość fali wynosi 0,3 ÷ 3 MHz. Spotyka się również przepływomierze dopplerowskie częstotliwości generacji powyżej 1 MHz przeznaczone do pomiaru cieczy o bardzo małym stężeniu zawiesin. W tym wypadku odbicia fali ultradźwiękowej występują od naturalnie obecnych przepływu zawirowań. w polu Przy tei częstotliwości koncentracja zawiesin nie powinna przekraczać 0,05% ponieważ dla wysokich częstotliwości zdecydowanie maleje zdolność penetracji ośrodka przez wiązkę ultradźwiękową.

Na rys. 7 przedstawiono możliwe konfiguracje głowic przepływomierza ultradźwiękowego pracującego wg metody Dopplera.



- Rys. 7. Możliwe konfiguracje przepływomierza ultradźwiękowego pracującego wg metody Dopplera:
- a) z pojedynczą głowicą nadawczo-odbiorczą,
  b) z podwójną głowicą nadawczo-odbiorczą,
  c) z dwoma głowicami zlokalizowanymi po tej samej stronie kanału, d) z dwoma głowicami zlokalizowanymi po dwu stronach kanału

Zastosowanie dopplerowskich przepływomierzy ultradźwiękowych w pomiarach przepływu w kanałach otwartych jest ograniczone jedynie do specyficznych, małych kanałów przemysłowodoświadczalnych. W pomiarach przepływów metodą prędkość - powierzchnia w ciekach naturalnych nie znajdują one praktycznego zastosowania. Ich główne zastosowanie to pomiary przepływu w rurociągach i w diagnostyce medycznej [6].

Trzecia metoda wykorzystywana w przepływomierzach ultradźwiękowych wykorzystuje unoszenie wiązki ultradźwiękowej przez płynący strumień. Idea tej metody przedstawiona jest na rys. 8.



Rys. 8. Idea pomiaru prędkości przepływu metodą ultradźwiękową wykorzystująca zjawisko unoszenia fali ultradźwiękowej

W metodzie tej impulsy ultradźwiękowe wysyłane przez głowicę nadawczą są odbierane przez dwie głowice odbiorcze znajdujące się po stronie kanału przepływowego. drugiej W przypadku prędkości przepływu mierzonego medium równego zero, wartość svgnałów odbieranych przez dwie głowice odbiorcze są stałe. W miarę zwiększania prędkości przepływu amplituda sygnału odbieranego w głowicy O<sub>1</sub> (rys. 8) maleje, natomiast amplituda sygnału odbieranego w głowicy O<sub>2</sub> wzrasta. W przypadku wąskich koryt pomiarowych w celu zwiększenia długości ścieżki ultradźwiękowej wykorzystuje się wielokrotne odbicie wiązki od brzegów kanału przepływowego. Informacja pomiarowa, mająca charakter bardziej informacyjny niż pomiarowy, w tego typu

przepływomierzach jest zawarta w różnicy amplitud sygnałów odbieranych przez głowice  $O_1$ i  $O_2$  lub w kącie odchylenia wiązki ultradźwiękowej, który zwiększa się wraz ze wzrostem prędkości przepływu. W praktyce pomiarowej metoda ta jest bardzo rzadko stosowana ze względu na trudność dokładnego pomiaru kąta odchylenia wiązki ultradźwiękowej i konieczności stosowania dużej liczby głowic odbiorczych dla zwiększenia rozdzielczości pomiaru.

Czwarta metoda wykorzystująca impuls ultradźwiękowy do pomiaru prędkości przepływu bazuje na korelacji wzajemnej, jaka występuje pomiędzy szumami w dwóch odległych miejscach koryta przepływowego. Schemat ideowy ultradźwiękowego przepływomierza korelacyjnego przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Schemat ideowy ultradźwiękowego przepływomierza korelacyjnego

Funkcja korelacji wzajemnej wykorzystywana w tego typu przepływomierzach zdefiniowana jest wzorem (3.8)

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t-\tau) y(t) dt \quad \text{dla } T \gg \tau$$
$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t-\tau) y(t) dt \quad (8)$$

gdzie:  $R_{xy}$  – funkcja korelacji, x(t), y(t) – sygnały uzyskiwane z układu głowic  $N_1$ - $O_1$  oraz  $N_2$  –  $O_2$ . W przypadku stosowania korelatorów cyfrowych

funkcja korelacji može być wyrażona wzorem (9)

$$R_{xy}(i\Delta\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta\tau - i\Delta\tau) y(n\Delta\tau) \quad \text{jeżeli N} >> \text{i.}$$
(9)

gdzie:  $\Delta \tau$ - okres próbkowania, i – punkt obliczeniowy funkcji, N – liczba próbek.

Podstawą metody korelacyjnej jest pomiar czasu przelotu znacznika pomiędzy miejscami usytuowania dwóch ścieżek ultradźwiękowych. Znacznikiem może być naturalnie występująca turbulencja lub drobina, która dostała się do strumienia w sposób naturalny, bądź została wstrzyknięta. Miarą średniej prędkości mierzonego medium jest przesunięcie czasowe odbieranych sygnałów, dla którego występuje maksimum funkcji korelacji wzajemnej i wtedy:

$$\mathcal{G}_m = \frac{L}{\tau}$$

Sygnał pomiarowy z ultradźwiękowego przepływomierza korelacyjnego jest proporcjonalny do prędkości strugi przepływu wraz z którą porusza

się znacznik. W przypadku otwartych kanałów przepływowych o prostokątnym przekroju poprzecznym rozkład prędkości w pionie jest zdeterminowany. Ustawiając zestaw głowic na głębokości 0,6h (h – głębokość kanału przepływowego), mierzona prędkość średnia będzie równa prędkości średniej liczonej za cały przekrój pomiarowy.

## 4. OPTYCZNE METODY POMIARU PRZEPŁYWU

Wykorzystanie optycznych metod pomiaru przepływu w kanałach otwartych i ciekach naturalnych jest stosunkowo ograniczone, jakkolwiek coraz częściej spotyka się urządzenia wykorzystujące zaawansowane techniki pomiarowe. Stosowane metody można podzielić na dwie zasadnicze grupy: metody bazujące na śledzeniu ruchu zawirowań, cząstek stałych, zawiesin itp. w przekroju strumienia cieczy lub na swobodnej powierzchni Wśród cieku. tej grupy najpopularniejsza jest metoda PIV (ang. Particle Image Velocimetry) oraz metody anemometrii laserowej LA (ang. Laser Anemometry), wśród których najpopularniejszą jest anemometria dopplerowska LDA (ang. Laser Doppler Anemometry). O ile pierwsza grupa metod znajduje zastosowanie zarówno w pomiarach przepływu na naturalnych ciekach jak i w kanałach sztucznych, o tyle główny obszar zastosowań laserowej anemometrii dopplerowskiej koncentruje się jednak na laboratoryjnych pomiarach przepływu w małych sztucznych kanałach przepływowych.

W metodach optycznych wykorzystuje się pomiędzy relacje naturalnym strumieniem świetlnym lub generowanym przez źródła zewnętrzne a zjawiskami absorpcji, rozpraszania i odbicia występujące w mierzonym strumieniu wody. Elementem niezbędnym do przeprowadzenia poprawnego pomiaru w tego typu metodach jest występowanie tzw. posiewu. Jako posiew możemy traktować wszelkie naturalnie występujące bądź spowodowane w sposób sztuczny zakłócenia struktury strumienia mierzonego medium, którymi mogą być zawirowania (fale), piana, drobiny lub zawiesiny. Idea pomiaru zakłada, że prędkość, z jaka poruszają się zakłócenia struktury strumienia jest tożsama z prędkością mierzonego medium w danym punkcie przekroju pomiarowego. Za pomocą metod optycznych pomiarowi mogą być poddawane przepływy jedno lub dwufazowe zarówno laminarne jak i turbulentne [7, 8].

Wśród metod optycznych pomiaru prędkości przepływu wykorzystujących sztuczne źródło światła dominującą rolę pełni anemometria laserowa (LA). Pozwala ona zmierzyć wartość chwilową lokalnej wartości prędkości w określonej, niewielkiej objętości przepływu i czasie. Podstawy teoretyczne anemometrii laserowej opracowano dopiero w połowie lat sześćdziesiątych, a pierwsza komercyjnie dostępna aplikacja powstała na początku lat siedemdziesiątych.

Głównymi zaletami anemometrii laserowej są: bezinwazyjność, mała objętość próbkowania, możliwość ciągłego przesuwania obszaru badanego i samo-kalibracja. Szczególne własności anemometrów laserowych sprawiły, że pomimo wysokiej ceny są chętnie wykorzystywane przede wszystkim w praktyce laboratoryjnej. Odnosząc się ogólnie do anemometrii laserowej można wymienić kilka podstawowych zalet, które determinują jej szerokie zastosowanie:

- bezkontaktowy pomiar, nie deformujący pola prędkości obecnością czujnika,
- możliwość pomiaru w środowiskach agresywnych chemicznie,
- niewrażliwość na zmiany temperatury ,
- możliwość pomiaru prędkości w dowolnym kierunku,
- brak konieczności wzorcowania przyrządu.

Anemometria laserowa ma również swoje wady. Do najistotniejszych można zaliczyć:

• w badanej cieczy muszą występować cząsteczki stałe, rozpraszające promień lasera; zazwyczaj wystarczają zanieczyszczenia naturalne, lecz w przypadku cieczy bardzo czystych, należy wprowadzić je sztucznie,

 medium musi być przezroczyste, co narzuca istotne ograniczenia np. dotyczące gęstości stosowanego posiewu,

 kanał przepływowy musi być wyposażony w wzierniki umożliwiające wprowadzenie promieni lasera w badany przepływ.

Wśród różnych technik stosowanych w anemometrii laserowej można wyróżnić cztery podstawowe grupy: laserowa anemometrie wieloogniskowa (LTA - ang. Laser Transient Anemometry), laserowa anemometrie wykorzystującą śledzenie ruchu cząstek (PIV), anemometrię laserową wykorzystującą indukowaną fluorescencję przepływu (RELIEF - ang. Raman Excitation Laser Induced Electronic Fluorescence) oraz dopplerowską anemometrię laserową (LDA ang. Laser Doppler Anemometry). Zastosowanie każdej z wymienionych powyżej metod anemometrii laserowej wymaga istnienia w badanym przepływie odpowiedniej koncentracji cząstek rozpraszających. Cząstki te mogą być naturalnymi składnikami płynu lub też muszą być do niego wprowadzane sztucznie jako tzw. posiew. Oznacza to, że analizie podlega nie tyle ruch samego płynu, ile zawieszonych w nim cząstek posiewu. Zazwyczaj zakłada się, że cząstki te odwzorowują w sposób idealny ruch samego płynu.

Anemometria wieloogniskowa wykorzystuje pomiar czasu przejścia cząstki posiewu przez dwa lub więcej ogniska wiązek laserowych. Aby możliwe było założenie, iż podlegające pomiarowi impulsy świetlne pochodzą od tej samej cząstki rozpraszającej, ogniska wiązek laserowych powinny być umieszczone możliwie blisko siebie. Mierząc odstępy czasu między impulsami oraz znając odległość między ogniskami możemy w prosty sposób wyznaczyć chwilową prędkość cząstki oraz kierunek jej ruchu. Metody tej nie stosuje się do pomiaru gdyż przepływów turbulentnych, w przypadku, gdy stosunek średnicy ogniska wiązki do odstępu między kolejnymi wiązkami wynosi 20: 1, intensywność turbulencji na poziomie około 5% wystarcza, by cząstka przechodząca przez pierwsze ognisko nie trafiała w obręb drugiego, nawet, gdy oś ustawienia ognisk jest równoległa do kierunku wektora prędkości średniej. Zastosowanie ognisk poszczególnych wiązek w kształcie elipsoid o dłuższej osi normalnej do kierunku przepływu średniego pozwala na pomiar w przypadku większych poziomów turbulencji, jednak nadal właściwym obszarem zastosowań LTA pozostaja przepływy o niskim i umiarkowanym poziomie turbulencji [9].

W ciekach naturalnych i innych typach kanałów otwartych, technika PIV znajduje zastosowanie w pomiarach pola prędkości powierzchniowej. Pomiar przepływu w ciekach w warunkach normalnych jak i krytycznych spowodowanych np. fala powodziową może być skutecznie, bezkontaktowo, a przede wszystkim bezpiecznie (bez bezpośredniego udziału ludzi), realizowany za obserwacji predkości pomoca pola powierzchniowych na swobodnej powierzchni przepływu. Korzystając z wzorów Bazina lub Hagena oraz znajomości rozkładu prędkości powierzchniowej, możliwe jest wyznaczenie profili pionowych prędkości w korycie, co w połączeniu z pomiarem poziomu napełnienia koryta (przy ustabilizowanym dnie) pozwala na wyznaczenie chwilowej wartości przepływu.



Rys. 10. Struktury układu pomiarowego wykorzystujące metodykę PIV do pomiaru pola prędkości powierzchniowej w kanałach otwartych

W przypadku klasycznej aplikacji metody PIV do pomiaru powierzchniowego pola prędkości możliwe

struktury układu pomiarowego przedstawione są na rys. 10.

Przedstawione konfiguracje układu oświetlającego różnią się sposobem transformacji obrazu z kamery do układu współrzędnych wykorzystywanego w dalszej analizie obrazu. W obu przypadkach istnieje możliwość wykorzystywania zarówno oświetlenia naturalnego jak i sztucznego (np. zestaw lamp halogenowych).

W wielu rozwiązaniach technicznych szczególnie w ciekach naturalnych wykorzystuje się naturalne zakłócenia występujące na swobodnej powierzchni cieku. Najczęściej są to zawirowania, piana wodna lub różnego typu cząstki, drobiny. W przypadku, kiedy profil pomiarowy znajduje się niedaleko budowli hydrotechnicznej, np. przelewu lub stopnia wodnego, wykorzystanie naturalnie i regularnie tworzącej się piany jako znacznika daje bardzo dobre rezultaty. Praktyczne wykorzystanie posiewu sztucznego może być stosowane jedynie do cieków o szerokości nie większej niż kilka metrów.

Wiele rozwiązań technicznych pomiaru przepływu metodą PIV wykorzystuje oświetlenie naturalne oraz pojedynczą kamerę ustawioną na brzegu, w taki sposób żeby swoim polem widzenia obejmowała całe pole pomiarowe (rys. 10). Podstawowym problemem związanym z tego typu aranżacją stanowiska pomiarowego jest uzależnienie jakości rejestrowanych obrazów od stopnia nasłonecznienia oraz transformacja obrazu z kamery do układu współrzędnych związanego z ciekiem.

Obraz z kamery jest w sposób naturalny zniekształcany, co jest związane bezpośrednio kątem widzenia kamery, jej sposobem usytuowaniem oraz z jej ogniskową. Określenie funkcji transformujących prowadzone jest dwiema drogami. Pierwszy sposób polega na precyzyjnym określeniu pozycji i optycznych parametrów kamery ich podstawie wyznaczenie i na funkcii transformacyjnych. Drugi sposób wykorzystuje istniejące naziemne punkty odniesienia GPR (ang. Ground Reference Points) i na ich podstawie określane są parametry transformacyjne opisujące relacje pomiędzy obrazem z kamery a rzeczywistym stanowiskiem pomiarowym [10].

Prędkość powierzchniowa w punktach definiujących przekrój pomiarowy jest wyznaczana w oparciu o siatkę rozkładu prędkości wyznaczoną za pomocą metodyki PIV. Wartość prędkości w punkcie  $9_i$  wyznacza się za pomocą liniowej interpolacji biorąc pod uwagę sąsiednie wartości prędkości w punktach  $P_g$  wyznaczonej siatki:

$$\mathcal{P}_{i} = \frac{1}{4} \sum_{g \in G_{i}} \mathcal{P}_{g} \tag{10}$$

gdzie:  $G_i$  – współrzędne siatki dla czterech punktów wyznaczających obszar, w którym jest zawarty punkt  $P_i$ ,  $\mathcal{G}_g$  – prędkość powierzchniowa w punktach  $P_g$  wyznaczona za pomocą metodyki PIV.

Profil pionowy prędkości w każdym punkcie  $P_i$ może być przyjęty jako paraboliczny lub logarytmiczny. Dla większości kanałów przepływowych wartość średnia prędkości w danym pionie  $\underline{9}_i$  może być określona zgodnie z uproszczoną zależnością  $\underline{9}_i = 0,859_i$ . Jednakże należy zauważyć, że wartość współczynnika proporcjonalności jest zależna od właściwości hydrologicznych kanału przepływowego takich jak chropowatość dna, rozmiary kanału czy poziom turbulencji.

# 5. ELEKTROMAGNETYCZNA METODA POMIARU PRZEPŁYWU

Elektromagnetyczna metoda pomiaru przepływu należy do grupy metod powierzchnia - prędkość. Metody te wykorzystują niezależne pomiary średniej predkości mierzonego medium i poziomu napełnienia kanału przepływowego do pomiaru przepływu (strumienia objętości). Idea pomiaru zapewnia prawie idealną integrację pola prędkości, zarówno w pionie jak i w poziomie. Strefa integracji w pionie jest wyznaczana przez dno kanału przepływowego i lustro wody, zaś w poziomie przez elektrody pomiarowe. Uzupełniając podstawową procedurę pomiarową o jednoczesny pomiar poziomu napełnienia kanału przepływowego, często wykorzystujący tą samą parę elektrod pomiarowych, uzyskuje się wynik pomiaru proporcjonalny do przepływu (strumienia objętości).

Pomiar prędkości cieczy metoda elektromagnetyczną oparty jest na prawie Faradaya. Wiąże ono wartość potencjału elektrycznego  $\varphi$ indukowanego strefie pomiarowej przepływomierza z wektorem prędkości  $\mathcal{G}$  cieczy elektrycznie przewodzącej i wektorem indukcji magnetycznej  $\overline{B}$ pola wzbudzanego w strefie pomiarowej. Sygnałem pomiarowym przepływomierzu elektromagnetycznym jest W różnica potencjałów mierzona na elektrodach umieszczonych na przeciwległych brzegach kanału przepływowego (rys. 11).



Rys. 11. Idea metody elektromagnetycznej pomiaru przepływu w kanale otwartym

Analizując spotykane obecnie konstrukcje przetworników pierwotnych przepływomierzy elektromagnetycznych dla kanałów otwartych można wyróżnić trzy zasadnicze rozwiązania. Różnią się one głównie sposobem generacji sztucznego pola magnetycznego. W przypadku kanału z elektrycznie izolowanymi brzegami, cewka wzbudzająca może być integralną częścią kanału przepływowego (rys. 12b) zapewniając tym samym możliwość stosunkowo łatwej zmiany miejsca instalacji przepływomierza. Ten rodzaj konstrukcji zapewnia jednorodny rozkład indukcji wzbudzanego magnetycznego, co umożliwia pola pomiar przepływów o praktycznie dowolnym rozkładzie pola prędkości. Przepływomierz wykorzystujący ten rodzaj konstrukcji opracowany na Politechnice latach 90-tych. Warszawskiej W został zainstalowany na polderze Łęgnowo k. Bydgoszczy [11, 12].



Rys.12. Konstrukcje przetworników pierwotnych przepływomierzy elektromagnetycznych do kanałów otwartych a) przetwornik z cewką wzbudzającą usytuowaną powyżej lustra wody, b) przetwornik z cewką wzbudzającą stanowiącą integralną część kanału przepływowego, c) przetwornik z cewką wzbudzającą umieszczoną na lub pod dnem kanału przepływowego

W latach 80-tych i na początku 90-tych budowano przetworniki z wyodrębnionym układem cewki wzbudzającej (np. Sarasota Instrumentation). Dla sztucznego kanału przepływowego cewka była umieszczana powyżej kanału w specjalnie do tego przygotowanej prostokątnej ramie (rys. 12.a). Dla tego rozwiązania trudno było uzyskać jednorodny rozkład pola magnetycznego, co powodowało konieczność wprowadzania współczynników korekcyjnych uwzględniających zmienny poziom napełnienia koryta. Rozkład prędkości mierzonych przepływów musiał charakteryzować się symetrią osiową. Dla naturalnych kanałów przepływowych cewka wzbudzająca zakopywana była pod dnem kanału (rys.12.c), dodatkowo wymagana jest wtedy elektryczna dna koryta kanału izolacia od przepływającej wody. Izolacje ta najczęściej zapewniała folia izolacyjna rozciagnieta w kanale przepływowym na całej długości strefy pomiarowej. W tej konstrukcji największą niedogodnością był niejednorodny rozkład wzbudzanego pola magnetycznego oraz efekty zwarciowe występujące na brzegach folii.

Obie te konstrukcje wywodzą się z prac badawczych realizowanych w latach 70-tych przez Plessey Radar Instrumentation (W. Brytania). We wszystkich rozwiązaniach przedstawionych na rys. 12 konieczny był dodatkowy pomiar poziomu napełnienia kanału przepływowego. W rozwiązaniu przedstawionym na rys. 12b pomiar dokonywany był z wykorzystaniem tej samej pary lekko odchylonych od pionu elektrod pomiarowych wykorzystując efekty elektromagnetyczne. W pozostałych dwóch rozwiązaniach pomiar dokonywany był za pomocą oddzielnego miernika poziomu np. ultradźwiękowego.

Całkowita niepewność pomiaru przepływu metodą elektromagnetyczną dla izolowanego kanału przepływowego nie powinna przekraczać  $\pm 2\%$  przy poziomie ufności 95%. W sytuacji instalacji przepływomierza na rzeczywistym kanale przepływowym, niepewność całkowita jest znacznie większa, należy oczekiwać wartości dochodzących do  $\pm 10\%$ . Najmniejsza wykrywana za pomocą przepływomierza elektromagnetycznego prędkość przepływu jest na poziomie 0,001 m/s. Dynamika mierzonych przepływów może być przedstawiona jak 1: 1000.

# 6. PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule metody pomiaru przepływu w kanałach otwartych pokrywają praktycznie większość potrzeb sygnalizowanych przez służby hydrologiczne.

Metody spiętrzeniowe i zwężkowe znajduja bardzo szerokie zastosowanie w monitoringu przepływu w przemysłowych kanałach zrzutowych, małych ciekach i kanałach melioracyjnych. W przelewów mierniczych przypadku cienkościennych stosowanych cieków do o szerokości poniżej 5 m i głębokości poniżej 1 m, niepewność pomiaru jest w zakresie  $\pm 1\% \div \pm 3\%$ w zależności od rodzaju przelewu. Dla przelewów szerokiej koronie stosowanych do cieków 0 o szerokości do 50 m i głębokości do 1 m niepewność pomiaru nie przekracza ± 5%. Dla zwężkowych koryt pomiarowych maksymalna szerokość cieku nie powinna przekraczać 50 m przy głębokości do 1 m. Dla takich warunków niepewność pomiaru nie przekracza ± 5%. Swobodne przelewy stosowane są dla cieków o szerokości do 50 m i głębokości do 5 m, zaś uzyskiwane niepewności pomiaru nie przekraczają ±10%.

W przypadku metody ultradźwiękowej do jej głównych zalet zalicza się zdolność do pomiaru prędkości wody w bardzo szerokim zakresie, brak szczególnych wymagań odnośnie miejsca lokalizacji, nie wymaga wzorcowania, nie stwarza przeszkód nawigacyjnych lub w swobodnym przepływie ryb, nie jest czuła na występowanie spiętrzeń powodowanych różnymi czynnikami. Nie mniej w praktyce pomiarowej, miejsce instalacji ultradźwiękowego przepływomierza powinno spełniać kilka istotnych warunków rzutujących uzyskiwane bezpośrednio na niepewności pomiarów. Mierzone koryto powinno być regularne z równoległymi brzegami cechujące się niewielkimi zmianami kształtu przekroju poprzecznego na odcinku strefy pomiarowej. Ze względu na konieczność monitorowania wielkości przekroju poprzecznego napełnionej części kanału, powinna być zdeterminowana relacja pomiędzy poziomem i polem przekroju poprzecznego. Przekrój pomiarowy kanału powinien być wolny od intensywnej roślinności dennej ze względu na możliwość wystąpienia tłumienia sygnału ultradźwiękowego. W strefach kanału przepływowego gdzie występuje silna koncentracja zawiesin (powyżej 1000 mg/l) użycie metody ultradźwiekowej może być utrudnione a niekiedy wręcz niemożliwe. Możliwość wystąpienia silnych gradientów temperatury czy zasolenia jest przeciwwskazaniem do stosowania metody ultradźwiękowej.

W przypadku metod optycznych, metoda PIV znajduje największe zastosowanie w praktyce hydrologicznej. Jedną z niezaprzeczalnych zalet metod PIV jest bardzo prosta instalacja i niewielka masa wymaganej aparatury pomiarowej (kamera CCD, statyw, układ przetwarzania sygnałów oparty na komputerze PC lub specjalizowanym sterowniku mikroprocesorowym), która umożliwia bezproblemowe przenoszenie urządzenia na inne stanowisko pomiarowe. Zdecydowanie większa złożoność omawianej metody występuje po stronie oprogramowania. Istnieje szereg dostępnych metod analizy obrazów, które moga być prowadzone online badź off-line. Główny kierunek rozwojowy metod optycznych skoncentrowany jest na dwu dziedzinach. Pierwszym obszarem badań jest optymalizacja zestawu źródło światła - czujnik (rejestrator). W tym obszarze prace koncentrują się na budowie specjalizowanych laserów oraz wysokiej jakości kamery cyfrowe. Druga dziedzina intensywnych badań to nowoczesne algorytmy rozpoznawania obrazów. W większości bazują one na technikach korelacyjnych wykorzystując szybką transformate Fouriera (FFT).

Przepływomierze elektromagnetyczne do kanałów otwartych są konstrukcjami dość kosztownymi, jednakże mają szereg istotnych zalet. Charakteryzują się szerokim zakresem dynamicznym pomiarów, nie wprowadzają do przekroju pomiarowego żadnych elementów mogących zakłócić przepływ, mierzą rzeczywistą średnią prędkość przepływu, nie są czułe na przepływy zwrotne. Jako jedyne zapewniają naturalna integracje pola predkości. Średni bład pomiaru przepływu za pomoca przepływomierza elektromagnetycznego zazwyczaj nie przekracza 3%. Sa instalowane głównie na rzekach (kanałach) o szerokości nie przekraczającej 20 m, które

charakteryzują się brakiem stabilnej zależności poziom-przepływ. Miejsce instalacji przepływomierza elektromagnetycznego powinno spełniać kilka warunków. Przetwornik pierwotny przepływomierza winien być instalowany na prostym odcinku kanału o długości nie mniejszej niż 3 szerokości kanału. Warunek ten wynika z chęci uzyskania profilu przepływu zbliżonego do osiowosymetrycznego. Dodatkowo należy unikać bliskości linii energetycznych, elektrycznych linii kolejowych oraz dużych elementów wykonanych ze stali, które mogłyby zniekształcać wzbudzane pole magnetyczne.

Metoda elektromagnetyczna i wszystkie związane z nią procedury pomiarowe, podobnie jak w przypadku metody ultradźwiękowej, została znormalizowana (między innymi ISO 9213, PN EN – ISO 6817).

# LITERATURA

- 1. Michalski A. *Pomiary przepływu wody* w kanałach otwartych, OWPW, Warszawa 2004.
- Różdżyński K., Miernictwo hydrologiczne, IMiGW Warszawa 1998.
- 3. Herschy R.W., *Hydrometry*, John Wiley & Sons, New York, 1978.
- Herschy R. W., Streamflow Measurement, Elsevier Applied Science Publishers, London 1995.
- 5. Różdżyński K. Metody hydrometrii ultradźwiękowej, PAN, IBW Gdańsk 1984
- 6. Liptak B.G., *Flow Measurement*, Chilton Book Company, Pensywania 1993.
- Hyun B. S., Balachandar R, Yu K., Patel V. C., Assessment of PIV to measure mean velocity and turbulance in open-channel flow, Experiments in Fluids, Spinger Verlag 2003.
- 8. Iehisa N., Kouki O., *Turbulent structures in partly vegetated open-channel flows with LDA and PIV measurements*, Journal of Hydraulic Research, vol. 39, no 6 2001, pp 629-642.
- Elsner J., Drobniak St., Metrologia turbulencji przepływów, Maszyny Przepływowe pod redakcją E. S. Burki, Wydawnictwo PAN Warszawa 1995.
- Raffel M., Willert Ch., Kompenhans J., Particle Image Velocimetry – a Practical Guide, Springer Berlin 1998.
- Klugiewicz J., Dzieweczynski P., Toczyk G., Michalski A., Chwaleba A., Kalicki A., Metody ustalania i pomiaru odpływu wody z polderów do projektowania i eksploatacji przepompowni, Zeszyt Naukowy No 179 - Budownictwo ,Akademia Techniczno - Rolnicza, Bydgoszcz 1992, s. 5 - 25.
- Klugiewicz J., Dzieweczynski P., Michalski A., Chwaleba A., Kalicki A., *Elektromagnetyczny* system pomiaru dynamiki odpływu wody z polderu Łęgnowo, Zeszyt Naukowy No 179 -Budownictwo, Akademia Techniczno - Rolnicza Bydgoszcz 1992, s. 25-44.

# EKSPERTOWY SYSTEM DIAGNOSTYCZNY UKŁADU STEROWANIA DOPALACZEM TURBINOWEGO SILNIKA ODRZUTOWEGO

Henryk BOROWCZYK, Radosław KWIECIŃSKI

Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Robotyki ul. Wiejska 45c, 15-351 Białystok, <u>borowczyk@post.pl</u>, <u>rkwiecinski@interia.pl</u>

## Streszczenie

Przedstawiono projekt ekspertowego systemu diagnostycznego układu sterowania dopalaczem turbinowego silnika odrzutowego z wykorzystaniem szkieletowego systemu ekspertowego. Omówiono główne etapy procesu projektowania: gromadzenie wiedzy, jej porządkowanie, formalizację zapisu w postaci reguł i faktów.

Słowa kluczowe: system ekspertowy, diagnostyka, silnik turbinowy.

## THE DIAGNOSTIC EXPERT SYSTEM OF THE AFTERBURNER CONTROL SYSTEM

#### Summary

The diagnostic expert system of the afterburner control system with utilizing the skeleton expert system was restated. Main stages of the designing process were discussed: knowledge assembling and arranging, the save in the form of rules and facts.

Keywords: expert system, diagnostics, turbine engine.

#### **1. WPROWADZENIE**

Efektywne diagnozowanie złożonych układów dynamicznych wymaga zastosowania komputerowego wspomagania w postaci ekspertowego systemu diagnostycznego (ESD) [5, 8, 11].

W niniejszej pracy przedstawiono wybrane problemy projektowania ekspertowego systemu diagnostycznego na przykładzie układu sterowania dopalaczem turbinowego silnika odrzutowego. Wykorzystywana wiedza ekspercka zawarta jest m.in. w dokumentacji technicznej oraz w wynikach badań diagnostycznych przeprowadzonych w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych [1, 12].

Wyniki badań, w postaci zarejestrowanych przebiegów czasowych sygnałów diagnostycznych tworzą duży zbiór danych, który musi być odpowiednio przetworzony w celu skonstruowania baz danych, faktów i reguł projektowanego ESD [2, 3, 4, 6]. Poniżej przedstawiono metody: wielowartościowego kodowania odchyleń od przebiegów wzorcowych, rozrzedzonego próbkowania i kwantowania oraz sztucznych sieci neuronowych.

Jednoczesne wykorzystanie proponowanych metod prowadzi do hybrydowego ekspertowego systemu diagnostycznego (HESD).

# 2. DIAGNOZOWANY OBIEKT

Diagnozowanym obiektem jest układ sterowania dopalaczem turbinowego silnika odrzutowego [1, 9]. Składa się z trzech podstawowych podukładów: zapłonowego, paliwowego i sterowania regulowaną dyszą wylotową (rys. 1).





Układ zapłonowy odpowiedzialny jest za wytworzenie energii cieplnej niezbędnej do zapalenia paliwa doprowadzonego do komory dopalacza. Natężeniem paliwa steruje układ paliwowy dopalacza w zależności od położenia dźwigni sterowania silnikiem (DSS) oraz od ciśnienia powietrza za sprężarką. Sterowanie dyszą wylotową zależy od położenia DSS oraz od temperatury gazów za turbiną. Korekta temperatury realizowana jest za pomocą regulatora temperatury, którego zadaniem jest utrzymywanie maksymalnej dopuszczalnej temperatury gazów za turbiną.

# 3. WIEDZA EKSPERCKA

Wiedza wykorzystana do tworzenia systemu ekspertowego oparta jest na eksperymentalnych przeprowadzonych badaniach diagnostycznych w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych [1]. Polegały one na badaniu zdatnego obiektu diagnostycznego oraz obiektu z wprowadzonymi symulowanymi uszkodzeniami. Rejestracji poddano wybrane sygnały analogowe (temperatura, ciśnienie dwustanowe. itp.) oraz sygnały Sygnały zarejestrowane dla zdatnego obiektu traktowane sa jako wzorcowe, a dla obiektu uszkodzonego jako sygnały reprezentatywne dla poszczególnych klas uszkodzeń.

# 3.1. Wybór danych do analizy

Zadaniem projektowanego systemu ekspertowego jest diagnozowanie układu sterowania dopalaczem turbinowego silnika odrzutowego podczas przeprowadzania próby naziemnej tj. ściśle ustalonego, zaplanowanego badania diagnostycznego przeprowadzonego w określonych, znanych diagnoście warunkach otoczenia. Ponieważ badanie te przeprowadza diagnosta (człowiek) są one przeprowadzane w podobny sposób, ale nie identyczny.

Dlatego otrzymane dane poddano wstępnej obróbce. Określono przebiegi sygnałów funkcjonalnych W wybranych przedziałach czasowych, które ustalane są indywidualnie dla każdego przeprowadzanego badania diagnostycznego w zależności od wartości sygnałów automatyki (sygnały dwustanowe) oraz sygnału DSS. Celem jest zniwelowanie wpływu przesunięć w czasie nie mających związku z dynamiką układu. W omawianym systemie ekspertowym proces ten odbywa się automatycznie z wykorzystaniem skryptów działających w środowisku Matlab.

### 3.2. Formowanie danych

Formowanie danych [9] polega na sprowadzeniu sygnałów fizykalnych do postaci bezwymiarowej przez podzielenie sygnału przez wartość odniesienia, która ustalana jest indywidualnie dla każdego z sygnałów (jest to najczęściej jego wartość maksymalna). Wartości uformowanych sygnałów mieszczą się w przedziale [0, 1].

Uformowane przebiegi czasowe sygnałów diagnostycznych przygotowane są do porównywania z przebiegami wzorcowymi.

## 3.3. Kodowanie odchyleń od przebiegu wzorcowego

Przebiegi czasowe najczęściej zawierają nadmiarową informację o badanym obiekcie. Zmniejszenie ilości danych do dalszego przetwarzania można osiągnąć przez parametryzację – zastąpienie przebiegów czasowych zbiorem odpowiednio zakodowanych parametrów

Zakres analizowanych danych podzielono na odcinki o długości 1 s i przeprowadzono uśrednianie wartości sygnałów w każdym z odcinków, dla przebiegu wzorcowego oraz dla rozpatrywanych uszkodzeń.

Następnie wyznaczono różnice (odchylenia) między uśrednionymi wartościami sygnałów (w odpowiadających sobie odcinkach czasowych) dla przebiegu wzorcowego i z uszkodzeniami. W rozpatrywanym przypadku otrzymano 16 parametrów dla każdego sygnału składającego się z 1600 próbek.

Ponieważ posługiwanie się wartościami rzeczywistymi odchyłek jest niedogodne, zaproponowano zastosowanie wielowartościowego kodowania, którego schemat zawiera rys. 2.

W pierwszym przybliżeniu przyjęto jednakowe zasady kodowania odchyleń dla wszystkich sygnałów. Było to możliwe między innym, dzięki przeprowadzonemu wcześniej procesowi formowania sygnałów.



Rys. 2. Kodowanie wielowartościowe [7]

Na rys. 3 przedstawiono przebieg współczynnika wypełnienia regulatora temperatury  $\gamma$  w przypadku uszkodzonego obwodu zasilania agregatów zapłonu dopalacza (linia przerywana) w porównaniu z wzorcowym przebiegiem. Wokół wzorcowego przebiegu zaznaczono przedziały kodowania.

W taki sam sposób wyznaczono przedziały kodowania dla pozostałych sygnałów diagnostycznych.



Rys. 3. Przebiegi współczynnika γ - wzorcowy i przy uszkodzeniu [7]

Wyniki kodowania przebiegu współczynnika wypełnienia regulatora temperatury  $\gamma$  dla uszkodzonego obwodu zasilania agregatów zapłonu dopalacza przedstawiono na rys. 4.



współczynnika γ [7]

Wyniki przetwarzania pozostałych sygnałów dla rozpatrywanego uszkodzenia zamieszczono w tab. 1.

						Tabela 1
 V	Vynik	i kod	owan	ia wie	elowa	rtościowego
	t1	T2	t3	t4	t5	t16
n	0	0	0	0	0	0
Pd	-5	-5	-5	-5	-5	-5
Pw	-5	-5	-5	-5	-5	-5
t4	0	0	0	0	0	-1
DR	-2	-2	-2	-2	-2	-2
gamma	-2	-1	-0	-0	0	0
p2	-5	-5	-5	-5	-5	-5
wibr	0	0	-1	-2	-1	-1

Stosując powyższe postępowanie do wszystkich sygnałów zarejestrowanych w procesie badań diagnostycznych obiektu zdatnego i z symulowanymi uszkodzeniami wyznaczono zbiory charakterystycznych parametrów dla wszystkich rozpatrywanych uszkodzeń [7].

## 3.4. Rozrzedzone próbkowanie i kwantowanie

W celu zastosowania metody rozrzedzonego próbkowania i kwantowania należy dla każdego sygnału wyznaczyć zbiór charakterystycznych czasów oraz zbiór charakterystycznych wartości sygnałów i czasów ich osiągnięcia.

Dobór chwil próbkowania oraz liczności poziomów kwantowania zależy od rozpatrywanych przebiegów i przeprowadzany jest doświadczalnie.

- W rezultacie otrzymuje się parametry:
- bazujące na wartości sygnału w wybranych chwilach czasu (rozrzedzone próbkowanie),
- bazujące na czasie osiągania wybranych wartości sygnału diagnostycznego (rozrzedzone kwantowanie).

Przykładowe wyniki operacji rozrzedzonego próbkowania i rozrzedzonego kwantowania (w przypadku uszkodzonego obwodu zasilania agregatów zapłonu dopalacza) przedstawiają tabele 2 i 3 [4, 6].

Tabela 2. Parametry bazujące na wartości sygnału

P?	Parameny bazujące na wartości syg							
	t1	t2	t3	t4				
t [s]	2,8	4,6	8,4	13,6				
n	1,011	0,999	0,999	0,860				
Pd	0,000	0,183	0,989	0,293				
Pw	0,945	0,941	0,945	0,964				
t4	0,898	0,879	0,851	0,860				
DR	0,822	0,911	0,911	0,267				
gamma	0,802	0,549	0,538	0,527				
wibr	0,879	0,871	0,857	0,900				
MWFK	1,000	1,000	1,000	0,000				
KZFK	1,000	1,000	1,000	0,000				
AZFK35	0,000	0,000	0,000	0,000				
AZFK37	0,000	0,000	1,000	0,000				
PBFK	1,000	1,000	1,000	0,000				

Tabela 3.

Parametry bazujące na czasie trwania procesu

Wartość sygnału	0,1	0,5	0,7	0,9	1					
Czas osiągnięcia										
n	-100	-100	14	13,6	1,8					
pd	4,6	5,2	5,4	5,6	100					
pw	-100	-100	-100	-100	1,6					
t4	-100	-100	-100	2,8	100					
DR	1,8	2,2	2,6	3	100					
gamma	-100	-100	3,2	1,4	100					
wibr	-100	-100	-100	0	100					
MWFK	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4					
KZFK	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4					
PBFK	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4					

W następnym etapie parametry te podlegają procesowi kodowania, ale przedziały kodowania ustalane są odrębnie dla każdego z parametrów. Tak określona informacja diagnostyczna stanowi dobre uzupełnienie metody kodowania i przystosowana jest do przetwarzania w procesie wnioskowania diagnostycznego realizowanego przez system ekspertowy.

## 3.5. Zastosowanie sztucznej sieci neuronowej

wielowartościowego Metody kodowania odchyleń oraz rozrzedzonego próbkowania i kwantowania wykazują dość dużą wrażliwość na rozrzut "osobniczych" cech diagnozowanego układu, niekoniecznie związanych z pojawieniem się uszkodzenia. W celu zapewnienia jak największej elastyczności projektowanemu systemowi ekspertowemu, do zbioru metod przetwarzania informacji diagnostycznej włączono sztuczne sieci neuronowe.

Wybrano te przebiegi sygnałów funkcjonalnych, które opisują szczególnie istotne parametry dynamiki układu sterowania z punktu widzenia diagnostyki. Dla każdego z wybranych sygnałów opracowano sztuczną sieć neuronową. Sieć ta została nauczona klasyfikować sygnał dla stanu zdatności i wszystkich uszkodzeń, które system będzie miał wykrywać. W rezultacie otrzymano zbiór sieci neuronowych potrafiących przypisać dany przebieg konkretnemu uszkodzeniu bądź stwierdzić, że obiekt jest zdatny.

Sztuczne sieci neuronowe utworzono z wykorzystaniem programu Neuronix firmy AITECH [10]. Zastosowana sieć neuronowa jest siecią jednokierunkową wielowarstwową. Składa się z warstwy wejściowej o liczbie neuronów równej liczbie próbek sygnału poddanego klasyfikacji, 20 neuronów warstwy ukrytej oraz z warstwy wyjściowej o liczbie neuronów odpowiadającej liczbie klasyfikowanych przebiegów (rys. 5).



Rys. 5. Przebiegi sygnałów t4 dla wybranych uszkodzeń

Dane wejściowe sieci neuronowej tworzy wybrany fragment przebiegu sygnału diagnostycznego. Zadaniem pojedynczej sieci jest rozpoznanie (klasyfikacja) przebiegu sygnału charakterystycznego dla określonego uszkodzenia.

Nauczona sztuczna sieć neuronowa została poddana testom. Wprowadzono przesunięcia w wartościach (rys. 6) jak i w czasie, co imituje rozrzut indywidualnych własności badanych układów.

Sieć bez trudu klasyfikuje przebiegi oraz pokazuje kierunek przesunięcia i jego wartość. Przy dużych przesunięciach lub połączonych przesunięciach wartości i czasu sieć przestaje dawać jednoznaczne rezultaty.



Rys. 6. Przebieg sygnału t4 dla uszkodzenia nr 7 (linia ciągła) wraz z przebiegami z przesuniętymi wartościami

Wpływ przesunięcia przebiegów na odpowiedź sieci neuronowej przedstawiono w postaci zbiorczego wykresu na rys. 7. Kategorie główne (od 1 do 7) odpowiadają kolejnym numerom rozpatrywanych uszkodzeń, natomiast podkategorie (od 1 do 5) – kolejnym przesuniętym przebiegom (zgodnie z rys. 6), na podstawie których sieć miała dokonać klasyfikacji uszkodzenia.

Testujące dane (rys. 6) pochodzą z badań uszkodzenia nr 7, co sieć jednoznacznie sklasyfikowała. Z pozostałych sześciu odpowiedzi można odczytać kierunek, a nawet przybliżoną wartość przesunięcia przebiegu. Świadczy to o poprawnym działaniu nauczonej sztucznej sieci neuronowej.



Rys. 7. Odpowiedzi sieci neuronowej dla przedstawionych przebiegów

Nauczone sztuczne sieci neuronowe deklarowane są w bazie wiedzy i wchodzą w skład systemu ekspertowego tworząc system hybrydowy. Sieci neuronowe uruchamiane są z poziomu bazy wiedzy bez dodatkowe oprogramowania. Zatem końcowy użytkownik nie musi znać tej dziedziny wiedzy, co zmniejsza wymagania względem osoby użytkującej system ekspertowy.

#### 4. SYSTEM EKSPERTOWY

#### 4.1. Baza reguł

Bazę reguł tworzono z wykorzystaniem systemu szkieletowego PC-Shell [10]. W bazie reguł zapisano zebraną i przetworzoną wiedzę ekspercką w postaci pojedynczych reguł. Zapis informacji diagnostycznej w bazie reguł zależy od jej wcześniejszego przetworzenia z wykorzystaniem omówionych wyżej metod (kodowania wielowartościowego, rozrzedzonego kwantowania i próbkowania oraz sztucznych sieci neuronowych).

W wyniku wstępnej selekcji zakresu informacji przewidywanej do wykorzystania w systemie ekspertowym ułatwiony zostaje proces budowy bazy reguł. Otrzymuje się prostsze reguły, pełniej opisujące stan diagnozowanego obiektu pojedyncza reguła może odnosić się do konkretnego uszkodzenia lub grupy uszkodzeń. Baza reguł w tym przypadku jest końcowym etapem przetwarzania eksperckiej wiedzy diagnostycznej.

Projektowany system ekspertowy ma architekturę tablicową, składa się z niezależnych źródeł wiedzy Reguły w każdym pliku źródłowym dotyczą innego podukładu sterowania, co sprawia, że każde źródło wiedzy może stanowić niezależny moduł. Ponadto reguły uporządkowano w sposób, zapewniający podział wiedzy na ogólna i szczegółową. Takie rozmieszczenie reguł oraz zastosowanie wnioskowania wstecz powoduje, że system ekspertowy najpierw stara się zlokalizować uszkodzenia pojedynczych elementów. W razie ich nie wykrycia, w końcowym etapie wnioskowania próbuje ustalić, w którym podukładzie występuje uszkodzenie.

W systemie PC-Shell baza wiedzy ma formę zbioru ponumerowanych reguł składających się z konkluzji i części warunkowej. Poniżej przedstawiono przykładową regułę drugiego poziomu [4, 6]:

*uszkodzenie* = "uszkodzenie obwodu zasilania agregatów zapłonu dopalacza" *if* 

 $\begin{array}{l} DR\_t1=-2 & \& DR\_t2=-2 & \& DR\_t3=-2 & & DR\_t4=-2 \\ \& DR\_t5=-2 & \dots & DR\_t16=-2 & \dots & alfaAKX\_t14=2 \\ \& alfaAKX\_t15=2 & & alfaAKX\_t16=2 & (X:=1.1, \\ Y:=0.9, \qquad X > \#NN1, \qquad Y < \#NN1) \end{array}$ 

Budowa reguł wynika bezpośrednio z zastosowanych metod przetwarzania informacji diagnostycznej, jak i z wyników uzyskanych z tych metod. W regule uwzględniane są jedynie stany/kody tych próbek i/lub wyjść sztucznych sieci neuronowych, które odbiegają od wartości wzorcowych.

Do budowy reguł opracowano specjalne narzędzie w środowisku Matlab, które na podstawie analizy danych generuje reguły w sposób automatyczny. Zapewnia to możliwość modyfikacji i rozbudowy bazy reguł. W przyszłości w połączeniu z innymi narzędziami stanowić będzie moduł automatycznego pozyskiwania wiedzy.

# 4.2. Struktura i działanie ekspertowego systemu diagnostycznego

Projektowany system ekspertowy (rys. 8) bazuje na pakiecie programów Sphinx, z którego głównie wykorzystywany jest symulator sztucznej sieci neuronowej Neuronix, oraz szkieletowy system ekspertowy PC-Shell. Oprócz wyżej wymienionych programów zastosowanie mają programy Microsoft Office oraz środowisko Matlab. Dane pomiarowe umieszczone w arkuszu kalkulacyjnym przesyłane są (z wykorzystaniem DDE) do środowiska Matlab, gdzie podlegają przetworzeniu w sposób opisany w pkt. 3. Odbywa się to poprzez automatyczne uruchomienie szeregu skryptów w środowisku Matlab. Przetworzone dane przesyłane są poprzez program Microsoft Excel do symulatora sieci neuronowej Neuronix oraz do głównego programu systemu ekspertowego PC-Shell, gdzie poprzez analize przesłanych danych automatycznie dodawane są fakty do bazy faktów. Po przesłaniu danych z sieci neuronowej i dodaniu kolejnych faktów rozpoczyna się proces wnioskowania wstecz. Proces ten opiera się na uzgadnianiu bazy faktów z baza reguł. Wybrana konkluzja prezentowana jest użytkownikowi wraz z wyjaśnieniem jak system doszedł do tej konkluzji. Wyjaśnienia te wraz z innymi istotnymi informacjami (np. wynikami z sieci neuronowej) prezentowane są w postaci raportu w programie Microsoft Word. Poza tym dane te sa zapisywane w relacyjnej bazie danych Microsoft Access w celu archiwizacji i późniejszego wykorzystania w procesie testowania i rozwoju ekspertowego systemu diagnostycznego. Szczególnie cenne sa informacje o niepowodzeniach systemu, gdy nie potrafi określić stanu obiektu z wymagana, założoną projektanta przez dokładnościa.



Rys. 8. Struktura systemu ekspertowego

### **5. PODSUMOWANIE**

Wykorzystanie wielowartościowego kodowania, rozrzedzonego próbkowania i kwantowania oraz sztucznych sieci neuronowych umożliwia wybór tylko istotnej części informacji, decydującej o efektywności systemu.

Projektowany system ekspertowy zawiera elementy automatyzacji działania, co umożliwia dokładne testowanie oraz upraszcza modyfikację i rozbudowę. Obniża to również wymagania względem przyszłych użytkowników systemu

Zapisywanie w uporządkowany sposób wszystkich diagnoz generowanych przez system podczas jego eksploatacji, w specjalnie utworzonej do tego bazie relacyjnej, ułatwi przyszłą aktualizację bazy wiedzy.

## Praca finansowana z działalności statutowej SW/WM/3/06.

# LITERATURA

- [1]Borowczyk H., Kącki Cz., Koblański A.: Technologia identyfikacji uszkodzeń turbinowych silników odrzutowych typu 89 przy pomocy stanowiska diagnostycznego KAPSO-17MK. ITWL, Warszawa 1991
- [2] Borowczyk H., Kwieciński R.: Tworzenie bazy reguł ekspertowego systemu diagnostycznego z wykorzystaniem zidentyfikowanego modelu diagnozowanego obiektu. Airplanes and helicopters diagnostics : AIRDIAG'2005 : 8th International Conference, Warszawa, October 27-28, 2005 (S.47-54).
- [3] Borowczyk H., Kwieciński R.: Projektowanie bazy wiedzy ekspertowego systemu diagnostycznego układu sterowania dopalaczem turbinowego silnika odrzutowego. VII Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna: Diagnostyka Procesów Przemysłowych, Rajgród, 12-14.09.2005r. (s.148-150).
- [4] Borowczyk H., Kwieciński R.: Projekt ekspertowego systemu diagnozowania układu sterowania dopalaczem turbinowego silnika odrzutowego. Zeszyty Naukowe PB, Budowa i Eksploatacja Maszyn, Z10, 2003
- [5] Korbicz J., Kościelny J.M., Kowalczuk Z., Cholewa W. (red.): Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania. WNT, Warszawa 2002
- [6] Kwieciński R.: System ekspertowy do diagnozowania układu regulacji silnika turbinowego. Praca magisterska, Politechnika Białostocka, Białystok 2002,
- [7] Kwieciński R.: Ekspertowy system diagnostyczny układu sterowania dopalaczem turbinowego silnika odrzutowego. Rozprawa doktorska (w przygotowaniu)
- [8] Lindstedt P.: Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy. Wyd. Naukowe ASKON, Warszawa 2002

- [9] Lindstedt P., Borowczyk H., Majewski P., Szymczak R.: Opracowanie bazy danych turbinowego silnika odrzutowego dostosowanej do wymagań systemu ekspertowego. Spr. Nr 56/34/2001. ITWL, Warszawa 2001
- [10] Michalik K.: PC SHELL 4.0 Szkieletowy system ekspertowy. AITECH (Artificial Intelligence Laboratory), Katowice 2004
- [11] Mulawka J. J.: Systemy ekspertowe. WNT, Warszawa 1997
- [12] *Silnik AŁ-21F3*, Ministerstwo Obrony Narodowej, Poznań 1978.



Henryk Dr inż. BOROWCZYK. Adiunkt Katedrze Automatyki w i Robotyki Wydziale na Mechanicznym Politechniki Białostockiej i główny Zakładzie specjalista W Silników Lotniczych, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych.

Działalność naukowo-badawcza: kompleksowa diagnostyka lotniczych silników turbinowych z wykorzystaniem teorii informacji, metod identyfikacji matematycznych modeli układów dynamicznych, metod sztucznej inteligencji.



Mgr inż. **Radosław KWIECIŃSKI.** Asystent w Katedrze Automatyki i Robotyki na Wydziale Mechanicznym Białostockiej

Działalność naukowobadawcza: diagnostyka techniczna, systemy ekspertowe. W przygotowaniu rozprawa doktorska pt.:

"Ekspertowy system diagnostyczny układu sterowania dopalaczem turbinowego silnika odrzutowego".

# PROBLEMY DIAGNOSTYKI TECHNICZNEJ OBIEKTÓW BUDOWLANYCH

#### Jerzy SENDKOWSKI

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Świętokrzyskiej Politechnika Świętokrzyska. 25-314 Kielce, ul. 1000-lecia P.P. 3, tel. (041) 342 45 96 e-mail: <u>biuro\_ankra@wp.pl</u>

#### Streszczenie

Na podstawie przeglądu literatury oraz własnych doświadczeń inżynierskich, przedstawiono w pracy aktualny stan wiedzy na temat diagnostyki technicznej obiektów budowlanych. Podano uwarunkowania hamujące diagnostykę techniczną w budownictwie. Pokazano możliwości diagnostyki technicznej obiektów budowlanych, z wykorzystaniem metod właściwych diagnostyce maszyn, diagnostyce maszyn roboczych, procesów. Wykazano potrzebę wprowadzenia symptomów granicznych i alarmowych. Wykazano potrzebę modyfikacji programów nauczania na wydziałach budownictwa wyższych uczelni o naukowe podstawy diagnostyki technicznej. Wskazano, że celowym byłoby wprowadzenie nowego przedmiotu pod nazwą "Diagnostyka techniczna obiektów budowlanych", niezależnie od istniejących rozdrobnionych przedmiotów typu diagnostyka i wzmacnianie konstrukcji stalowych, żelbetowych, drewnianych, kompozytowych czy diagnostyka i wzmacnianie fundamentów.

Słowa kluczowe: diagnostyka, obiekt budowlany, symptomy graniczne, symptomy alarmowe.

# PROBLEMS OF TECHNICAL DIAGNOSTICS OF STRUCTURES

#### Summary

The present state of knowledge of the subject of technical diagnostics of structures was discussed in the paper. The conditions that impede technical diagnostics, which is an important area of knowledge, were presented. The possibilities of technical diagnostics of structures with the use of the methods useful in diagnostics of machinery and processes were also described. The need of introducing a limit and alarm symptoms was stated. It was shown that it is necessary to extend the civil engineering syllabus to include the scientific bases of technical diagnostics. It was indicated that the new subject could replace diverse subjects such as diagnostics and strengthening of steel, concrete timber and composite structures and diagnostics and strengthening of foundations.

Keywords: diagnostics, structures, a limiting symptoms, an alarm symptoms.

#### 1. WPROWADZENIE

Problemy diagnostyki obiektów budowlanych uzbrojonej w poznawcze narzędzia nowoczesnej techniki i technologii nabierają coraz większego znaczenia. Uzmysławiają nam to, występujące co jakiś czas katastrofy budowlane. Choćby ostatnia, tragiczna w skutkach katastrofa budowlana hali Międzynarodowych wystawowej Targów w Katowicach. Z analizy przeprowadzonych ekspertyz hali wystawowej, wynika że zwiększone obciażenie śniegiem, powtarzane kilkakrotnie latach poprzednich było "wykrywaczem" w wrażliwości, niedokładności konstrukcji nośnej hali. wykonanej niezgodnie z warunkami wykonywania i odbioru konstrukcji stalowych, a na pewno lekkomyślnym użytkowaniem. Stąd widać, że symptomowa diagnostyka techniczna obiektów budowlanych jest niezmiernie potrzebna, a jej ujęcie holistyczne<sup>1</sup> jest tutaj właściwe.

## 2. OBECNY STAN DIAGNOSTYKI TECHNICZNEJ OBIEKTÓW BUDOWLAYCH

W inżynierskim, budowlanym ujęciu przez diagnostykę rozumie się ogół czynności

Holizm – teoria rzeczywistości, zgodnie z którą świat (natura), przyroda, technika stanowi całość hierarchicznie złożoną z licznych całościowych części niższego rzędu i podlegających dynamicznym twórczym ewolucjom prowadzącej do powstania coraz to nowych jakościowo różnych całości (nieredukowalnych do sumy swych części),

metodologiczny pogląd wg którego wszelkie zjawiska tworzą układy całościowe, podlegające swoistym prawidłowościom, których nie można wywnioskować na podstawie wiedzy o prawidłowościach rządzących ich składnikami.

i czynników potrzebnych do postawienia diagnozy – czyli rozpoznania stanu obiektu budowlanego na podstawie stwierdzonych objawów. Diagnozy wtedy zwykle obejmują opis stanu obiektu, ocenę zaobserwowanego stanu obiektu budowlanego oraz przyczyny, które doprowadziły do wystąpienia tego opisanego stanu. Końcowym etapem tak postawionej diagnozy jest wskazanie czynności i środków mających na celu eliminację skutków oddziaływania, opracowanie sposobu eksploatacji, naprawy lub remontu.

Z przeglądu literatury z zakresu budownictwa dotyczącej diagnostyki jako szczególny przypadek diagnostycznego uznawana działania jest diagnostyka dynamiczna obiektów budowlanych, gdzie oddziaływania noszą charakter parasejsmiczny (oddziaływanie spowodowane działalnością człowieka, a przenoszone na obiekty budowlane przez podłoże gruntowe). Wiele publikacji z tego zakresu posiada ośrodek krakowski, poprzez prace grupy skupionej wokół E. Maciąga, J. Kaweckiego, T. Tatary, K. Stypuły i innych, w które znaczący wkład włożył R. Ciesielski [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Większość prac z zakresu diagnostyki dotyczy podejścia można powiedzieć inżynierskiego [7] gdzie np. w pracy pt. Diagnostyka i wzmacnianie konstrukcji żelbetowych, omawiane są zagadnienia niezawodności konstrukcji budowlanych, awaryjność konstrukcji budowlanych wraz z charakterystyką i analizą awarii katastrof konstrukcji wraz z przyczynami ich występowania. Omawiane są zasady diagnozowania konstrukcji żelbetowych, niszczące i nieniszczące metody badania konstrukcji żelbetowych, oceny niezawodności elementów i konstrukcji żelbetowych takich jak słupy, ściany, fundamenty, stropy, belki, dźwigary, kominy, zbiorniki, silosy, chłodnie itp.. Omawiane jest wzmacnianie elementów i konstrukcji żelbetowych takich jak fundamenty, słupy, ściany, belki dźwigary, kominy, zbiorniki, silosy, chłodnie itp." Oprócz tego W rozdziale metody diagnostyczne badania konstrukcji żelbetowych, omawiane są badania wytrzymałości betonu, nieniszczące badania betonu w konstrukcji (sklerometryczne i ultradźwiękowe), badanie zbrojenia w konstrukcjach oraz żelbetowych (radiologiczne, radiograficzne, Ponadto elektromagnetyczne). omawiane sa w pracy problemy izolacyjności cieplnej przegród budowlanych, promieniotwórczości naturalnej materiałów budowlanych oraz badania izolacyjności akustycznej przegród budowlanych.

Generalnie takie podejście do diagnostyki kojarzy się i jest utożsamiane nieodmiennie z medycyną.

W zasadzie w dyscyplinie naukowej budownictwo nie jest prawidłowo zdefiniowana diagnostyka techniczna. Nie ma wprowadzonego słownika w zakresie diagnostyki technicznej obiektów budowlanych, a terminologia nie jest ujednolicona. Pod pojęciem diagnostyki [2] zwykle rozumie się uszkodzenie obiektu budowlanego (choroba) na podstawie jego objawów. Nie wychodzi się poza dalszą fazę np. określoną choćby definicją podaną w Słowniku wyrazów obcych i obcojęzycznych (Kopaliński 1977), gdzie przez diagnostykę definiuje się dziedzinę wiedzy, która zajmuje się rozpoznawaniem badanego stanu rzeczy przez zaliczenie go do znanego typu lub gatunku, przez przyczynowe i całościowe (holistyczne) wyjaśnienie stanu rzeczy, określenie jego fazy obecnej oraz przewidywanego dalszego rozwoju.

Na szczególną uwagę wobec takiego stanu rzeczy zasługuje praca [5] J. Kaweckiego pt. Perspektywy rozwoju diagnostyki budowli, gdzie autor podaje schematy postepowania diagnostycznego w przypadku oddziaływania na obiekt typu parasejsmicznego, postępowania w przypadku opracowania diagnozy dotyczącej prognozy zachowania się obiektu. Omawia wykorzystanie badań doświadczalnych w procedurze diagnostycznej. Omawia badania doraźne (na użytek danej diagnozy, oraz badania systematyczne (okresowe i ciągłe). Omawia kształtowanie bazy wiedzy poprzez akwizycję informacji diagnostycznych. Ustosunkowuje się do sposobu kształtowania bazy wiedzy i korzystania z niej poprzez systemy doradcze (ekspertowe albo eksperckie). Pokazuje możliwości wykorzystania metod sztucznej inteligencji w diagnostyce technicznej obiektów budowlanych, poprzez określenie związków pomiędzy stanami obiektów a parametrami diagnostycznymi (symptomami). W podsumowaniu autor nakreśla perspektywy rozwoju diagnostyki budowlanej, ze szczególnym zwróceniem uwagi na diagnostyke dynamiczna budowli. Pokazuje możliwości rozwoju z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi i metod badawczych, z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych, logiki rozmytej i metod sztucznej Ponadto wskazuje, że rozwój inteligencji. diagnostyki technicznej obiektów budowlanych będzie zmierzał w podobnym kierunku w jakim zmierza diagnostyka maszyn, układów mechanicznych i procesów przemysłowych.

Inną cenną pracą tegoż autora jest publikacja [4].

W pracy tej autor omawia metody i aparaturę do diagnostyki obiektów budowlanych poddanych działaniom dynamicznym. Po ogólnej prezentacji zakresu diagnostyki dynamicznej, omawia pomiary drgań w procedurze diagnostycznej, cel pomiarów dynamicznych, dobór zestawu pomiarowego, wyniki pomiarów diagnostycznych wykorzystywanych w diagnozie. Podaje jako pierwszy, kryteria diagnostyczne, odnoszące się do konstrukcji (warunek wytrzymałości dynamicznej, warunki sztywność, warunki konstrukcyjne, warunki technologiczne), wykorzystując Skale Wpływów Dynamicznych SWD [3]. Podaje kryteria diagnostyczne odnoszące się do urządzeń wrażliwych na drgania, a znajdujące się w obiektach budowlanych poddanych wpływom parasejsmicznym. Kryteria odnoszące się do ludzi przebywających w obiektach budynkach.

W dziedzinie budownictwa z problemami diagnostyki obiektów budowlanych rozumianymi ogólnie, można się zetknąć na konferencji poświęconej awariom budowlanym, organizowanej co 2 lata pod nazwą: "Konferencja Naukowo Techniczna pt. Awarie Budowlane", która organizowana jest niezmiennie w Szczecinie -Międzyzdrojach. Dotyczy ona następujących zagadnień: zapobieganie awariom, diagnostyki, napraw i rekonstrukcji obiektów budowlanych. I tak, na konferencji Awarie Budowlane 2005 nie opublikowano żadnego artykułu poświeconego bezpośrednio diagnostyce obiektu budowlanego w czystej postaci (na wzór diagnostyki maszyn), zastosowaniem metod diagnostycznych Z i procedur wykorzystywanych w diagnostyce procesów i urządzeń mechanicznych.

W innej, corocznej ogólnopolskiej konferencji naukowo technicznej zwanej konferencją "krynicką" organizowanej już od ponad 50 lat, poświęconej aktualnym problemom naukowo technicznym w budownictwie również nie spotyka się prac z zakresu diagnostyki technicznej obiektów budowlanych.

W trwającej ogólnopolskiej dyskusji nad kształceniem na kierunku budownictwo [8, 9] zbyt mało mówi się o udziale metod eksperymentalnych w procesie kształcenia (ograniczając nawet liczbę godzin laboratoryjnych W poszczególnych specjalnościach) niezbędnych w diagnostyce technicznej obiektów budowlanych. Sygnalizuje się jednak potrzebe wprowadzenia tzw. czasowej mechaniki materiałów i konstrukcji, gdyż nośność bezpieczeństwo obiektów i konstrukcii i budowlanych maleje w czasie. Są to zagadnienia bezpośrednio związane z diagnostyką techniczną i diagnostyka obiektów budowlanych.

opracowanym W projekcie standardów kształcenia na kierunku budownictwo w zakresie studiów pierwszego i drugiego stopnia z kwietnia 2006, nie ma elementów związanych z diagnostyką techniczna w budownictwie. W siatce godzin traktowanych jako minima programowe, nie ma miejsca na kształcenie w zakresie analizy wymiarowej, planowania i prowadzenia eksperymentu, metod eksperymentalnych, opracowania wyników pomiarów elementów, obiektów i systemów konstrukcyjnych, itp. Laboratoria zwykle prowadzone są w trybie demonstracyjnym, lub co się nawet zdarza, bez przeprowadzania jakichkolwiek pomiarów. Wprowadzone przedmioty typu diagnostyka wzmacnianie konstrukcji podzielonej wø (stalowe, żelbetowe, specialności drewniane. kompozytowe) oraz diagnostyka i wzmacnianie fundamentów nie odpowiadają potrzebom

diagnostyki technicznej całego megasystemu, subsystemu, systemu czy elementowi budowlanemu obiektu technicznego. Realizuje się nadal w kształceniu podejście od szczegółu do ogółu, a diagnostyka techniczna wymaga podejścia naturalnego: od ogółu do szczegółu, niezależnie od typu konstrukcji i interakcji obiektu budowlanego z podłożem.

# 3. PROGNOZOWANIE STANU OBIEKTU BUDOWLANEGO

Obecne metody diagnostyki technicznej maszyn i urządzeń technicznych umożliwiają prognozowanie stanu maszyn i urządzeń technicznych, przy użyciu dostępnych metod i podejść.

Prognozowanie stanu obiektów budowlanych odbywa sie tradycyjnymi metodami, właściwymi początkowemu stanowi diagnostyki technicznej i jest zbliżone do prognozowania w medycynie. Natomiast występuje silna potrzeba wyznaczania okresowości badania i określana kolejnego stanu technicznego obiektu, kolejnego remontu czy kapitalnego. Zwykle remontu wg Prawa Budowlanego to okresy jednoroczne są i pięcioletnie. Nie ma naukowych podejść do wyznaczania okresowości diagnostyki tzw. obiektów budowlanych wynikających bezpośrednio z przeprowadzonej diagnostyki obiektu np. wszelkiego rodzaju kominów, masztów i wież. Pomocne są tutaj wymagania określone stosownymi przepisami i normami, które można nazwać symptomami granicznymi i awaryjnymi traktowane jako wartości graniczne stanu użytkowania i stanu granicznego nośności.

# 4. KIERUNKI DALSZEGO ROZWOJU DIAGNOSTYKI TECHNICZNEJ OBIEKTÓW BUDOWLANYCH

Według autora niniejszego artykułu rozwój diagnostyki technicznej obiektów budowlanych będzie odbywał się z wykorzystaniem dorobku "diagnostyki ogólnie mówiąc obiektów mechanicznych" i wiedzy ekspertów z zakresu budownictwa, zebranej bazie wiedzy W diagnostycznej. Wykorzystywane beda energetyczne metody diagnostyki dynamicznej, sieci neuronowe, metody sztucznej inteligencji, systemy doradcze, algorytmy genetyczne i inne narzędzia informatyczne łącznie z technologiami telekomunikacyjnymi (jak systemy transmisji 3G/GPRS, WLAN, danych np. itp.) wykorzystywane w monitoringu ciągłym lub okresowym obiektów budowlanych np. mostów). We wszystkich omawianych problemach rozwój diagnostyki obiektów budowlanych odbywać sie będzie przy gwałtownym rozwoju technologii informatycznych i technologicznych (również w technice pomiarowej). Rozwijać będą się metody i kryteria szacowania bezpieczeństwa obiektów budowlanych.

#### 4.1. Energetyczna diagnostyka dynamiczna

Przyszłościowe zastosowanie w diagnostyce obiektów budowlanych znajdzie energetyczna diagnostyka dynamiczna obiektów budowlanych. Podstawy teoretyczne tego podejścia można znaleźć w pracy [10].

Na rys. 1 pokazano graficzną zasadę przepływu energii w konstrukcji nośnej obiektu budowlanego i model przepływu energii w obiekcie budowlanym, jego elementach i subsystemach.



Rys.1. Graficzna interpretacja zasady przepływu energii w obiekcie budowlanym i ogólny model przepływu energii w obiektach budowlanych, jego subsystemach i elementach

Podstawa energetycznej teoretyczną jest zasada: Przyrost energii diagnostyki wprowadzonej (we) do obiektu budowlanego (nośnego systemu konstrukcyjnego) pomniejszony o przyrost energii strat jest równy sumie przyrostów odbitej (zakumulowanej energii lub zmagazynowanej - od) w systemie i energii wyjściowej (wy) z systemu.

Przepływ energii jest niczym innym jak przyrost energii w jednostce czasu. Może być określony w czasie jednej sekundy, godziny lub w czasie jednego okresu drgań systemu konstrukcyjnego. W zapisie matematycznym przedstawi to wyrażenie (1, 2, 3, 4, ).

gdzie:

$$\Delta E_{we} - \Delta E_{str} = \Delta E_{od} + \Delta E_{wy}, \qquad (1)$$

$$\Delta E_{we} - L_{szwe} = \int_{A}^{B} W_{szwe} \vec{ds}$$
 (2)

przyrost energii wprowadzonej (we) do sytemu konstrukcyjnego równoważny pracy sił zewnętrznych działający na system na wejściu (szwe),

$$\Delta E_{str} = \Delta E_{wew str} + L_{szor} = \Delta E_{wew str} + \int_{A}^{B} \overrightarrow{R}_{szor} \overrightarrow{ds} \quad (3)$$

przyrost energii straconej (str), równoważny z sumą przyrostu energii straconej wewnętrznie (wew str) w systemie oraz pracy sił zewnętrznych oporu ruchu (szor) systemu konstrukcyjnego,

$$\Delta E_{od} = \Delta (E_k + U) \tag{4}$$

przyrost energii zakumulowanej lub zmagazynowanej (od) w systemie konstrukcyjnym, równy przyrostowi energii wewnętrznej (wew str) sytemu konstrukcyjnego, którą to nazwano [10] energią odbitą (od) w systemie konstrukcyjnym,

$$\Delta E_{wv} = L_{sz wv}$$
 (5)

przyrost energii wyjściowej (wy) równoważny z pracą sił zewnętrznych (sz) na wyjściu (wy) z systemu konstrukcyjnego.

Na rys. 1 pokazano interpretację graficzną podanej zasady i płynące strumienie energii wejściowej, wyjściowej, straconej i odbitej przedstawione jako paski o szerokości proporcjonalnej do wartości energii poszczególnych strumieni. Zasada ta dotyczy każdego stopnia swobody ustroju konstrukcyjnego, całego systemu, subsystemu, megasystemu itp. Zasada ta ma własności fraktalne.

W inżynierii lądowej wykorzystuje się w bilansie energetycznym systemu konstrukcyjnego równania Lagrang'e II rodzaju.

#### 4.2. Wykorzystanie sieci neuronowych

Poza wymienia wyżej energetyczna diagnostyka dynamiczna, szeroko wykorzystywane w diagnostyce obiektów budowlanych, jak zreszta i w diagnostyce maszyn są i będą sieci neuronowe jako narzędzia informatyczne. Wskazywał na to w pracy [5] J. Kawecki. Na rys. 2 pokazano schemat przykładowego neuronowego układu diagnostycznego opisanego w pracy [11]. Tak jak w diagnostyce maszyn również w diagnostyce obiektów budowlanych proces diagnostyczny rozpoczyna się od doboru reprezentującego obiekt budowlany zbioru sygnałów wejściowych i wyjściowych. Definiuje się architekturę sieci, liczbę neutronów, uporządkowanie w warstwy, połączenia synaptyczne i inne parametry struktury sieci. Następnie ustalane są parametry swobodne sieci w automatycznym procesie nauczania, przy użyciu obrazów uczących. Na ostatku ocenia się sieć, biorąc pod uwagę zdolność odtwarzania żądanej relacji wejście /wyjście, szybkość uczenia i jej zdolność uogólniania. Proces diagnostyki przy użyciu sieci neuronowej kończy się wtedy gdy miara końcowej jakości nie przyjmie wartości satysfakcjonującej.

Wykorzystywane będzie przetwarzanie informacji zawartych w systemach diagnostycznych z wykorzystaniem metod teorii modelowania i sterowania.
Na rys. 2 pokazano przykładowy układ diagnostyki obiektu z wykorzystaniem diagnozowanego modelu obiektu budowlanego. Budowanie modeli diagnozowanych obiektów z wykorzystaniem sztucznej inteligencji wykonuje się poprzez wykorzystanie danych pomiarowych, zasad i reguł funkcjonowania obiektu oraz wiedzy jakościowej uzyskanej od ekspertów. Otrzymuje się modele jakościowe lub jakościowo ilościowe. A techniki sztucznej inteligencji i ich możliwości stosowania pokazano na kolejnym rysunku (rys. 3) za pracą [11].



Rys. 2. Schemat diagnostyki obiektów budowlanych z modelem, przy użyciu metod sztucznej inteligencji [11]

Na rys. 4 pokazano konkretną realizację układu z rys. 3. Przedstawiony układ realizuje dwa zadania. Generację wektora resztkowego oraz jego ewolucji zmierzającej do wybrania właściwego stanu diagnozowanego systemu.

Przez u(k) oznaczono sygnały wejścia do obiektu budowanego, przez y(k) oznaczono symptomy odpowiedzi obiektu budowlanego na sygnały wejściowe u(k),  $f_i$  - rozpatrywane stany obiektu budowlanego, przez  $r_i$  oznaczono residua dla różnych stanów obiektu budowlanego.



# Rys. 3. Przykładowa struktura neuronowego systemu diagnostycznego dla obiektu budowlanego [11]





# 5. WNIOSKI

Biorą pod uwagę różnorodność i liczbę prac zakresu diagnostyki technicznej dotyczącej z maszyn i pojawiające się pierwsze prace z diagnostyki technicznej obiektów budowlanych, podane w tej pracy problemy diagnostyki technicznej obiektów metod i podejść stosowanych w diagnostyce maszyn moga być przeniesione na obszar diagnostyki dynamicznej obiektów budowlanych, pracujących większości w stanach choć spreżystych, wielu przypadkach w nieliniowych.

Potrzebne jest jednak podejście od ogółu do szczegółu. Wymaga to wiedzy eksperckiej wyposażonej w silne narzędzia pomiarowe, narzędzia akwizycji danych, narzędzia obliczeniowe Podział itp. na wasko specjalności wyspecjalizowane W dziedzinie budownictwa nie sprzyja rozwojowi diagnostyki technicznej w budownictwie. Jest duże pole dla działalności naukowej i inżynierskiej w tej interdyscyplinarnej dziedzinie nauki.

Przygotowanie wyniesione ze studiów na kierunkach budowanych nie jest wystarczające do zajmowania się diagnostyką techniczną w budownictwie. Na studiach trzeciego stopnia widzę możliwość pozyskiwania wiedzy niezbędnej w diagnostyce dynamicznej obiektów budowlanych, lub na studiach indywidualnych drugiego i trzeciego stopnia.

Widząc występujące rozbieżności pomiędzy teorią i praktyką, potrzebne jest pełniejsze wiązanie teorii z praktyką, szczególnie jest to widoczne w dziedzinie budownictwo, w problemach diagnostyki technicznej, gdzie wiedza eksperta jest niezbędna. Stosowanie na szerszą skalę np. Hybrydowego Wnioskowania Diagnostycznego HWD [12 do 21] z całą pewnością przyczyni się do wydawania wiarygodnych (nie subiektywnych), merytorycznych diagnoz o stanie obiektów budowlanych. Potwierdza się to i nie ulega najmniejszej watpliwości, że diagnostyka obiektów budowlanych opierać sie bedzie na interdyscyplinarnych naukowych, podstawach z korzyścią dla właścicieli obiektów (ochrona ludzi i mienia). Ponadto zredukuje liczbę niepotrzebnych awarii i katastrof, z którymi mieliśmy ostatnio do czynienia.

# LITERATURA

- Ciesielski R.: "Specyfika diagnostyki dynamicznej na tle diagnostyki ogólnotechnicznej w budownictwie"; Mat. Seminarium Diagnostyka dynamiczna w budownictwie, Kraków 1993, str. 7-18.
- [2] Ciesielski R., Kawecki J.: "Podstawy diagnostyki dynamicznej konstrukcji z betonu"; Materiały z sesji "Diagnostyka i wzmocnienie konstrukcji żelbetowych"; ITB, Warszawa, 1994.
- [3] Diagnostyka dynamiczna w budownictwie; Seminarium Instytutu Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej, Komisja Budownictwa Oddziału Krakowskiego PAN, Kraków, 1993r.
- [4] Kawecki J.: Metody i aparatura do diagnostyki obiektów budowlanych poddanych działaniom dynamicznym; Problemy Rzeczoznawstwa Budowlanego, VII Konferencja Naukowo Techniczna, Warsztat pracy rzeczoznawcy budowlanego ITB, Cedzona k. Kielc, 2004r.
- [5] Kawecki J.: Perspektywy rozwoju diagnostyki budowli; Inżynieria i Budownictwo, Nr 9, 1998r, str. 477-481.
- [6] Ciesielski R., Kawecki J.: "Diagnostyka konstrukcji poddanych obciążeniom dynamicznym"; Mat II Konf. Nauk.-Tech. Warsztat pracy rzeczoznawcy budowlanego, Pol. Świętokrzyska, Kielce 1996, cz. I, str. 61-76.
- [7]. Runkiewicz L.: *Diagnostyka i wzmacnianie konstrukcji żelbetowych*; Materiały pomocnicze i Informacyjne nr 93, Politechnika Świetokrzyska, 1999r.
- [8] Ogólnopolska Konferencia Naukowo Dydaktyczna, Kształcenie Na Kierunku Problemv Budownictwo. studiów wielostopniowych, Kielce - Cedzyna, 22-24 październik, 2003r. Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Seria BUDOWNICTWO, nr 43.
- Konferencja [9] Π Krajowa Naukowo-Dydaktyczna, Kształcenie Na Kierunku Budownictwo; Problemy studiów wielostopniowych, Kielce-Cedzyna, 19-21 październik, 2005r, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Seria BUDOWNICTWO, nr 45.
- [10] Dobry M. W: Podstawy teoretyczne uogólnionej, energetycznej diagnostyki struktur mechanicznych biomechanicznych systemów biomechanicznych, Diagnostics 2000, II International Congress of Technical Diagnostics, 19-22, September 2000, Warszawa 2000, str.95-105.

- [11] Korbicz. J.; Optymalizacja modelowania neuronowego w diagnostyce procesów, Diagnostics 2000, II International Congress of Technical Diagnostics, 19-22, September 2000, Warszawa 2000, str. 107-113.
- [12] Sendkowski J.: Hybrydowe wnioskowanie diagnostyczne w ocenie stanu technicznego obiektów budowlanych. Przegląd budowlany. Warszawa Nr 9. 2006.
- [13] Michalski R., Rychlik A.: Budowa hybrydowego systemu ekspertowego; Problemy Eksploatacji, 3/2001 (42).
- [14] *Diagnostyka Maszyn Roboczych* pod red. Michalskiego R., ITE, Olsztyn 2004.
- [15] Michalski R.: Diagnostyka uszkodzeń w hybrydowym systemie utrzymania maszyn, Mat. V Konferencji "Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów", WAT, Ustroń, 2003
- [16] Michalin K.: PC-Shell 4.0, Szkieletowy system ekspertowy, Podręcznik użytkowania, ETACH. Katowice 2003.
- [17] XXXIII Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka 06.03-11.03.2006, Wydział Transportu Politechniki Śląskiej, Katowice 2006
- [18] Diagnostyka; Polskie Towarzystwo Diagnostyki, Warszawa Vol. 25, 30, 31, 32, 33, 34, 36.
- [19] Kamieński M.: Diagnozowanie i wzmacnianie zbiorników i silosów żelbetowych; Problemy Rzeczoznawstwa Budowlanego, IX Konferencja Naukowo Techniczna, ITB, Cedzona k. Kielc, 24-26 kwietnia 2006r.
- [20]. Metrologia w procesie poznania; KONGRES METROLOGII, Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 6-9 września 2004.
- [21] Diagnostyka procesów; Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania. Pod red.
   J. Korbicza, J. Kościelnego, Z. Kowlaczyka, W. Cholewy, WNT, Warszawa, 2002.



Jerzy SENDKOWSKI, doktor nauk technicznych

w Katedrze Mechaniki Budowli na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Doktorat obroniony na Wydziale Inżynierii Lądowej

Politechniki Warszawskiej w 1989r na temat "Trwała nośność graniczna ustrojów kratowych". Rzeczoznawca Budowlany wpisany na Centralną Listę Rzeczoznawców w zakresie konstrukcyjno budowlanym. Autor i współautor 35 artykułów w czasopismach technicznych i konferencjach naukowo technicznych. Autor i współautor ponad 1100 ekspertyz z zakresu konstrukcji inżynierskich. Zajmuje się diagnostyką techniczną obiektów budowlanych i metrologią w budownictwie.

# **BEZPRZEWODOWY SYSTEM POMIAROWO-DIAGNOSTYCZNY**

#### Tomasz BOJKO, Grzegorz CHMAJ

# Katedra Robotyki i Mechatroniki, Akademia Górniczo-Hutnicza al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, +12-634 35 05, <u>bojko@agh.edu.pl</u>

# Streszczenie

Technologie wykorzystujące bezprzewodową transmisję danych są obecnie jedną z najszybciej rozwijających się gałęzi elektroniki. Dzięki zastosowaniu nowoczesnych podzespołów elektronicznych możliwa jest budowa inteligentnych układów pomiarowych znajdujących zastosowanie w pomiarach i diagnostyce urządzeń i budowli. W artykule opisano aplikację bezprzewodowych modułów pomiarowych z systemem TinyOS opracowaną do pomiarów związanych z diagnostyką strukturalna. Przedstawiono opracowane przez autorów artykułu oprogramowanie oraz uzyskane rezultaty pomiarów. Opisano również nowo projektowany system z synchronizacją pomiarów za pomocą odbiornika GPS.

Słowa kluczowe: systemy pomiarowe, analiza modalna, diagnostyka.

#### WIRELESS MEASUREMENT SYSTEM

#### Summary

Wireless data transfer technologies are one of the fastest developed applications in electronics. Recent technological advances have enabled the development of intelligent measurement sensor devices which can be applied in measurement and diagnostics of machines and civil constructions. In the paper the wireless measurement system based on TinyOS operating system was presented. This system was developed for structural health monitoring applications, The developed PC software and results of laboratory experiments was presented. In the paper the description of new developed system with GPS synchronisation was described.

Keywords: measurement systems, modal analysis, diagnostics.

# 1. WSTEP

Szybki postęp elektroniki umożliwił rozwój i zastosowanie zaawansowanych układów sensorycznych w diagnostyce. Dzięki zastosowaniu w tych układach mikrokontrolerów możemy realizować w nich nie tylko zadania związane z przetwarzaniem danych, ale również zadania obliczeniowe i związane z transmisją danych [1].

Wiele z oferowanych rozwiązań inteligentnych czujników pomiarowych bazuje na bezprzewodowej transmisji danych, która ułatwia, przyśpiesza zmniejsza koszty instalacji i systemu Rozwiązania diagnostycznego [2]. związane z bezprzewodowymi układami pomiarowymi są jedną z najszybciej rozwijających się dziedzin elektroniki. Pojawienie się nowych układów do bezprzewodowej transmisji danych umożliwia budowanie nowych, coraz bardziej wydajnych i zużywających coraz mniej energii układów pomiarowo diagnostycznych.

W niniejszym artykule opisano prace prowadzone w KRiM AGH, zmierzające do opracowania bezprzewodowego systemu pomiarowego przeznaczonego dla rozległych obiektów technicznych, takich jak np. mosty.

# 1.1. Wymagania stawiane bezprzewodowemu systemowi pomiarowo-diagnostycznemu

Analizując wymagania stawiane układom pomiarowym stosowanym w diagnostyce strukturalnej, wymienić można kilka istotnych parametrów, którymi powinien cechować się projektowany system.

Najistotniejszym z wymagań jest czasowa synchronizacja pomiarów realizowanych przez autonomiczne moduły pomiarowe. W układzie standardowym czujniki pomiarowe połączone są z jednostką akwizycji danych pomiarowych przez połączenia sztywne, natomiast przy zastosowaniu układów bezprzewodowych konieczne jest opracowanie mechanizmu synchronizacji pomiaru. Schemat klasycznego oraz bezprzewodowego układu pomiarowego pokazano na rys. 1.

Charakter transmisji radiowej oraz możliwości i parametry oferowanych rozwiązań sprzętowych ukierunkowują nasz wybór na rozwiązania, w których można bezpośrednio, z możliwie małymi opóźnieniami sterować pracą toru radiowego. Przykładem takiego rozwiązania są moduły radiowe zbudowane na bazie układów firmy Chipcon np. CC1000 [3]



Rys. 1. Klasyczny i bezprzewodowy system pomiarowy

Układy radiowe zbudowane z zastosowaniem wymienionych modułów cechują się dużą wydajnością, nieskomplikowaną konstrukcją, niską ceną oraz niskim zużyciem energii.

Bezprzewodowe moduły pomiarowe stosowane w diagnostyce powinny również cechować się odpornością na wpływ temperatury. Zastosowanie modułów pomiarowych do pomiarów budowli i konstrukcji wiąże się z wpływem czynników środowiskowych, a w szczególności wpływem temperatury, która może zmieniać się w szerokich granicach. Zastosowanie standardowych metod kompensacji wpływu temperatury, stosowanych w układach stacjonarnych nie jest możliwe z uwagi na brak odpowiednio wydajnego źródła zasilania. Należy więc skupić się na innych metodach, umożliwiajacych kalibracje i synchronizacje niezależnych układów pomiarowych.

# 1.2. Rozwiązania bezprzewodowych czujników pomiarowych dla potrzeb diagnostyki

Szczególnie trudna z technicznego punktu widzenia jest synchronizacja pomiaru, realizowanego przez system niezależnych czujników. Analizując dostępne rozwiązania można stwierdzić, że koncentrują się one wokół dwóch ogólnych schematów sieci bezprzewodowych.

Pierwsze z nich charakteryzuje wykorzystanie wielu kanałów pasma radiowego do synchronicznej transmisji danych z czujników. Rozwiązanie to przedstawiono schematycznie na rys. 2.



Rys. 2. Bezprzewodowa transmisja wielokanałowa sygnałów pomiarowych

Istotnym ograniczeniem tego rozwiązania jest liczba kanałów w wybranym paśmie transmisji oraz to, że każdy z nadajników musi posiadać swój odbiornik, co czyni system skomplikowanym oraz drogim. Bezprzewodowe systemy transmisji danych bazujące na tym rozwiązaniu oferowane są przez szereg firm, w tym firmę MicroStrain Inc [4].

Drugie z możliwych rozwiązań polega na budowie inteligentnych modułów pomiarowych wyposażonych w układy pamięci, w których podczas sesji pomiarowej gromadzone są dane. Zgromadzone dane pomiarowe wraz ze znacznikiem czasowym przesyłane są, po pomiarze, kolejno do odbiornika stacji bazowej, gdzie podlegają archiwizacji i dalszej obróbce. Schemat blokowy opisanego rozwiązania przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Bezprzewodowy system pomiarowy z inteligentnymi modułami pomiarowymi i jedną stacją bazową

Istotnym problemem tego rozwiązania jest synchronizacja podczas pomiaru poszczególnych modułów pomiarowych. Problemem pozostaje również wpływ temperatury na dokładność synchronizacie svgnału zegarowego dla mikrokontrolerów, w które wyposażone sa moduły. Mimo tej niedogodności systemy bazujące na modułach inteligentnych są jednymi z najczęściej oferowanych rozwiazań zakresu Z bezprzewodowych pomiarowych. układów Przykładem rodziny takich układów są moduły MICA2 oferowane przez firmę Crossbow Inc. [5], które zastosowano w podczas pomiaru opisanego w dalszej części artykułu.

# 2. ZASTOSOWANIE UKŁADÓW MICA2 ORAZ SYSTEMU TINYOS

# 2.1. Aplikacja pomiarowa w systemie TINYOS

Oprogramowanie pomiarowe inteligentnych modułów zastosowanych podczas pomiaru testowego, wykonano w systemie operacyjnym TinyOS [6]. System przystosowany jest do obsługi inteligentnych bezprzewodowych modułów pomiarowych. Dostarczany z systemem TinyOS kompilator języka nesC umożliwia łatwe i szybkie projektowanie aplikacji użytkownika za pomocą standardowych komponentów takich jak: proces główny, zegar, obsługa pamięci, funkcje transmisji bezprzewodowej.

Architektura języka nesC uwalnia użytkownika od technicznych aspektów związanych ze specyfiką sprzętu. Ten sam program użytkownika, po uprzednim skompilowaniu, może być uruchamiany na wszystkich platformach sprzętowych dostępnych w systemie TinyOS. Zadaniem programisty jest zatem jedynie ustalenie logiki działania programu i poprawne wykorzystanie dostępnych metod.

Schemat współdziałania i zależności pomiędzy zastosowanymi w opracowanym programie interfejsami przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Schemat współdziałania komponentów w opracowanej aplikacji pomiarowej.

Aplikacja pomiarowa współdziała z opracowanym przez autorów artykułu programem Mote Viewer, który umożliwia komunikację pomiądzy komputerem bazowym i modułami pomiarowymi, zarządzanie przesłanymi danymi pomiarowymi, testowanie modułów oraz ich konfigurację. Schemat blokowy kompletnego systemu oraz opis aplikacji MoteViewer zostanie przedstawiony w kolejnych podrozdziałach.

# 2.1. Struktura opracowanego systemu pomiarowego z modułami MICA2 i aplikacją Mote Viever

Na rys. 5 został przedstawiony schemat blokowy opracowanego systemu pomiarowego. Jak wynika ze schematu, aplikacja Mote Viewer wykorzystując port szeregowy komputera klasy PC, komunikuje się ze stacją bazową sieci. Zadaniem stacji bazowej jest wysyłanie oraz odbieranie odpowiednio skonstruowanych sieciowych. pakietów W podstawowym cyklu pracy, aplikacja Mote Viewer wysyła rozkaz rozpoczęcia pomiaru do wszystkich modułów w sieci, a następnie kolejno z każdego modułu odczytuje zarejestrowane dane i udostępnia innym aplikacjom. Aby rozpocząć pomiar wszystkich modułach we sieci bezprzewodowej, Mote Viever wysyła odpowiednio skonstruowany pakiet sieciowy zawierający między innymi informację do kogo adresowany jest pakiet.

Każdy moduł posiada nadany swój unikalny adres sieciowy i w normalnym cyklu pracy analizuje przychodzące pakiety w celu wyłapania pakietów zaadresowanych do niego. Wysyłając do modułów pakiet, w którym adres sieciowy ustawiony jest na 65535 wywoływany jest jego odbiór przez wszystkie węzły w sieci i następuje rozpoczęcie pomiaru. W ten sposób aplikacja wysyła rozkaz startu pomiaru do wszystkich modułów. Po odebraniu rozkazu startu pomiaru, niezależne moduły rozpoczynają pomiar. Ustawienie częstotliwości próbkowania oraz liczby próbek do zarejestrowania umieszczana jest w pakiecie konfiguracyjnym wysyłanym przed rozpoczęciem sesji pomiarowej.



Rys. 5. Komunikacja aplikacji Mote Viewer z bezprzewodowym systemem pomiarowym

Po zarejestrowaniu i umieszczeniu przez moduły w pamięci danych pomiarowych aplikacja Mote Viever wysyła następne do każdego modułu pakiet zawierający rozkaz odczytu danych. W tym przypadku każdy wysłany pakiet zostaje zaadresowany pojedynczego modułu do i w momencie odebrania go przez adresata rozpoczyna się transfer zarejestrowanych danych do stacji bazowej. Dane z każdego modułu zostają zgromadzone w aplikacji MoteViewer, gdzie możliwa jest ich dalsza obróbka przez użytkownika systemu.

# 2.2. Struktura aplikacji MOTE VIEWER

Strukturę aplikacji akwizycji danych pomiarowych wraz z dodatkowymi modułami klas zbudowano w języku UML [7] i przedstawiono na rys. 6. Diagram klas generowany jest przez kompilator w języku angielskim i wynika to ze specyfiki kompilatora.

Całość aplikacji składa się z szeregu klas pełniących odpowiednie funkcje oraz panelu użytkownika - Graphics User Interface (GUI) - skąd cała aplikacja jest sterowana. Główną klasą aplikacji jest klasa MessageFactory, która jest klasą nadrzędną dla pozostałych. Dziedziczy ona metody z interfejsu ISendPackage, implementując jego metody w celu zapewnienia możliwości wysłania informacji do panelu użytkownika o każdym pakiecie sieciowym, który został odebrany. Odbiorem i wysyłaniem pakietów zajmuje się klasa RS232Wrapper, która jest odpowiedzialna za komunikację z portem szeregowym komputera. Zanim jednak jakikolwiek pakiet zostanie wysłany do węzłów sieci, musi on zostać w odpowiedni sposób zbudowany i sprawdzony. Zadanie to realizowane jest w klasie Package, w której zostały zaimplementowane metody budowy pakietów

TinyOS. <<Interface>> IMessage <Interface> IReciver <<Interface>> ISendPackage CommBase 4 GUI Reciver RS232Wrapper MessageFactor Surge Package MatlabWrapper Acceleration ackageBuilde MatlabEngine BaseMessage SimpleCmdMessage

zgodnych z specyfikacją systemu

Rys. 6. Diagram klas systemu Mote Viewer

Odbiorem pakietów przesyłanych przez węzły sieciowe zajmuje się klasa *Reciver*. Klasa ta ma za zadanie budowę pakietów z pojedynczych bajtów odczytanych z portu szeregowego. Na podstawie otrzymanych bajtów następuje rozpoznanie początku i końca pakietu. Jeżeli pakiet został pomyślnie rozpoznanych i zbudowany zostaje on przekazany do klasy *PackageBuilder*, gdzie gromadzone są wszystkie otrzymane pakiety.

Każdy program zaimplementowany w aplikacji jest również osobną klasą, dziedzicząca z interfejsu umożliwiając IMessage, sposób w ten wykorzystanie niezbędnych metody budowy komunikatów sterujących wezłami sieci. Rozwiązanie takie, w łatwy sposób pozwala na rozszerzanie aplikacji o nowe programy, dla których rozkazy sterujące mogą się różnić. Opisywany wcześniej program służący do równoczesnego pomiaru we wszystkich węzłach sieci został zaimplementowany w klasie Acceleration.

Po zakończonym pomiarze i akwizycji danych, wszystkie próbki pomiarowe z poszczególnych modułów są przechowywane, jak już wspomniano wcześniej, w klasie *PackageBuilder*. Użytkownik ma do dyspozycji panel, na którym może oglądnąć zarejestrowane sygnały, może je również wyeksportować do przestrzeni roboczej środowiska Matlab. Zadaniem tym zajmuje się klasa *MatlabWrapper*, która jest odpowiedzialna za nawiązanie sesji z środowiskiem Matlab oraz transfer danych.

# 2.3. Opis przykładowej sesji pomiarowej

Opis przykładowej sesji pomiarowej zostanie przedstawiony dla aplikacji *Acceleration*. Zadaniem aplikacji jest pomiar drgań mechanicznych równocześnie we wszystkich modułach, a po zakończonym pomiarze następuje akwizycja danych do stacji bazowej.

W przykładowej sesji pomiarowej brało udział sześć modułów podzielonych na dwie grupy. Jednej z grup nadano identyfikator o numerze 80 drugiej o numerze 81. Każdemu modułowi w danej grupie przydzielone zostały odpowiednio adresy 38, 39 oraz 40. Pomiar został przeprowadzony przy udziale wszystkich modułów należących do grupy 80 i następnie 81. W pierwszym kroku wykonano konfigurację sieci odpowiadającej podanemu powyżej opisowi elementów sieci. Do tego celu zastosowano obiekt z panelu użytkownika pokazany na rys. 7.

Budowa sieci następuje poprzez dodanie do drzewa odpowiedniej liczby grup, a następnie do każdej grupy - modułów do niej należących. Drugim krokiem było ustalenie czasu próbkowania oraz wymaganej liczby próbek, wybranie grupy, w której ma być przeprowadzony pomiar, a następnie przesłanie rozkazu startu pomiaru do modułów. Warunkiem jednoczesnego rozpoczęcia pomiaru we wszystkich modułach danej grupy jest zaadresowanie pakietu sieciowego adresem 65535.



Rys. 7. Panel konfiguracji sieci w aplikacji Mote Viewer

Wykonano pomiar kolejno w grupie numer 80 i w grupie 81. Po zakończonej sesji pomiarowej w dwóch grupach zrealizowano akwizycję danych pomiarowych do stacji bazowej.

Odczyt danych z modułów polega na zaznaczeniu odpowiedniego węzła z rys. 7, a następnie wysłaniu do rozkazu czytania danych. Pakiety są automatycznie zaadresowane wybranym numerem modułu pochodzącym z ustalonej konfiguracji. Dane z wszystkich modułów sieci zgromadzone w aplikacji, można wyeksportować do przestrzeni roboczej środowiska Matlab, gdzie zostaną poddane procesowi dalszej obróbki.

# 3. EKSPERYMENT POMIAROWY

# 3.1. Opis stanowiska

Do wervfikacji opisywanego systemu pomiarowego zastosowano stanowisko ze wzbudnikiem drgań. Do pomiaru referencyjnego zastosowano system pomiarowy SCADAS III firmy LMS. Wykonano pomiary z wymuszeniem 5Hz, 30Hz, 60Hz i 100Hz. Wybranie tak niskich częstotliwości podyktowane było przewidywanym zastosowaniem systemu do pomiarów drgań budowli. Częstotliwość próbkowania obu systemów referencyjnego i badanego wynosiła 200Hz. Do pomiaru przyspieszeń mierzonych przez moduły radiowe zastosowano zintegrowane czujniki

sieciowych

przyśpieszeń firmy Oceana Sensors [8]. Widok zamocowanych na wzbudniku czujników pomiarowych oraz czujników referencyjnych pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Czujniki pomiarowe oraz referencyjne zamocowane na wzbudniku

#### 3.2. Wyniki pomiarów

Eksperyment zrealizowano w kilku seriach pomiarowych. Dane pomiarowe zostały odczytane z modułów i umieszczone w przestrzeni Matlaba. Następnie wykonano skalowanie pomiarów i porównano wyniki z wynikami uzyskanymi za pomocą czujników referencyjnych.

Analizując wyniki w zakresie częstotliwości 5 Hz stwierdzono, że z uwagi na słabe parametry wzbudnika nie są one wystarczająco dokładne do uzyskania wiarygodnych porównań. Do dalszej analizy przyjęto zatem dane pomiarowe w zakresie 30Hz, 60Hz oraz 100 Hz. Przykładowy przebieg czasowy dla wymuszenia 30 Hz pokazano na rys. 9.



Rys. 9. Przebiegi czasowe dla wymuszenia 30Hz

Dla powyższego wymuszenia wykonano analizę FFT przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Analiza FFT dla wymuszenia 30 Hz

Analogiczne wyniki uzyskano dla kolejnych częstotliwości wymuszeń.

#### 3.3. Wnioski z przeprowadzonych pomiarów

Analizując otrzymane dane stwierdzono, że:

- 1. konieczne jest wprowadzenie mechanizmów potwierdzenia rozpoczęcia pomiaru przez moduły z uwagi na zdarzające się sytuacje braku odbioru sygnału startu pomiaru przez poszczególne moduły
- 2. brak jest mierzalnych przesunięć fazowych pomiędzy modułami w sieci w stosunku do czajników referencyjnych.

Wyniki pomiarów umożliwiają zastosowanie opisywanego systemu do pomiarów związanych z analizą modalną i diagnostyką po rozwiązaniu problemu zapewnienia potwierdzenia startu wszystkich modułów pomiarowych.

# 4. OPIS PROJEKTOWANEGO SYSTEMU POMIAROWEGO

#### 4.1. Opis przyjętego rozwiązania

Analiza wyników eksperymentu oraz inne praktyczne doświadczenia autorów pracy spowodowały rozpoczęcie prac nad własną bezprzewodowych konstrukcja modułów pomiarowych, w których czas pomiaru byłby synchronizowany przy Z wysoka precyzją zachowaniu komunikacji bezprzewodowej. Analizując szereg możliwości synchronizacji danych oraz biorąc pod uwagę potencjalne pole zastosowań czyli diagnostykę mostów, budowli, rozległych obiektów, założono, że sygnałem synchronizującym pomiar i jednocześnie kalibratorem zegarów modułów pomiarowych będzie sygnał PPS (Pulse Per Second) pochodzący z niskonapięciowego odbiornika GPS serii 16LVS firmy Garmin [9].

Sygnał PPS jest standardowo generowany przez większość odbiorników GPS. Dokładność tego impulsu znajduje się w granicach +/-1 µs, co jest wielkością wystarczającą przy założonych częstotliwościach próbkowania z zakresu 200-2000 Hz. Testy laboratoryjne potwierdziły dużą dokładność tego sygnału, maksymalne przesunięcie fazy pomiędzy dwoma odbiornikami GPS wynosiło 800 ns.

#### 4.2. Opis modułu pomiarowego

Schemat blokowy zaprojektowanego modułu pokazano na rysunku 11. Opracowany moduł składa się z modułu komunikacji bezprzewodowej w skład którego wchodzi mikroprocesor i moduł radiowy oraz modułu pomiarowego wyposażonego w: pamięć, 9 przetworników AC o rozdzielczości 16 bitów, układy filtrów anty-aliasingowych oraz obwody zasilania. Moduły wyposażone sa niskonapięciowe, wysokowydajne w mikrokontrolery firmy Atmel serii ATmega [10].



Ry. 11. Schemat blokowy opracowanego modułu pomiarowego z zewnętrzną synchronizacją modułów za pomocą sygnału PPS

W roku 2008 dostępny będzie europejski system nawigacji satelitarnej GALILEO, który dzięki dużej sile sygnału i nowoczesnej technologii umożliwi pozycjonowanie modułów pomiarowych z dokładnością poniżej 10 cm (przy lokalnej korekcji sygnału) [11]. Zintegrowanie funkcji synchronizacji czasowej z dokładnym pomiarem położenia umożliwi bezproblemową instalację oraz konfigurację systemów pomiarowych oraz innych urządzeń wymagających dokładnej synchronizacji czasowej.

# 5. WNIOSKI

Nowoczesne technologie transmisji sygnału oraz tanie i dostępne komponenty elektroniczne pozwalają na budowę inteligentnych modułów pomiarowych. Zastosowanie technologii satelitarnych pozwoli na proste i dokładne rozmieszczenie czujników pomiarowych na dużych obiektach.

Osiągnięto główne założenia systemu polegające na pełnej synchronizacji pomiaru oraz modułowej budowie. Zaproponowane nowe rozwiązanie umożliwi podniesienie niezawodności i dokładności pomiarów rozległych obiektów technicznych. Opisany w artykule bezprzewodowy system pomiarowy może zostać z powodzeniem zastosowany w realizacji pomiarów dla celów analizy modalnej.

Dalszy rozwój prac nad opisanym systemem skierowany zostanie na jego aplikacją do diagnostyki strukturalnej. Zastosowanie diagnostyki podniesienie strukturalnej umożliwia bezpieczeństwa użytkowania obiektów oraz zapewnia zmniejszenie bieżacych kosztów zastępując terminarz remontów - analiza aktualnego stanu obiektu.

Prace finansowane są z tematu badawczego numer T1825130728.

# LITERATURA

- Ivan Stojmenowić at all, "Handbook of Sensor Networks", Willey-Interscience, New Jersey, 2005.
- [2] K. F. Kiefer, E. Krug, G., Ajupova, P. L. Walter, Wireless sensors Applied to Modal Analysis, XXI IMAC Proc., 2003, pp. 253-258.
- [3] Texas Instruments Norway, www.chipcon.com/files/CC1000\_Data\_Sheet\_2\_ 3.pdf, 2006.
- [4] MicroStrain Inc., www.microstrain.com/agilelink.aspx, 2005.
- [5] Crossbow Technolog Inc., www.xbow.com/Products/Product\_pdf\_files/Wir eless\_pdf/MICA2\_Datasheet.pdf, 2004.
- [6] TinyOS, www.tinyos.net/scoop/.
- [7]Wrycza S., Marcinkowski B., Wyrzykowski K., Język UML 2.0 w modelowaniu systemów informatycznych, Wydawnictwo Helion, 2006.
- [8] Oceana Sensor, www.oceanasensor.com/Products/PB3AXN.pdf.
   [9] Commin laterational lateration.
- [9] Garmin International Inc., www.garmin.com/manuals/GPS16HVS\_Technic alSpecifications.pdf.
- [10] Atmel Inc.,
  - www.atmel.com/dyn/resources/prod\_documents/ doc2467.pdf.
- [11] Komisja Europejska,

europa.eu.int/comm/dgs/energy\_transport/galileo.





dr inż. Tomasz BOJKO jest adiunktem w Katedrze Robotyki i Mechatroniki AGH w Krakowie. Jego zainteresowania dotyczą mechatroniki, robotyki i automatyki. Jest autorem prac dotyczących robotyki, układów napędowych robotów, szybkiego prototypowania układów sterowaukładów MEMS oraz nia, rozwiązań komunikacji bezprzewodowej

mgr inż. Grzegorz CHMAJ jest doktorantem Katedrze W Robotykii i Mechatroniki, AGH w Krakowie. Jego zainteresowania dotyczą mechatroniki, akwizycji sygnałów pomiarowych oraz zastosowań systemów informatycznych w dziedzinie pomiarów i mechatroniki. Jest autorem prac dotyczących systemów informatycznych stosowanych zagadnieniach W akwizycji sygnałów pomiarowych.

# ALGORYTM MINIMALIZACJI SYGNATUR USZKODZEŃ

Dariusz CHALECKI

Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Instytut Automatyki i Robotyki, 02-525 Warszawa, ul. św. Andrzeja Boboli 8

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono metodę minimalizacji sygnatur uszkodzeń jako jedno z rozwiązań problemów związanych z dużą liczbą sygnałów pomiarowych, wykorzystywanych testów i potencjalnych uszkodzeń w złożonych instalacjach technologicznych. Jego opracowanie ma na celu skrócenie czasu lokalizacji uszkodzeń w takich instalacjach. W referacie opisano różnicę pomiędzy pełnymi sygnaturami uszkodzeń a sygnaturami zredukowanymi oraz przedstawiono poszczególne kroki realizacji algorytmu, na podstawie którego można uzyskać sygnatury zredukowane.

Słowa kluczowe: diagnostyka, uszkodzenie, lokalizacja uszkodzeń, sygnatura uszkodzenia.

#### THE ALGORITHM OF FAULT SIGNATURES MINIMIZATION

#### Summary

The paper presents a method of minimization of fault signatures as a solution of a problem concerning large number of measuring signals and potential faults in compound technological systems. The aim of elaboration of the algorithm is to shorten the time of fault isolation in such systems. The paper describes the difference between full and reduced fault signatures as well as presents individual steps of realization of the algorithm enabling to obtain the reduced signatures.

Keywords: diagnostic testing, fault isolation, fault signature, fault.

#### 1. WPROWADZENIE

Procesy technologiczne w nowoczesnych obiektach przemysłowych wymagają stałej kontroli. Złożoność tych obiektów wymusza stosowanie coraz bardziej wydajnych systemów diagnostycznych z uwagi na bardzo dużą liczbę sygnałów pomiarowych wykorzystywanych w algorytmach detekcji uszkodzeń (testach), a także dużą liczbę testów. Taka liczba sygnałów pomiarowych i testów jest jednak przyczyną problemów, które wiążą się z potrzebnymi nakładami obliczeniowymi i czasem przetwarzania informacji. Liczba potencjalnych uszkodzeń w dużych instalacjach przemysłowych jest ogromna, przez co ich lokalizacja może okazać się czasochłonna.

Istnieje kilka praktycznych rozwiązań tego problemu, jak na przykład dynamiczna dekompozycja obiektu czy diagnozowanie zdecentralizowane [3]. Inną metodą, proponowaną w tym artykule, jest minimalizacja sygnatur uszkodzeń obiektów.

Lokalizacja uszkodzeń odbywa się na podstawie oceny poprawności przebiegu procesu, którą uzyskujemy w oparciu o znajomość relacji pomiędzy sygnałami diagnostycznymi *s*, będącymi wyjściami algorytmów detekcyjnych (testów), a uszkodzeniami *f*. Można ją przedstawić za pomocą zależności:

$$r: F \times S \to \Phi(V_s) \tag{1}$$

(gdzie  $V_s$  jest zbiorem wartości wszystkich sygnałów diagnostycznych), co oznacza przyporządkowanie każdej parze uszkodzenie–sygnał diagnostyczny (f, s) pewnych wartości sygnałów diagnostycznych odpowiadających danemu uszkodzeniu.

Postać ogólna relacji (1) może być przedstawiona za pomocą tabeli (macierzy) odwzorowującej zależności uszkodzenia – sygnały diagnostyczne, która zawiera wartości sygnałów odpowiadające poszczególnym uszkodzeniom (rys. 1).

S/F	$f_1$	$f_2$	 $\mathbf{f}_{i}$	 $f_{I}$
s <sub>1</sub>			v <sub>i1</sub>	
s <sub>2</sub>			v <sub>i2</sub>	
s <sub>i</sub>			V <sub>ij</sub>	
$S_{J}$			V <sub>i</sub> J	

Rys. 1. Zapis relacji uszkodzenia - symptomy

Kolumny tabeli, które można zapisać w postaci wektorowej (2), określają sygnatury poszczególnych uszkodzeń. Sygnaturą uszkodzenia jest zbiór wartości sygnałów diagnostycznych, które powstają podczas wystąpienia tego uszkodzenia.

$$V(f_{i}) = \begin{bmatrix} v_{1}(f_{i}) \\ v_{2}(f_{i}) \\ \dots \\ v_{J}(f_{i}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{i1} \\ v_{i2} \\ \dots \\ v_{iJ} \end{bmatrix}$$
(2)

Podczas lokalizacji uszkodzeń bieżące wartości sygnałów diagnostycznych z przebiegu procesu porównywane są z wartościami sygnatur uszkodzeń i po wystąpienia wszystkich symptomów i-tego uszkodzenia system wnioskuje o pojawieniu się tego uszkodzenia [1]. Uszkodzenia są nierozróżnialne, jeśli ich sygnatury są jednakowe.

Zdefiniowane powyżej sygnatury sa sygnaturami pełnymi, czyli takimi, do których budowy wykorzystuje się wartości wszystkich sygnałów diagnostycznych. Okazuje się jednak, że do lokalizacji uszkodzeń można wykorzystać sygnatury zredukowane, oparte tylko na podzbiorach tych sygnałów, bez utraty rozróżnialności uszkodzeń.

## 2. KONCEPCJA ALGORYTMU

Algorytm minimalizacji sygnatur uszkodzeń opracowano dla dwustanowych sygnałów diagnostycznych ( $v_{ii} \in \{0, 1\}$ ), a jego realizację pokazano na przykładzie binarnej macierzy diagnostycznej. Zostanie pokazane, jak za pomocą algorytmu zminimalizować sygnatury uszkodzeń tak, aby były one równorzędne sygnaturom pełnym.

Przykładowe binarne macierze diagnostyczne przedstawiono na rys. 2.

	S/F	$f_1$	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>4</sub>	f <sub>5</sub>	f <sub>6</sub>	f <sub>7</sub>	f <sub>8</sub>
<i>a)</i>	s <sub>1</sub>	1	1						1
	s <sub>2</sub>	1	1		1		1	1	1
	<b>S</b> <sub>3</sub>		1	1	1	1	1		1
	S <sub>4</sub>			1			1	1	1
	<b>S</b> 5				1	1		1	
	S/F	$f_1$	$f_2$	f3	$f_4$	f <sub>5</sub>	f <sub>6</sub>	f <sub>7</sub>	f <sub>8</sub>
<i>b)</i>	s <sub>1</sub>	1	1	0			0		1
	s <sub>2</sub>	1	1	0	1	0	1	1	1
	S3	0	1	1	1	1	1		1

S5 Rys. 2. Przykład binarnej macierzy diagnostycznej: a) z pełnymi sygnaturami uszkodzeń, b) z sygnaturami zredukowanymi

1 1

0 0 1

Wartość sygnału 1 oznacza negatywny wynik testu diagnostycznego, czyli wystąpienie symptomu; w dalszej części pracy będzie krótko nazywana "jedynką". Wartości 0 będą nazywane "zerami". Na rys. 2a) - dla uproszczenia - "zera" w macierzy binarnej zastąpiono pustymi komórkami. Rysunek ten odpowiada sytuacji, gdy podczas wnioskowania o uszkodzeniach brane są pod uwagę wszystkie sygnały diagnostyczne dla wszystkich uszkodzeń. Posłużono się tu pełnymi sygnaturami uszkodzeń.

Rys. 2b) przedstawia przypadek, gdy posłużono się sygnaturami zredukowanymi. Pominięto tu te "zera", które nie mają wpływu na rozróżnialność uszkodzeń; pod uwagę wzięto zatem te, których zastąpienie "jedynkami" spowodowałoby, że dwie lub więcej sygnatur przybrałoby jednakową postać.

Metoda wydaje się bardzo prosta w odniesieniu macierzy diagnostycznych o rozmiarach do podobnych do tej na rys. 2. Jednak kiedy ma się do czynienia z macierzami dotyczącymi rzeczywistych obiektów przemysłowych, w których występują tysiace sygnałów diagnostycznych i tyle samo możliwych uszkodzeń, "ręczne" analizowanie takich macierzy jest niewykonalne. W takich wypadkach zastosowanie może znaleźć algorytm minimalizacji sygnatur uszkodzeń.

#### 3. KONSTRUKCJA ALGORYTMU

#### 3a. Krok pierwszy

Wyjściowa tabelę, taką jak na rys. 2a), ale dla przypadku ogólnego, przedstawić można w postaci macierzy M:

$$M = \begin{bmatrix} v_{11} & \cdots & v_{i1} & \cdots & v_{I1} \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ v_{1j} & v_{ij} & v_{Ij} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ v_{1J} & \cdots & v_{iJ} & \cdots & v_{IJ} \end{bmatrix}.$$
 (3)

Pierwszym krokiem w realizacji algorytmu minimalizacji sygnatur jest utworzenie dla każdego uszkodzeń  $f_i$  pomocniczych macierzy Z  $N_i$  o wymiarach I×J i postaci takiej jak przedstawia zależność (4). Zostaną do nich przepisane te "jedynki" z sygnatur innych uszkodzeń, których pozycje pokrywają się z pozycjami "jedynek" sygnatury uszkodzenia  $f_i$ . Kolumna *i*-ta zostanie z macierzy M przepisana. Pozostałe komórki mogą zostać wypełnione na przykład zerami.

$$N_{i} = \begin{bmatrix} n_{11} & \cdots & n_{i1} & \cdots & n_{I1} \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ n_{1j} & & n_{ij} & & n_{Ij} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ n_{1J} & \cdots & n_{iJ} & \cdots & n_{IJ} \end{bmatrix}$$
(4)

Dla *i*-tego uszkodzenia zachodzą wówczas zależności:

dla kolumny *i*-tej:

$$n_{ii} = v_{ii} \tag{3a}$$

dla pozostałych kolumn:

$$n_{kj} = 1, \text{ gdy } v_{ij} = v_{kj} = 1$$
 (5b)

$$n_{kj} = 0$$
, gdy  $v_{ij} = 0 \lor v_{kj} = 0$  (5c)

#### 3b. Krok dugi

Pozycje "jedynek" macierzach  $N_i$  należy zapamiętać, by na ich podstawie w dalszych krokach algorytmu odszukać w sygnaturach "zera", których nie można pominąć. Rolę "pamięci" spełniać będą wektory  $W_i$ , których elementami będą kombinacje pozycji, na jakich znajdują się "jedynki" w poszczególnych kolumnach. Najprostszym sposobem na zapamiętanie tych pozycji jest np. potraktowanie ich jako cyfr pewnych liczb, choć mogą to być dowolnie utworzone wyrazy, które będą jednoznacznymi identyfikatorami każdej z sygnatur. Wyrazy  $w_{ii}$  wektorów

$$W_i = \begin{bmatrix} w_{1i} & \cdots & w_{ii} & \cdots & w_{Ii} \end{bmatrix}$$
(6)

można w tym wypadku przedstawić w następujący sposób:

$$w_{ii} = \sum_{k} j \cdot 10^{k}, j : n_{ij} = 1$$
 (7)

gdzie indeks *k* zmienia się od 1 do wartości określającej liczbę "jedynek" w kolumnie.

Bardziej czytelne jest przedstawienie tych wektorów w postaci macierzy kwadratowej  $\Omega$ , w której *i*-ty wiersz odpowiada wektorowi  $W_i$ .

$$\Omega = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{i1} & \cdots & w_{I1} \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ w_{1i} & w_{ii} & w_{Ii} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ w_{1I} & \cdots & w_{iI} & \cdots & w_{II} \end{bmatrix}$$
(8)

Oba indeksy wyrazów macierzy  $\Omega$  oznaczono jako *i*, ponieważ jest ona kwadratowa, a także symetryczna. Zarówno jej rzędy, jak i kolumny odnoszą się do kolejnych uszkodzeń  $f_i$ , a na jej głównej przekątnej znajdują się wyrazy wskazujące, na których pozycjach *i*-tego uszkodzenia znajdują się "jedynki".

#### 3c. Krok trzeci

Ostatnim krokiem realizacji algorytmu jest stworzenie nowych sygnatur uszkodzeń, a ściślej mówiąc – stworzenie wektorów, których wyrazy będą wskazywać, jakie elementy starych sygnatur należy brać pod uwagę podczas lokalizacji uszkodzeń. W tym celu trzeba porównać wartości elementów wektorów  $W_i$  (czyli poszczególnych rzędów macierzy  $\Omega$ ). Utworzone na tej podstawie wektory wskaźników do nowych sygnatur nazwano  $\Theta_i$ . Wygodnie jest się nimi posługiwać jako wektorami kolumnowymi (9) z uwagi na to, że wektory sygnatur  $V_i$  są również wektorami kolumnowymi. Wyrazy wektorów  $\Theta_i$  obliczane są wg następującego rozumowania:

Jeżeli k-ty element *i*-tego rzędu ( $w_{ki}$ ) macierzy  $Q^{1}$  jest taki sam jak element *i*-ty ( $w_{ii}$ ), dla którego

przeprowadzamy porównanie (czyli dla elementu z głównej przekątnej macierzy  $\Omega$ ), to oznacza to, że należy prześledzić sygnaturę *k*-tego uszkodzenia ( $V_k$ ) i uznać za istotne te "zera" sygnatury uszkodzenia *i*-tego ( $v_{ij} = 0$ ), których pozycja pokrywa się z pozycjami "jedynek" sygnatury uszkodzenia *k*-tego ( $v_{ki} = 1$ ).

Przekładając te czynności na trzeci krok algorytmu, można napisać, że jeśli

$$\Theta_{i} = \begin{bmatrix} \theta_{i1} \\ \vdots \\ \theta_{il} \\ \vdots \\ \theta_{iL} \end{bmatrix}, \qquad (9)$$

to wartości wskaźników  $\theta_{il}$  oblicza się dla "jedynek" z zależności:

$$\theta_{il} = j$$
, gdzie  $j: v_{ii} = 1$  (10a)

oraz dla "zer":

$$\theta_{il} = j$$
, gdzie  $j: v_{kj} = 1$  przy  $k: w_{ki} = w_{ii}$  (10b)

 $(V_i$  to bieżąca sygnatura, z którą porównywane są sygnatury  $V_k$ ; indeks l zmienia się od 1 do liczby elementów wektora  $\Theta_i$ ).

#### 4. PRZYKŁAD

W celu lepszego zobrazowania działania algorytmu zastosowano go do zminimalizowania sygnatur uszkodzeń dla obiektu, dla którego zależność między uszkodzeniami i symptomami przedstawia tabela z rysu. 2a). Zostanie dowiedzione, że z pomocą tego algorytmu możliwe jest uzyskanie takich sygnatur uszkodzeń jak w tabeli na rys. 2b).

Tabelę z rys. 2a), przedstawić można jako macierz ${\cal M}$ 

	1	1	0	0	0	0	0	1	
	1	1	0	1	0	1	1	1	
<i>M</i> =	0	1	1	1	1	1	0	1	,
	0	0	1	0	0	1	1	1	
	0	0	0	1	1	0	1	0	

która odpowiada ogólnej postaci (3).

Krok pierwszy: utworzenie na podstawie tego, co napisano w rozdziale 3a., macierzy  $N_i$  tak jak poniżej (aby zaoszczędzić miejsce, wybrano dwie przykładowe macierze).

Ze względu na symetrię macierzy Ω operacje przeprowadzane na rzędach (kolumnach) można zastąpić operacjami na kolumnach (rzędach).

Krok drugi: spisując kombinacje pozycji "jedynek" z macierzy  $N_i$ , otrzymujemy wektory  $W_i$  w postaci

$W_1 =$	21	21	0	2	0	2	2	21]	
$W_4 =$	2	32	3	532	53	3	32	52	32]

po czym budujemy z nich macierz  $\Omega$  (poniżej pokazano całą macierz, zbudowaną na podstawie macierzy  $N_1 - N_8$ ):

Ω=	21	21	0	2	0	2	2	21
	21	321	3	32	3	32	2	321
	0	3	43	3	3	43	4	43
	2	32	3	532	53	32	52	32
	0	3	3	53	53	3	5	3
	2	32	43	32	3	432	42	432
	2	2	4	52	5	42	542	42
	21	321	43	32	3	432	42	4321

Krok trzeci: przez porównanie elementów w wierszach macierzy  $\Omega$  wypełniamy wektory  $\Theta_i$  wskaźnikami do "zer", których nie można pominąć, oraz do "jedynek":

$$\Theta_{1} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{bmatrix}^{T}$$
  

$$\Theta_{2} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{bmatrix}^{T}$$
  

$$\Theta_{3} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{bmatrix}^{T}$$
  

$$\Theta_{4} = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 5 \end{bmatrix}^{T}$$
  

$$\Theta_{5} = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 5 \end{bmatrix}^{T}$$
  

$$\Theta_{6} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{bmatrix}^{T}$$
  

$$\Theta_{7} = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 \end{bmatrix}^{T}$$
  

$$\Theta_{8} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{bmatrix}^{T}$$

Przykładowo, dla uszkodzenia  $f_1$  wektor  $\Theta_1$  utworzono następująco: elementy na pozycji pierwszej i drugiej są oczywiste, ponieważ wskazują na "jedynki" sygnatury  $V_1$ . Na podstawie rozdziału 3c. dopisano wskaźniki do odpowiednich "zer". Jak widać w macierzy  $\Omega$ , w pierwszym rzędzie (czyli tym, który odpowiada uszkodzeniu  $f_1$ ) element drugi (odpowiadający  $f_2$ ) i ósmy ( $f_8$ ) mają taką samą postać jak element pierwszy ( $f_1$ ), dla którego przeprowadzamy porównanie. Dlatego należy prześledzić sygnatury  $V_2$  i  $V_8$ . Widać, że oprócz pozycji pierwszej i drugiej sygnatura uszkodzenia  $f_2$  zawiera "jedynki" również na pozycji trzeciej, a uszkodzenia  $f_8$  – na pozycji trzeciej i czwartej. Stąd wynika, że trzeba uzupełnić wektor  $\Theta_1$  właśnie o elementy wskazujące na pozycję trzecią i czwartą.

# 5. PODSUMOWANIE

Algorytm minimalizacji sygnatur, obok innych rozwiązań problemu przetwarzania dużej liczby sygnałów diagnostycznych, może stać się bardzo pomocnym narzedziem przyspieszajacym diagnozowanie systemów przemysłowych. Przytoczony przykład pokazuje, że użycie skonstruowanych na podstawie algorytmu nowych, zminimalizowanych sygnatur uszkodzeń nie prowadzi do utraty rozróżnialności uszkodzeń obiektu, a znacząco redukuje nakłady obliczeniowe przy diagnozowaniu prowadzonym w czasie rzeczywistym. Powyższy algorytm został zaimplementowany i przetestowany.

# LITERATURA

- KOŚCIELNY J. M.: Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych

   Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
- [2] KORBICZ J.: *Diagnostyka procesów* WNT, Warszawa 2002.
- [3] KOŚCIELNY J. M., SYFERT M.: Wybrane problemy diagnostyki procesów przemysłowych, V Krajowa Konferencja "Diag 2003" – Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, str. 65 – 79.

# ZASTOSOWANIE PROSTYCH MODELI DYNAMICZNYCH W DIAGNOSTYCE WIBROAKUSTYCZNEJ MASZYN

Zbigniew DĄBROWSKI

Instytut Podstaw Budowy Maszyn, Politechnika Warszawska 02-524 Warszawa, ul. Narbutta 84, tel. +48 22 234 82 76 e-mail: <u>zdabrow@simr.pw.edu.pl</u>

## Streszczenie

W pracy Autor dyskutuje tezę, że prosty model dynamiczny może być użyteczny w diagnostyce wibroakustycznej maszyn, jeżeli jest dobrze zdefiniowany, nieliniowy i dobrze zidentyfikowany.

Słowa kluczowe: dynamika maszyn, identyfikacja modelu, błędy współosiowości.

#### THE USE OF UNCOMPLICATED DYNAMICAL MODEL IN THE TASK OF VIBROACOUSTICAL DIAGNOSTICS

#### Summary

The main thesis of this paper is that simple dynamic model could be useful in vibroacoustic diagnostics only if is properly defined, nonlinear and correctly identified.

Keywords: machine dynamics, model identification, coaxiality errors.

#### **1. WPROWADZENIE**

W chwili obecnej trudno powiedzieć, jaka metoda, czy nawet szerzej, jaka metodyka postawienia diagnozy o maksymalnym współczynniku pewności postawienia diagnozy powinna być zastosowana w rozwiązaniu konkretnego zadania technicznego. Gwałtowny rozwój technik cyfrowych z jednej strony i metod analizy sygnałów z drugiej stwarza możliwości wyboru ogromnej liczby narzędzi do pozyskiwania i przetworzenia informacji, a tym samym układania procedur diagnostycznych.

Czy zatem w zaistniałej sytuacji jest w ogóle celowe posługiwanie się modelami diagnostycznymi? Czy W sytuacji, gdy wygenerowanie modelu MES o kilku tysiacach stopni swobody nie nastręcza względnych trudności celowe jest posługiwanie sie modelem zapisanym kilkoma równaniami różniczkowymi? Czv dysponuiac metodami analizy sygnałów pozwalajacymi na nadzwyczajna dokładność analizy drgań i emitowanego dźwięku maszyny w ogóle warto konstruować modele strukturalne? Czy nie jest lepszy model typu "czarna skrzynka" zidentyfikowany wirtualnie dzięki znakomitym metodom przetwarzania informacji uzyskanej z eksperymentu? Jednoznacznie odpowiedzieć na te pytania jest nadzwyczaj trudno.

W diagnostyce technicznej, jak wiadomo, nie zależy nam na mniej lub bardziej dokładnym opisie dynamiki maszyny lecz na znalezieniu relacji stan↔symptom, w którym zmiennymi stanu mogą być parametry geometryczne mniejsze niż tolerancje wykonania części maszyny, lokalne zmiany cech materiałowych nie powodujące zmiany parametrów wytrzymałościowych konstrukcji itp. zmienne, a symptomami bywają zmiany obserwowanego sygnału na tyle małe, że nie daje się ich zaobserwować analizujac energię procesu. W dodatku pomiar jest na ogół pośredni, a zakłócenia losowe bywają większe niż efekt, który chcemy zaobserwować.

Jasnym jest zatem, że model dynamiczny maszyny, którym posługuje się konstruktor np. w procesie optymalizacji w żaden sposób nie może sprostać problemom diagnostycznym. Trudno by był on wrażliwy na zmiany o rząd czy kilka rzędów wielkości mniejsze niż jego dokładność uznana skądinąd za dobrą.

Dysponowanie jednakże modelem analitycznym ma ogromne zalety. Model taki, o ile został poprawnie zbudowany i zidentyfikowany, ma rangę pewnej teorii naukowej. Po wstawieniu odpowiednich wartości liczbowych może być użyty do rozwiązania konkretnego zadania danej klasy, pozwala badać problem a priori i a posteriori, czyli umożliwia genezę oraz prognozę i w tym zakresie może być nad wyraz cennym narzędziem pracy diagnosty.

By to jednak było możliwe model musi być stosunkowo prosty i umożliwiać dyskusję jakościową i ilościową. W obecnej chwili nie ma żadnego uzasadnienia dla wyprowadzenia w sposób analityczny "kilometrowych" układów równań. Od tego są systemy cyfrowe. Wymienione jednak zalety ogólności powodują, że modele analityczne są w diagnostyce stosowane, doskonalone i w dalszym ciągu... jest ich zbyt wiele!

Sądzę, że możliwe jest by typowe części i zespoły maszynowe (sprzęgła, łożyska, przekładnie, niektóre rodzaje połączeń) doczekały się wreszcie modeli uznanych za środowisko za ostateczne (optymalne) co stworzyłoby solidną podstawe do dobrego diagnozowania bardziej złożonych systemów. Na razie jednak do takiej zgodności daleko. Dlatego też pragne dołożyć głos do dvskusji na ten temat i sformułować warunki by model "dynamiczny" był diagnostycznie użyteczny i przekonać Czytelnika do słuszności tych warunków prezentując ciag przykładów aplikacyjnych.

# 2. PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA

Z licznych prac prowadzonych przez Autora i kierowany przez niego zespół wynika, że wymienione dalej warunki pozwalają uzyskać stosunkowo prosty model analityczny, wrażliwy na zmiany parametrów stanu i pozwalający na określenie oczekiwanego symptomu.

1° Model powinien być odseparowany, to znaczy powinien dokładnie opisywać jedynie diagnozowany element (zespół), a pozostałe części maszyny winny być opisane możliwie najdokładniej określonymi charakterystykami dynamicznymi uzyskanymi z obserwacji (pomiarów). To założenie wydaje się oczywiste gdy zdamy sobie sprawę, że na ogół całościowy model dynamiczny nawet "najbardziej" szczegółowy i doskonale zidentyfikowany jest wielokrotnie mniej dokładny niż zakres zmian zmiennych stanu. Jeżeli maszynę potraktujemy jako szeregowe lub szeregowo-równoległe połączenie elementami przeniesienia napędu silnika i części roboczej (odbiornika mocy) to warunek ten można pogladowo przedstawić tak jak na rys. 1 [2]. Uzasadnienie słuszności takiego założenia jest proste.



Rys. 1. Schemat układu przeniesienia mocy

Efekty dynamiczne zmian zmiennych stanu są na tyle słabe, że nie powodują sprzężeń zwrotnych rzutujących na pracę urządzenia jako całości (oczywiście do chwili awarii), a tym samym nie mają wpływu na wejście i wyjście diagnozowanego elementu.

2° Model może być ograniczony nawet do dwóch równań różniczkowych zwyczajnych, lecz musza być to równania nieliniowe. To założenie nie jest już tak oczywiste. W wielu pracach Autor [m.in. 3, 4, 5] wskazvwał na "wszechobecność" efektów nieliniowych w zadaniach diagnostycznych, podsumowując te rozwiązania w monografii [1]. Tymczasem podstawowe techniki analizy sygnałów poczynając od transformaty Fouriera opracowano dla układów liniowych (lub zlinearyzowanych). Istnieje tu cały szereg pewnych trudności teoretycznych będących obiektem licznych publikacji Autora, których rozwiązanie sprowadza się do metod i technik odseparowania nieliniowego zaburzenia.

problem Jeżeli identyfikacji modelu sprowadzimy do badania relacji wybrana miara sygnału↔rozwiązanie modelu to po stronie modelowej winno się znać co najmniej postać rozwiazania by możliwe było stosowanie jednowymiarowych transformat całkowych [1]. "modelu" Po stronie musimv dvsponować technikami separacji składowych nieliniowych [5].

Nie sposób oczywiście w jednym artykule przytoczyć wszystkich stosowanych technik, nie mniej spróbujmy krótko przedstawić następującą propozycję.

Wiemy, że funkcja koherencji zwyczajnej:

$$\gamma_{AB}^{2}(f) = \frac{H_{1}(f)}{H_{2}(f)}$$
(1)

jest mniejsza od jedności w przypadku zakłóceń wejścia, zakłóceń wyjścia i układu nieliniowego. Załóżmy, że układ nieliniowy zachowuje się tak jak układ pracujący z jednoczesnym zakłóceniem wyjścia i wejścia, przy czym nie znane są relacje między tymi zakłóceniami, co poglądowo przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Przykładowy model układu

Przyjęto następujące oznaczenia:

$$H_1(f) = \frac{G_{AB}(f)}{G_{AA}(f)}$$
$$H_2(f) = \frac{G_{BB}(f)}{G_{BA}(f)}$$

- $G_{AA}(f) = (G_{AA \text{ RMS}}(f))^2 \text{uśrednione widmo}$ mocy sygnału wejściowego,
- $G_{BB}(f) = (G_{BB RMS}(f))^2 -$  uśrednione widmo mocy sygnału wyjściowego,
- $G_{AB}(f)$  uśrednione widmo wzajemne mocy sygnałów na wejściu i wyjściu układu (widmo sprzężone z widmem  $G_{BA}(f)$ ),

- $G_{BA}(f)$  uśrednione widmo wzajemne mocy sygnałów na wejściu i wyjściu układu widmo sprzężone z widmem  $G_{AB}(f)$ ),
- $G_{UU}(f)$  uśrednione widmo mocy sygnału zakłóceń na wejściu układu,
- $G_{VV}(f)$  uśrednione widmo mocy sygnału zakłóceń na wyjściu układu,
- $G_{XX}(f)$  uśrednione widmo mocy sygnału zakłóconego na wejściu układu,
- $G_{YY}(f)$  uśrednione widmo mocy sygnału zakłóconego na wyjściu układu.

Dla liniowego układu niezakłóconego spełnione są warunki:

$$H_1(f) = H_2(f)$$
 i  $\gamma_{AB}^2(f) = \frac{H_1(f)}{H_2(f)} = 1$ .

Dla proponowanego modelu układu nieliniowego:

$$\gamma_{AB}^{2}(f) = \frac{\gamma_{XY}^{2}(f)}{1 + G_{UU}(f) / G_{AA}(f) + G_{VV}(f) / G_{BB}(f) + G_{UU}(f) / G_{AA} \cdot G_{VV}(f) / (f) G_{BB}(f)}$$
(2)

który to wzór daje się sprowadzić do postaci:

$$\gamma_{AB}^{2}(f) = \frac{\gamma_{XY}^{2}(f)}{1 + \Delta(f)} = \frac{H_{1}(f)}{H_{2}(f)} \cdot \frac{1}{1 + \Delta(f)}$$
(3)

Przy takim potraktowaniu zagadnienia mnożnik  $\frac{1}{1+\Delta(f)}$  pozwala przeliczyć obserwowaną funkcję

koherencji na funkcję koherencji układu zlinearyzowanego (niezaburzonego), a współczynnik  $\Delta(f)$  pełni rolę miary nieliniowego zaburzenia.

W końcowym efekcie postępowanie takie pozwala na stosowanie znanych technik przetwarzania sygnałów. Nie zanudzając Czytelnika długimi wywodami, które można znaleźć w cytowanej literaturze, możliwe jest porównywanie rezultatów modelu nieliniowego z wynikami obserwacji w dziedzinie czasu i częstotliwości oraz stosowanie jako kryteriów porównawczych odpowiednich charakterystyk.

Model nieliniowy za to w stosunku do liniowego może być nieporównywalnie bardziej wrażliwy na małe zmiany parametrów (gdy dotyczą one części nieliniowej) niż prosty model liniowy, a tym samym użyteczny diagnostycznie.

3° Model powinien być dobrze zidentyfikowany i zweryfikowany dla innych wartości  $\Theta$  (czasu życia) niż wartości przyjęte w procesie identyfikacji, przy czym zmiennymi decyzyjnymi w procedurze identyfikacji parametrycznej (dostrojenia modelu) winny być inne zmienne niż późniejsze zmienne stanu. Ten warunek wydaje się być oczywisty.

# 3. PRZYKŁADY KOLEJNYCH UPROSZCZEŃ MODELI DOTYCZĄCYCH DIAGNOZOWANIA NIERÓWNOLEGŁOŚCI OSI UKŁADÓW NAPĘDOWYCH

Jako ilustrację postawionej na początku tezy rozpatrzmy obecnie trzy różne modele dynamiczne dotyczące tej samej grupy zagadnień, jakim jest diagnozowanie błędów wykonania i montażu układów wirujących przeniesienia mocy, które powstały w ramach wieloletnich badań prowadzonych w Pracowni Wibroakustyki IPBM PW przez kierowany przez Autora zespół.

**Model I** przedstawiony na rys. 4 powstał na potrzeby diagnostyki przekoszenia i przesunięcia wałów połaczonych sprzęgłem w młynach cementowych [2, 7]. Rys. 3 pokazuje przykład identyfikacji tego modelu dla stanu początkowego (tzn. dla minimalnych odchyłek położenia).



Rys. 3. Przykład wyniku identyfikacji modelu dla stanu "0" tzn. dla minimalnych odchyłek położenia: a) widmo uzyskane z pomiaru, b) widmo uzyskane drogą analityczną dla przesunięć:  $\alpha_1 \le 0.5$ mm,  $\alpha_2 \le 0.5$  mm i przekoszeń:  $\beta_1 \le 0.25^\circ$   $\beta_2 \le 0.25^\circ$ oraz mimośrodu niewyrównoważenia









**Model II** dotyczący podobnego zagadnienia, lecz opisuje sprzęgła wieloelementowe zamocowane na stanowisku badawczym Pracowni Wibroakustyki [8]. W odróżnieniu od poprzedniego model dopuszcza zmianę przesunięcia osi w czasie (przy założeniu wolnozmienności pracy) i opisany jest układem równań, który jest na tyle krótki, że daje się zacytować w artykule:

$$\begin{split} m_{yp}\ddot{h} + (c_{wg} + c_{syg})\dot{h} + (k_{wg} + k_{syg})h &= (k_{wg} + k_{syg})e\cos\varphi_{yp} - k_{wg}u_{w}(t) - k_{syg}u_{sp}(t) \\ m_{yp}\ddot{v} + (c_{wg} + c_{syg})\dot{v} + (k_{wg} + k_{syg})v &= (k_{wg} + k_{syg})e\sin\varphi_{sp} \\ I_{N}\ddot{\phi}_{N} + c_{syg}(\dot{\phi}_{N} - \dot{\phi}_{sp}) + k_{NS}\phi_{N} + k_{syn}(\phi_{N} - \phi_{sp}) + k_{syp}\sigma_{sw}^{2}(\phi_{N} - \phi_{sp}) &= M_{N} \\ I_{Z_{0}}\ddot{\phi}_{D} - c_{ws}(\dot{\phi}_{D} - \dot{\phi}_{sp}) + k_{ws}(\phi_{O} - \phi_{sp}) &= M_{O} \\ I_{\phi}\ddot{\phi}_{sp} + c_{syg}(\phi_{sp} - \phi_{N}) + c_{ws}(\phi_{sp} - \phi_{O}) + \\ + k_{syg}(\phi_{sp} - \phi_{N}) + k_{syg}e \cdot ((h + u_{w}(t))\sin\varphi_{sp} - v\cos\varphi_{sp}) \\ + k_{wg}(\phi_{sp} - \phi_{O}) + k_{wg}e \cdot ((h + u_{w}(t))\sin\varphi_{sp} - v\cos\varphi_{sp}) + k_{spo}r_{sw}^{2}(\phi_{sp} - \phi_{N}) &= 0 \\ \mathbf{gdzie:} \end{split}$$

 $M_N$ ;  $M_O$  –moment napędowy i oporowy;

- $I_N$  –zredukowany moment bezwładności napędu;
- Isp moment bezwładności biernej części sprzęgła;
- *I<sub>ZO</sub>* zredukowany moment bezwładności odbiornika;
- $m_{sp}$  masa biernej części sprzegła;

 $r_{sw}$  – promień sworznia;

 $k_{Ns}$  – sztywność skrętna napędu;

- k<sub>spg</sub>; k<sub>sps</sub> sztywność giętna i skrętna sprzęgła;
- $k_{wg}$ ;  $k_{ws}$  sztywność giętna i skrętna wału;
- *k*<sub>spo</sub> sztywność sprzęgła na obrót wkładki;
- cspg; csps tłumienie giętne i skrętne sprzęgła;
- $c_{wg}$ ;  $c_{ws}$  tłumienie giętne i skrętne wału;
- $\varphi_N$ ;  $\varphi_{sp}$ ;  $\varphi_O$  kąty obrotu napędu, sprzęgła i odbiornika;
- $u_w(t)$ ;  $u_{sp}(t)$  ugięcie wału i sprzęgła wywołane zmiennymi w czasie błędami;
- h; v pozioma i pionowa współrzędna środka ciężkości S<sub>c</sub> z uwzględnieniem ugięcia wału;
- $h_1$ ;  $v_1$  pozioma i pionowa współrzędna środka obrotu  $O_1$ .z uwzględnieniem ugięcia wału;
- $h_1$ ;  $v_1$  odpowiednio pozioma i pionowa współrzędna środka obrotu  $O_1$ .

Na rysunku 5 przedstawiono model układu stanowiskowego do badania błędów współosiowości.



Rys. 5. Model układu stanowiskowego do badań błędów współosiowości

Na rysunku 6 przedstawiono porównanie rezultatów pomiarowych i modelowych.



Rozpatrzmy jeszcze **trzeci przykład** gdzie poszukiwaną zmianą stanu było przekoszenie wałów przy założeniu ruchu ustalonego ( $\ddot{\varphi}=0$ ) zredukowano układ równań wyłącznie do równań przemieszczeń masy zredukowanej sprzęgła w płaszczyznach v i *h* (czyli dwóch równań ruchu):  $\ddot{h} + \omega_0^2 h + 2\gamma \dot{h} + \xi_{3h} h^3 + \xi_{5h} h^5 \dots =$ 

$$=\sum_{n=1}^{N} \left( e\Omega^{2} \cos\varphi + \frac{e\alpha_{n}}{2n^{2}J} \left\{ \sin[(n+1)\Omega t + \eta_{n}] - \sin[(n-1)\Omega t + \eta_{n}] \right\} \right)$$
  
$$\ddot{v} + \omega_{0}^{2} + 2\dot{\gamma}\dot{v} + \xi_{3v}v^{3} + \xi_{5v}v^{5} \dots =$$
  
$$=\sum_{n=1}^{N} \left( e\Omega^{2} \sin\varphi + \frac{e\alpha_{n}}{2n^{2}J} \left\{ \cos[(n+1)\Omega t + \eta_{n}] + \cos[(n-1)\Omega t + \eta_{n}] \right\} \right)$$
  
(5)

Wprowadzono natomiast okresowe poliharmoniczne zaburzenie przenoszonego momentu obrotowego i przyjęto założenie, że zmiana kata przekoszenia zmienia charakterystykę sprężystą układu sposób W nieliniowy co symbolizują człony  $\xi_{ij}$  w równaniach ruchu, a następnie w procesie identyfikacji dobrano odpowiednie parametry zaburzenia modelu i parametry rozwinięcia funkcji nieliniowej w szereg  $\xi_{ii} = f(\beta)$  gdzie przez  $\beta$  oznaczono kąt przekoszenia. Wyniki przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Rezultaty identyfikacji uproszczonego modelu nieliniowego: a) wynik obserwacji obiektu dla stanu zerowego, b) wynik z modelu dla stanu zerowego, c) reakcja obiektu na kąt przekoszenia, d) reakcja modelu na kąt przekoszenia

Dodać należy, że wszystkie modele rozwiązywane były w pakiecie MATLAB Simulink, wszystkie były szczegółowo dyskutowane na konferencjach i odpowiednio zmieniane i doskonalone. Jak widać z przytoczonych rysunków wszystkie pozwoliły na uzyskanie rezultatów o bardzo wysokiej zgodności z rezultatami pomiarów. Jaki stąd zatem wniosek?

# 4. WNIOSEK

Wniosek jest tylko jeden. Zdaniem Autora można i warto stosować strukturalne modele dynamiczne w diagnostyce wibroakustycznej, przy czym im prostszy model uda się znaleźć tym oczywiście lepiej. A czy argumentacja przemawiająca za tą tezą była przekonywująca niech osądzą Czytelnicy.

Autor dziękuje za pomoc kolegom z Pracowni Wibroakustyki IPBM PW, a w szczególności dr. inż. Jackowi Dziurdź, dr. inż. Radosławowi Pakowskiemu i mgr. inż. Piotrowi Deuszkiewiczowi oraz pani dr inż. Iwonie Komorskiej i panu dr. inż. Jarosławowi Pankiewiczowi.

#### LITERATURA

- [1] Batko W., Dąbrowski Z., Engel Z., Kiciński J., Weyna S., Nowoczesne metody badania procesów wibroakustycznych (część I), Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom, 2005.
- [2] Dąbrowski Z., Komorska I., A. Puchalski, Diagnozowanie blędów wykonania i montażu układów wirujących, Warszawa – Radom, WiZPITE, 2001.
- [3] Dąbrowski Z., Modeling and Identification of Nonlinear System for Technical Diagnostics, The 8<sup>th</sup> International Congress on Sound and Vibration, Hong Kong, China, 2001, str. 1083-1090.
- [4] Dąbrowski Z., Dziurdź J., Skórski W. W., The Problem if Sailing Boat Dynamic Model Identification, 3 <sup>th</sup> Asia–Pacific Conference on System Integrity and Maintenance ACSIM, Cairns, 2002, str. 77-82.
- [5] Dąbrowski Z., Use of Non-Linear Symptoms in Technical Diagnosis, International Journal of COMADEM, 8(2), April 2005, str. 36-41.
- [6] Dziurdź J., Minimalizacja hałasu i drgań na stanowisku operatora maszyny roboczej (propozycja metody), Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 2000.
- [7] Komorska I., Badanie wpływu błędów montażowych na drgania szeregowych układów przeniesienia mocy, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 1999.
- [8]Pakowski R., Badania wpływu charakterystyk sprzęgieł podatnych na odpowiedź dynamiczną układu napędowego w warunkach zmiennych w czasie odchyłek współosiowości, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 2005.
- [9] Pankiewicz J., Wykorzystanie efektów nieliniowych w diagnozowaniu elementów lekkosprężystych, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 2002.



Prof. dr hab. inż. **Zbigniew DĄBROWSKI** – profesor w Instytucie Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Warszawskiej. W pracy naukowej zajmuje się m.in. diagnostyką, wibroakustyką i dynamiką maszyn, oraz minimalizacją drgań i hałasu

i analizą sygnałów. Autor ponad 200 publikacji, w tym 16 książkowych. Wiceprezes (uprzednio Sekretarz Generalny) Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej.

# DIAGNOSTYKA'3 (39)/2006 Warto przeczytać



Pod redakcją: Jacka DYBAŁY Jędrzeja MĄCZAKA Stanisława RADKOWSKIEGO **Wykorzystanie sygnału** wibroakustycznego w analizie ryzyka technicznego

ITE Radom, 2006

Prezentowana publikacja powstała w rezultacie badań prowadzonych w Zespole Diagnostyki Technicznej i Analizy Ryzyka IPBM PW w ramach projektów finansowanych ze środków na naukę.

Wczesne wykrycie uszkodzenia pozwala uniknąć degradacji wytworu, w szczególności awarii systemów technicznych oraz zwiazanych z tym konsekwencji w postaci strat materialnych i pozamaterialnych i stanowi podstawę do optymalnej decyzji w czasie umożliwiającym podjęcie działań korygujących bądź naprawczych. Bazą dla tego typu działań jest analiza ryzyka technicznego, w której do oszacowania ryzyka potrzebujemy zarówno informacji o prawdopodobieństwie wystąpienia zdarzenia niepożądanego jak i wiarygodnej prognozy hipotetycznych konsekwencji tego zdarzenia. W niniejszej pracy przedstawiono między innymi:

- tło ekonomiczno społeczne zagadnień bezpieczeństwa technicznego;
- możliwość wykorzystania diagnostyki wibroakustycznej do oceny wpływu procesów degradacyjnych i zmęczeniowych na poziom niezawodności;
- wykorzystanie diagnostyki wibroakustycznej i strategii eksploatacji według stanu rzeczywistego w szacowaniu poziomu ryzyka technicznego oraz wynikających stąd kryteriów wyboru zbioru parametrów diagnostycznych;
- wykorzystanie modeli symulacyjnych i wynikające stąd zagadnienia analizy sygnału wibroakustycznego i selekcji informacji diagnostycznej;
- możliwość wykorzystania metod płaszczyzny lokalnej w badaniach niskoenergetycznych faz rozwoju uszkodzenia;
- wielowymiarowe parametry diagnostyczne i ich wykorzystanie w problematyce detekcji wczesnych faz uszkodzeń;
- analizę widm wielowymiarowych, reprezentacji czasowo-częstotliwościowej, wykorzystanie pochodnych rzędu rzeczywistego oraz metod statystyki wielowymiarowej;
- zagadnienia zaawansowanych metod ślepej separacji i filtracji oraz geometrycznej separacji klas w wykrywaniu jakościowych i ilościowych zmian w sygnale wibroakustycznym;

- zagadnienia budowy autonomicznego układu diagnostycznego, który może być wykorzystany do kształtowania bezpieczeństwa technicznego;
- zagadnienie wykorzystania sygnału wibroakustycznego w nadzorowaniu stanu elementów i zespołów krytycznych.



Praca zbiorowa pod redakcją: Wojciecha BATKO Zbigniewa DĄBROWSKIEGO **Nowoczesne metody badania procesów wibroakustycznych Cz. II.** 

ITE Radom, 2006.

Prezentowane opracowanie poświęcone jest dwóm grupom zagadnień z zakresu badań wibroakustycznych. Pierwsza dotyczy modelowania, które to zostało przedstawione w dwóch rozdziałach. Rozdział pierwszy opisuje prosty model nieliniowy jako narzędzie zmiennych w czasie odchyłek diagnozowania współosiowości spowodowanych np. odkształceniami sprężystymi konstrukcji, odkształceniami posadowienia, bezwładności itp. W modelu tym elementy składowe rzeczywistego układu dynamicznego zastąpiono tarczami o zredukowanym momencie bezwładności, osadzonymi na spreżystych wałach. Wolnozmienne, zewnetrzne wymuszenie wprowadzono jako zaburzenie ruchu w płaszczyźnie poziomej w postaci funkcji harmonicznej o zadawanej amplitudzie, częstotliwości oraz fazie. Przv częstotliwości wymuszenia zewnętrznego równej zero model umożliwia badanie układów ze statycznymi błędami osiowania. Komputerowej symulacji dokonano w środowisku Matlab Simulink. Drugi rozdział poświęcony jest przykładowi identyfikacji modelu maszvnv wirnikowej. Zadanie identyfikacji zrealizowano dwu etapowo, najpierw zamodelowano i zweryfikowano model konstrukcji podpierającej a następnie wirnika. Uzyskano bardzo dużą zgodność modelu z pomiarami weryfikacyjnymi. Otrzymany model maszyny wirnikowej daje nowe możliwości symulacji komputerowej – może być wykorzystany do pozyskiwania relacji diagnostycznych na zasadzie wprowadzania różnego rodzaju defektów, a następnie droga symulacji komputerowej pozyskanie ich symptomów.

W części drugiej książki przedstawiono przykłady rozwiązań zagadnień z dziedziny analizy sygnałów ze szczególnym uwzględnieniem zastosowań analizy falkowej. Zagadnienia te opisano w trzech rozdziałach poświęconych: wykorzystaniu dyskretnego przekształcenia Fouriera do odtwarzania sygnału zakłóconego szumem, falkowej funkcji przejścia w ocenie oddziaływań układu "narzędzie – ręka operatora", zastosowaniu filtracji falkowej do eliminacji przesłuchów.

#### Recenzenci publikowanych prac:

prof. dr hab. inż. Walter BARTELMUS prof. dr hab. inż. Lesław BĘDKOWSKI dr hab. inż. Tadeusz DĄBROWSKI – prof. WAT prof. dr hab. inż. Zbigniew DĄBROWSKI prof. dr hab. inż. Jerzy GIRTLER prof. dr hab. inż. Krzysztof KOŁOWROCKI prof. dr hab. inż. Jan Maciej KOŚCIELNY prof. dr hab. inż. Jerzy LEWITOWICZ prof. dr hab. inż. Stanisław NIZIŃSKI prof. dr hab. inż. Leszek POWIERŻA prof. dr hab. inż. Miczysława PRAŻEWSKA prof. dr hab. inż. Stanisław RADKOWSKI prof. dr hab. inż. Janusz SZPYTKO prof. dr hab. inż. Wojciech WAWRZYŃSKI prof. dr hab. inż. Andrzej WILK prof. dr hab. inż. Maciej WOROPAY prof. dr hab. inż. Józef ŻUREK

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

#### CALL FOR PAPERS & INVITATION TO EXHIBITORS

The 20<sup>th</sup> International Congress & Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management



Faro, Portugal, June 13-15, 2007

www.co.it.pt/comadem2007

# EVACES'07

EXPERIMENTAL VIBRATION ANALYSIS FOR CIVIL ENGINEERING STRUCTURES

24-26 OCTOBER 2007 | PORTO - PORTUGAL

First Announcement and Call for Papers



Wszystkie opublikowane w czasopiśmie artykuły uzyskały pozytywne recenzje, wykonane przez niezależnych recenzentów.

Redakcja zastrzega sobie prawo korekty nadesłanych artykułów.

Kolejność umieszczenia prac w czasopiśmie zależy od terminu ich nadesłania i otrzymania ostatecznej, pozytywnej recenzji.

Wytyczne do publikowania w DIAGNOSTYCE można znaleźć na stronie internetowej: http://www.uwm.edu.pl/wnt/diagnostyka

Redakcja informuje, że istnieje możliwość zamieszczania w DIAGNOSTYCE ogłoszeń i reklam. Jednocześnie prosimy czytelników o nadsyłanie uwag i propozycji dotyczących formy i treści naszego czasopisma. Zachęcamy również wszystkich do czynnego udziału w jego kształtowaniu poprzez nadsyłanie własnych opracowań związanych z problematyką diagnostyki technicznej. Zwracamy się z prośbą o nadsyłanie informacji o wydanych własnych pracach nt. diagnostyki technicznej oraz innych pracach wartych przeczytania, dostępnych zarówno w kraju jak i zagranicą.