DIAGNOZA - GENEZA - PROGNOZA => PODSTAWA KAŻDEJ DECYZJI

POLSKIE TOWARZYSTWO DIAGNOSTYKI TECHNICZNEJ
PTDT

afiliowane przy

Wydziale Nauk
Technicznych
Polskiej Akademii Nauk

Diagnostyka

ISSN 641-6414

Nr 2(46) / 2008

RADA PROGRAMOWA / PROGRAM COUNCIL

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

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

CZŁONKOWIE / MEMBERS:

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

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

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. **Daniel KUJAWSKI**
Western Michigan University – USA

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

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

prof. **Vasyl OSADCHUK**
Politechnika Lwowska – 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

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

prof. **Alexandr YAVLENSKY**
J/S company "Vologda Bearing Factory" – Rosja

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

Wszystkie opublikowane prace uzyskały pozytywne recenzje wykonane przez dwóch 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 PEKAO SA O/Warszawa
nr konta: 33 1240 5963 1111 0000 4796 8376

NAKŁAD: **270 egzemplarzy**

Wydanie dofinansowane przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego

SPIS TREŚCI / CONTENTS

Józef KORBICZ – Uniwersytet Zielonogórski 7
Artificial Intelligence In Technical Diagnostics
Sztuczna inteligencja w diagnostyce technicznej

Leszek MAJKUT – AGH Kraków 17
Crack Detection In Beam Like Structures. Part I. Identification Of Crack Location
Detekcja pęknięcia w elementach belkowych. Część I. Identyfikacja miejsca pęknięcia

Leszek MAJKUT – AGH Kraków 21
Crack Detection In Beam Like Structures. Part II. Quantification Of Crack Depth
Detekcja pęknięcia w elementach belkowych. Część II. Identyfikacja głębokości pęknięcia

Tomasz GAŁKA – Instytut Energetyki w Warszawie 25
Statistical Vibration-Based Symptoms In Rotating Machinery Diagnostics
Statystyczne symptomy drganiowe w diagnostyce maszyn wirnikowych

Radosław ZIMROZ – Politechnika Wrocławska 33
Role Of Signal Preprocessing In Local Damage Detection In Mining Machines
Rola wstępnego przetwarzania sygnałów w detekcji uszkodzenia lokalnego w maszynach górniczych

Piotr LESIAK – Politechnika Radomska 37
Diagnostic Sensitivity Of Ultrasonic Mobile Flaw Detection Of Head Checking Type Flaws In Railway Rails
Wrażliwość diagnostyczna ultradźwiękowych mobilnych badań wad typu head checking w szynach kolejowych

Jan Maciej KOŚCIELNY, Dariusz CHALECKI – Politechnika Warszawska 41
Identyfikacja uszkodzeń w układach liniowych
Fault Identification In Linear Systems

Leonel CASTAÑEDA – EAFIT University in Medellín – Colombia,
Bogdan ŻÓŁTOWSKI – Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy 45
Wielokryterialny system oceny bezpieczeństwa i komfortu jazdy wagonów pociągu
Multidimensional System For Evaluating The Safety And Comfort Travelling On Railway Vehicles

Waldemar KUROWSKI, Andrzej PANKOWSKI – Politechnika Warszawska 51
Efekt okna pomiarowego w dyskretnym widmie Fouriera
Effect Of Measuring Window On Discrete Fourier Spectrum

Jan CHUDZIKIEWICZ – Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie 57
Własności diagnostyczne struktur będących niepełnymi hiperześcianami
Diagnostic Properties Of On Incomplete Hypercubes Structures

Jacek BARTMAN, Anna KOZIOROWSKA – Uniwersytet Rzeszowski 61
Model systemu „zespół pompowy – przewód" ze sterowanym układem napędowym na potrzeby diagnostyczne
Model Of "Pump Aggregate – Pipeline" System With Controled Driving Match On Diagnostic Requirements

Jerzy GŁUCH – Politechnika Gdańska 67
Wpływ degradacji urządzeń pomiarowych na pozyskiwanie symptomów niesprawnej pracy złożonych obiektów energetycznych
Influence Of Measuring Equipment Degradation On Gaining Of Symptoms Of Large Power Units Inefficient Operation

Henryk TYLICKI – UTP w Bydgoszczy 71
Genezowanie stanu technicznego maszyn
The Genesis Of Machines Technical State

Waldemar KUROWSKI, Izabela JÓZEFCZYK – Politechnika Warszawska 75
Transformacja falkowa w diagnostyce urządzeń mechanicznych
Wavelet Transorm In Mechanical Devices Diagnostics

Sebastian RZYDZIK – Politechnika Śląska 83
Identyfikacja diagnostycznych modeli lokalnych w układach rozproszonych
Identyfication Of The Diagnostic Local Model In Distributed Systems

Kazimierz SITEK – Unimetal Sp. z o.o. Złotów 91
Diagnostyka bezpieczeństwa pojazdów samochodowych za pomocą linii diagnostycznych
The Diagnostics Of The Safety By Use Diagnostic Lines

Jacek PAŚ, Tadeusz DĄBROWSKI – WAT Warszawa 101
Metodyka nauczania diagnozowania systemów bezpieczeństwa na przykładzie systemów sygnalizacji włamania i pożaru
Methodology Of Teaching Of Diagnosing Technical Security Systems With Examples Of System Of Signalization Of Burglary And Fire

Justyna ŚLĘZAK-ŻOŁNA, Jerzy GŁUCH – Politechnika Gdańska 105
Neuronowa symulacja fluktuacji ciśnienia i temperatury pary w upuście parowego bloku energetycznego
Neural Simulation Of Pressure And Temperature Fluctuations At Steam Extraction Of Power Unit With Steam Turbine

Maciej TABASZEWSKI – Politechnika Poznańska 109
Optymalizacja neuronowego modelu prognostycznego
Optimization Of Neural Predictive Model

Damian SKUPNIK – Politechnika Śląska 117
Podejście wieloaspektowe do modelowania w diagnostyce technicznej
A Multiaspect Approach To The Modelling In Technical Diagnostics

Stanisław Janusz CIEŚLAKOWSKI – Politechnika Radomska 121
Diagnozowanie układów torowych górek rozrządowych
Diagnostics Of Track Systems Of The Humps In A Gravity Yards

Barbara KUCHARSKA – Politechnika Opolska 125
Zależność między deskryptorem A_{rms} a ładunkiem pozornym dla wybranych form wyładowań niezupełnych
The Dependence Betweeen A_{rms} Descriptor And Apparent Charge In The Chosen Forms Of Partial Discharge

Szymon SALAMON – Politechnika Częstochowska 129
Wybrane elementy diagnostyki szczelności płynowych konstrukcyjnie zamkniętych w przestrzeniach roboczych
Selected Elements Of Leak-Tightness Diagnostics Of Fluid Working Volumes Confined By Design

Marcin BEDNAREK – Politechnika Rzeszowska,
Lesław BĘDKOWSKI, Tadeusz DĄBROWSKI – WAT Warszawa 133
Progowa metoda diagnozowania w systemie transmisji informacji
Diagnosis Threshold Method In Data Transfer Systems

Marcin BEDNAREK – Politechnika Rzeszowska,
Lesław BĘDKOWSKI, Tadeusz DĄBROWSKI – WAT Warszawa 137
Metody i układy przeciwdestrukcyjne oraz diagnostyczne w systemach transmisji informacji
Anti-Destructive And Diagnostic Methods In Transmission Systems Of Information

Michał STYP-REKOWSKI – UTP w Bydgoszczy 143
Prognozowanie stanu obrabiarek na podstawie badań ich dokładności
Forecasting Of Machine-Tools State On The Base Of Their Accuracy

Piotr KUROWSKI – AGH Kraków 151
Zastosowanie technik nieniszczących do badania fundmentowań
Using Nondestructive Methods For Foundations Investigation

Jan MONIETA, Piotr WALERIAŃCZYK – Akademia Morska w Szczecinie 157
Diagnozowanie przebiegu ciśnienia w komorach spalania okrętowych silników spalinowych z wykorzystaniem sygnału drganiowego
Diagnosis Of Course Of Pressure In Combustion Chambers Of Marine Diesel Engines With Utilize Of Vibration Signals

Rafał PAWLETKO – Akademia Morska w Gdyni 165
Pozyskiwanie wiedzy z bazy danych dla potrzeb diagnozowania okrętowego silnika tłokowego
Knowledge Acquisition From Database For Marine Diesel Engine Diagnostic

Kazimierz WITKOWSKI – Akademia Morska w Gdyni 169
Znaczenie pomiaru masowego natężenia przepływu powietrza przez sprężarkę w diagnostyce układu doładowania silnika okrętowego
Measurement Meaning Mass Intensity Of Air Flowing Trough The Compressor In Diagnostic Turbocharger System Of Ship's Engine

Leszek WONTKA – Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni 173
Straty mechaniczne silnika a lepkość oleju smarowego w aspekcie diagnostyki okrętowego tłokowego silnika spalinowego
Engine Mechanical Losses Versus Lubricating Oil Viscosity As An Aspect Of Marine RIC Engine Diagnosis

Grzegorz BORUTA – Uniwersytet Warmińsko-Mazurski 179
Ocena wybranych parametrów regulacyjnych tłokowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym na podstawie sygnału wibroakustycznego
The Appreciation Of Select Regulative Parameters Of The Diesel Engine On The Base Of The Vibroacoustic Signal

Ryszard JASIŃSKI – Politechnika Gdańska 189
Ocena zdatności hydraulicznych zespołów sterujących uruchamianych w niskich temperaturach otoczenia
Evaluation Of Ability Of Hydraulic Control Components To Start Up In Low Ambient Temperatures

Marek ŁUTOWICZ – Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni 195
Ocena szczelności komory spalania okrętowego tłokowego silnika spalinowego w czasie eksploatacji
Marine Diesel Engine Combustion Chamber Tightens Assessment In The Operation Conditions

Warto przeczytać 199

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN TECHNICAL DIAGNOSTICS*

Józef KORBICZ
Instytut Sterowania i Systemów Informatycznych, Uniwersytet Zielonogórski
ul. Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra, tel. 068 328 24 22, fax: 068 328 47 51
e-mail: j.korbicz@issi.uz.zgora.pl

Summary

The paper deals with the problems of robust fault detection using soft computing techniques, particularly neural networks (Group Method of Data Handling, GMDH), neuro-fuzzy networks (Takagi-Sugeno (T-S) model) and genetic programming. The model-based approach to Fault Detection and Isolation (FDI) is considered. The main objective is to show how to employ the bounded-error approach to determine the uncertainty defined as a confidence range for the model output, the adaptive thresholds can be defined. Finally, the presented approaches are tested on a servoactuator being an FDI benchmark in the DAMADICS project.

Keywords: fault detection, robustness, adaptive threshold, neural networks, neuro-fuzzy networks, genetic programming.

SZTUCZNA INTELIGENCJAW DIAGNOSTYCE TECHNICZNEJ

Streszczenie

W artykule rozpatruje się problemy odpornej detekcji uszkodzeń z wykorzystaniem technik obliczeń inteligentnych, a w szczególności sieci neuronowych (Group Method of Data Handling, GMDH), sieci neuronowo-rozmytych (model Takagi-Sugeno) oraz programowania genetycznego. Rozpatruje się układ detekcji i lokalizacji uszkodzeń z modelem. Głównym celem jest pokazanie jak zastosować metodę ograniczonego błędu do wyznaczenia niepewności modeli neuronowych i rozmytych. Pokazano, że korzystając z wyznaczonych niepewnych modeli obliczeń inteligentnych zdefiniowanych w postaci przedziałów ufności dla wyjścia modelu można zdefiniować adaptacyjny próg decyzyjny. W ostatniej części efektywność rozpatrywanych podejść ilustrowana jest na przykładzie układu diagnostyki inteligentnego urządzenia siłownik-ustawnik-zawór z projektu DAMADICS.

Słowa kluczowe: detekcja uszkodzeń, odporność, próg adaptacyjny, sieci neuronowe, sieci neuronowo-rozmyte, programowanie genetyczne.

1. INTRODUCTION

The reliability, safe and availability of engineering systems and machines play an important role during their operation use. It is important especially nowadays, when industrial installations and control algorithms are becoming more and more sophisticated, and economics pressure to reduce the costs. An early detection of faults can help avoid the system shutdown or breakdown. A system that includes the capacity of detecting, isolating, identificating or classifying faults is called a fault detection and isolation system. In automatic control systems, defects may occur in sensors, actuators and/or components of the controlled process. Such faults appeared in a component may develop into failures of the whole systems and this effect can be easily amplified by the closed loop. Therefore, fault tolerant control systems has gained more and more importance in the last decade [1, 23]. The toleranece to faults can be achived by different strategies (see the excellent overview paper [51]), but the most important and difficult problem is early diagnosis of faults. Therefore, fault diagnosis has become an important issue in modern control theory and practice.

During the last two and half decades, a huge amount of research has been conducted in FDI and a great variety of methods have been proposed. The core of modern diagnosis systems is the so-called model-based approach [11, 18, 19, 27, 40], in which

* This work has been supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Poland under the project No. 1219/B/T02/2007/33.

either analytical and/or soft computing models are applied [15, 44]. Unfortunately, the analytical model-based approach is usually restricted to simpler systems described by linear models. When there are no mathematical models of the diagnosed system or the complexity of the dynamic model increases and the task of modeling is hard, an analytical model cannot be applied in the fault diagnosis system nor give satisfactory results. Therefore many efforts are made to use knowledge-based or qualitative or data-based models [3, 16, 41, 43]. They represent system behaviour in terms of heuristic or qualitative knowledge [22, 32]. The relationship between inputs and outputs may be described by a rule base or a set of parameters that have to be determined during an identification stage based on the learning data set. In this case databased models, such as neural networks [15, 24], fuzzy sets [20, 28, 31], the evolutionary algorithms [37, 50] or their combination [3, 43], can be considered.

Irrespective of the modelling method used (analytical or soft computing), there is always the problem of model uncertainty, i.e., the model-reality mismatch. Thus, the better model used to represent system behaviour, the better chance of improving the reliability and performance in diagnosing faults. Indeed, disturbances as well as model uncertainty are inevitable in industrial systems [42], and hence there exists a pressure creating the need for robustness in fault diagnosis systems [5]. This robustness requirement is usually achieved at the fault detection stage, i.e., the problem is to develop residual generators which should be insensitive (as far as possible) to model uncertainty and real disturbances acting on a system while remaining sensitive to faults. The most common approach to robust fault diagnosis is to use robust observers [5, 7, 10].

The main objective of this survey paper is to present recent developments in modern fault diagnosis with neural networks, neuro-fuzzy networks and genetic programming. In particular, the paper is organised as follows. Section 2 outlines the problem of model-based fault diagnosis. The problem of genetic programming in modelling in Section 3 is considered. Section 4 presents neural network-based approaches that can be used to settle the fault diagnosis problem when the mathematical state-space model is not available. The Neuro-Fuzzy (NF) structure optimization problem in Section 5 is considered. The so-called Bounded Error Approach (BEA) is applied for description of soft computing models uncertainty, i.e. for GMDH neural network and T-S fuzzy model. The final section presents a comprehensive study regarding the application of the approaches considered to the DAMADICS benchmark problem.

2. MODEL-BASED FAULT DIAGNOSIS

The basic idea of the model-based approach to FDI is to compare the behaviour of the actual system with that of a functional system model. The traditional approach is to use analytical models and to check the model outputs for consistency with the measured outputs of the actual system. In general, the FDI task is accomplished by a two-step procedure, which consists of residual generation and evaluation.

In other words, three phases are distinguished in the process diagnosis [11, 18, 40] – detection, isolation and identification. The task of detection is to infer the occurrence of faults from residuals, and that of isolation – to define their location and time. Then the task of identification is to define the type, size and case of faults.

Note that the core of model-based FDI is a process model which has to be accurate. Otherwise, false alarms occur that falsify the results and make the FDI system useless. Residual evaluation is a logical decision-making process which transforms quantitative knowledge (residuals) into qualitative statements of the *yes* or *no* type.

The analytical redundancy of measurement line exists when an additional value of process variable is obtained using mathematical model that connects the calculated variables with other measured signals. Analytical redundancy is used for fault detection where the analytical model of diagnosed systemismost important part.

Among known mathematical models a special role belongs to state space equations that are applied for designing of state observers [17]. A common disadvantage of analytical approaches to the FDI system is the fact that a precise mathematical model of the diagnosed process is required. An alternative solution can be obtained using soft computing techniques, i.e., artificial neural networks, fuzzy logic, expert systems and evolutionary algorithms [3, 48] or their combination as neuro-fuzzy networks [20, 43]. To apply soft computing modelling, empirical data, principles and rules which describe the diagnosed process are required [43].

Below we focus on the problem of designing GMDH networks and Takagi-Sugeno NF systems as well as describing their uncertainty. Knowing such soft computing models' structure and possessing the knowledge regarding their uncertainty it is possible to design robust detection schemes by defining adaptive thresholds.

3. GENETIC PROGRAMMING INMODELLING

Although there are many techniques for constructing non-analytical models, in one way or another, they finally boil down to several global optimization problems, like searching for an optimal model structure, the allocation of model parameters etc. They are nonlinear, multi-modal, usually multi-objective, so that conventional "local" optimization methods are insufficient to solve them. In recent years, direct search techniques, which are problem-independent, have been widely used in optimization. Unlike calculus-based methods (gradient descent, etc.), direct search algorithms do not require the use of derivatives. Gradient-descent methods work well when the objective surface is relatively smooth, with few local minima. However, realworld data are often multimodal and contaminated by noise which can further distort the objective surface.

Evolutionary Algorithms (EAs) are a broad class of stochastic optimization algorithms inspired by some biological processes which allow populations of organisms to adapt to their surrounding environment [33, 37]. Genetic Programming (GP) [30] is an extension of EAs.

3.1. Input-output representation of the system via GP

The set of possible candidate models from which the system model will be obtained constitutes an important preliminary task in any system identification procedure [13, 46].

Knowing that the diagnosed system exhibits nonlinear characteristics, a choice of the nonlinear model set must be made. In this section, an NARX (*Nonlinear AutoRegresive with eXogenous variable*) model was selected as the foundation for identification methodology. Let a Multi-Input and Multi-Output (MIMO) NARX model has the following form:

$$\begin{aligned}\hat{y}_{i,k} = g_i(&\hat{y}_{1,k-1},\ldots,\hat{y}_{1,k-n_{1,y}},\ldots,\hat{y}_{m,k-1},\ldots,\\ &\hat{y}_{m,k-n_{m,y}},\ldots,u_{1,k-1},\ldots,u_{1,k-n_1},\ldots,\\ &u_{r,k-1},\ldots,u_{r,k-n_{r,u}},\theta_i),\\ &i=1,\ldots m.\end{aligned} \tag{1}$$

Thus the system output is given by

$$y_k = \hat{y}_k + \varepsilon_k \tag{2}$$

where ε_k consists of a structural deterministic error, caused by the model-reality mismatch, and the measurement noise ν_k. The problem is to determine an unknown function $g(\cdot) = (g_1, \ldots, g_m)$ and to estimate the corresponding parameters vector $\theta = (\theta_1, \ldots, \theta_m)$.

One possible solution to this problem is the genetic programming approach. A tree is the main ingredient underlying the GP algorithm. In order to adapt GP to system identification it is necessary to represent the model (1) as a tree, or a set of trees [30]. The language of the trees in GP is formed by the user-defined function F set and the terminal T set, which form the nodes of the trees.

The functions should be chosen so that they are *a priori* useful in solving the problem, i.e., any knowledge concerning the system under consideration should be included in the function set. This function set is very important and should be universal enough to be capable of representing a wide range of nonlinear systems. The terminals are usually variables or constants. Moreover, a tree representation can be extended by the so-called *node gains*. A node gain is a numerical parameter associated with the node, which multiplies its output value.

One of the best known criteria which can be employed to select the model structure and to estimate its parameters is the Akaike Information Criterion (AIC) [46], where the following quality index is minimized:

$$J_{AIC}(M_i) = \frac{1}{2} J\left(M_i\left(\hat{\theta}^i\right)\right) + \frac{1}{n_T}\dim\theta^i, \tag{3}$$

where:

$$J\left(M_i\left(\theta^i\right)\right) = \ln\det\sum_{k=1}^{n_T}\varepsilon_k\varepsilon_k^T, \tag{4}$$

and $\hat{\theta}^i = \arg\min_{\theta^i} J\left(M_i\left(\theta^i\right)\right)$ are the obtained using the identification data set of n_T pairs of input/output measurements. The GP algorithm was successfully applied to identify the input-output model of the evaporation station at the Lublin Sugar Factor S. A. (Poland) [6]. Figure 1 illustrates the obtained results [50].

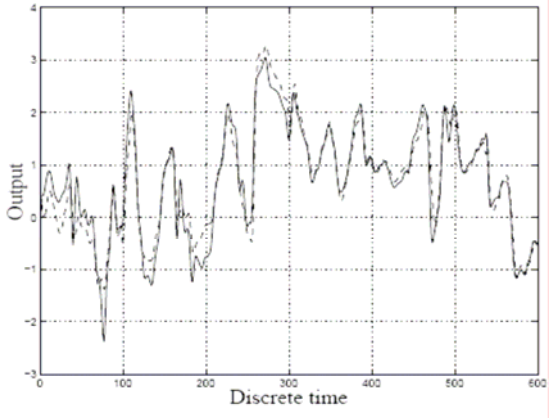


Fig. 1. System (solid line) and model (dashed line) output for the identification (left) and validation (right) data sets.

4. NEURAL NETWORKS IN FAULT DETECTION

For the model-based approach [18, 40], the neural network replaces the analytical model that describes the process under the normal operating conditions [15, 43]. First, the network has to be trained to settle this task. Learning data can be collected directly from the process, if possible, or from a simulation model that should be as realistic

as possible. The latter possibility is of special interest for data acquisition in different faulty situations. This is especially important for the task of testing the residual generator because such data are not generally available from the real process. The training process can be carried out off-line or on-line (it depends on the availability of data) [9, 38].

The possibility to train a network on-line is very attractive, especially in the case of adapting a neural model to mutable environment or time-varying systems. After finishing the training, a neural network is ready for on-line residual generation. In order to be able to capture the dynamic behaviour of the system, the neural network should have dynamic properties [8, 39], e.g., it should be a recurrent network.

Residual evaluation is a decision-making process that transforms quantitative knowledge into qualitative *Yes* or *No* statements. It can also be perceived as a classification problem. The task is to match each pattern of the symptom vector with one of the pre-assigned classes of faults and the fault-free case. This process may be highly facilitated with intelligent decision making. To perform residual evaluation, neural networks can be applied, e.g., feed-forward networks or selforganizing maps [9, 14, 25].

4.1. Robust GMDH neural networks

A successful application of the ANNs to the system identification and fault diagnosis tasks [24] depends on a proper selection of the neural network architecture. In the case of the classical ANNs such as Multi-Layer Perceptron (MLP), the problem reduces to the selection of the number of layers and the number of neurons in a particular layer. If the obtained network does not satisfy prespecified requirements, then a new network structure is selected and parameter estimation is repeated once again. The determination of the appropriate structure and parameters of the model in the presented way is a complex task. Furthermore, an arbitrary selection of the ANN structure can be a source of model uncertainty. Thus, it seems desirable to have a tool which can be employed for automatic selection of the ANN structure, based only on the measured data. To overcome this problem, GMDH neural networks [12, 36] have been proposed. The synthesis process of the GMDH model is based on iterative processing of a sequence of operations. This process leads to the evolution of the resulting model structure in such a way as to obtain the best quality approximation of the identified system. Thus, the task of designing a neural network is defined in such a way so as to obtain a model with a small uncertainty.

The idea of the GMDH approach relies on replacing the complex neural model by the set of hierarchically connected neurons. The behaviour of each neuron should reflect the behaviour of the system being considered. It follows from the rule of the GMDH algorithm that the parameters of each neuron are estimated in such a way that their output signals are the best approximation of the real system output. In this situation, the neuron should have the ability to represent the dynamics. One way out of this problem is to use dynamic neurons [8, 21, 39]. Dynamics in these neurons are realised by introducing a linear dynamic system – an IIR filter. The process of GMDH network synthesis leads to the evolution of the resulting model structure in such a way as to obtain the best quality approximation of the real system [49].

To obtain the final structure of the network, all unnecessary neurons are removed, leaving only those which are relevant to the computation of the model output. The procedure of removing the unnecessary neurons is the last stage of the synthesis of the GMDH neural network.

4.2. Confidence estimation of GMDH neural networks

Even though the application of the GMDH approach to model structure selection can improve the quality of the model, the resulting structure is not the same as that of the system. It can be shown [35] that the application of the classical evaluation criteria such as the Akaike Information Criterion (AIC) and the Final Prediction Error (FPE) [12] can lead to the selection of inappropriate neurons and, consequently, to unnecessary structural errors.

Apart from the model structure selection stage, inaccuracy in parameter estimates also contributes to modelling uncertainty. Indeed, while applying the leastsquare method to parameter estimation of neurons, a set of restrictive assumptions has to be satisfied [35]. An effective remedy to such a challenging problem is to use the bounded error approach [34]. Let us consider the following system:

$$y_k = r_k^T \theta + \varepsilon_k \tag{5}$$

where r_k stands the regressor vector, $\theta \in R^{n_\theta}$ denotes the parameter vector, and εk represents the difference between the original system and the model.

The problem is to obtain the parameter estimate vector $\hat{\theta}$, as well as the associated parameter uncertainty required to design robust fault detection system. The knowledge regarding the set of admissible parameter values allows obtaining the confidence region of the model output which satisfies

$$\widetilde{y}_k^m \le y_k \le \widetilde{y}_k^M \tag{6}$$

where $\widetilde{y}_k^m$ and $\widetilde{y}_k^M$ are the minimum and maximum admissible values of the model output that are consistent with the input-output measurements of the system.

It is assumed that ε_k consists of a structural deterministic error caused by the model-reality mismatch, and the stochastic error caused by the measurement noise is bounded as follows:

$$\varepsilon_k^m \le \varepsilon_k \le \varepsilon_k^M \tag{7}$$

where the bounds ε_k^m and $\varepsilon_k^M \left(\varepsilon_k^m \ne \varepsilon_k^M\right)$ can be estimated [49].

The idea underlying the bounded-error approach is to obtain a feasible parameter set P [34] that is consistent with the input-output measurements used for parameter estimation. The resulting P is described by a polytope defined by a set of vertices V. Thus, the problem of determining the model output uncertainty can be solved as follows:

$$r_k^T \theta_k^m \le r_k^T \theta \le r_k^T \theta_k^M \tag{8}$$

were

$$\theta_k^m = \arg\min_{\theta \in V} r_k^T \theta, \qquad \theta_k^M = \arg\max_{\theta \in V} r_k^T \theta \tag{9}$$

As has been mentioned, the neurons in the l-th ($l > 1$) layer are fed with the outputs of the neurons from the ($l - 1$)-th layer. In order to modify the abovepresented approach for the uncertain regressor case, let us denote an unknown "true" value of the regressor $r_{n,k}$ by a difference between the measured value of the regressor r_k and the error in the regressor ε_k:

$$r_{n,k} = r_k - e_k \tag{10}$$

where it is assumed that the error e_k is bounded as:

$$e_{i,k}^m \le e_{i,k} \le e_{i,k}^M, \quad i = 1, \ldots, n_p \tag{11}$$

Using (5) and substituting (10) into (11), one can define the space containing the parameter estimates:

$$\varepsilon_k^m - e_k^T \theta \le y_k - r_k^T \theta \le \varepsilon_k^M - e_k^T \theta \tag{12}$$

which makes it possible to adapt the above-described technique to the error-in-regressor case [49].

The proposed modification of the BEA makes it possible to estimate the parameter vectors of the neurons from the l-th, $l > 1$ layers. Finally, it can be shown that the model output uncertainty has the following form:

$$\widetilde{y}_k^m \le r_n^T \theta \le \widetilde{y}_k^M \tag{13}$$

In order to adapt the presented approach to parameter estimation of non-linear neurons with an activation function $\xi(\cdot)$, it is necessary to transform the relation:

$$\varepsilon_k^m \le y_k - \xi r_k^T \theta \le \varepsilon_k^M \tag{14}$$

using $\xi^{-1}(\cdot)$, and hence:

$$\xi^{-1}\left(y_k - \varepsilon_k^M\right) \le r_k^T \theta \le \xi^{-1}\left(y_k - \varepsilon_k^m\right). \tag{15}$$

Knowing the model structure and possessing the knowledge regarding its uncertainty, it is possible to design a robust fault detection scheme with an adaptive threshold (Fig. 2).

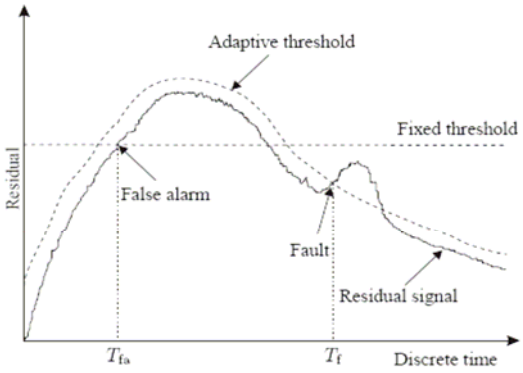


Fig. 2. Illustration of the concept of the adaptive threshold

The model output uncertainty interval, calculated with the application of the GMDH model, should contain the real system response in the fault-free mode. Therefore, the system output should satisfy:

$$\widetilde{y}_k^m + \varepsilon_k^m \le y_k \le \widetilde{y}_k^M + \varepsilon_k^M \tag{16}$$

This means that robust fault detection boils down to checking if the output of the systemsatisfies (16). Thus, when (16) is violated, then a fault symptom occurs.

5. NEURO-FUZZY NETWORKS IN FAULT DETECTION

The procedure of neuro-fuzzy network design consists of the structure selection stage and the parameter estimation stage [26, 44, 45]. The pessimistic scenario assumes the construction of the neuro-fuzzy network only on the basis of the available measurements. The main problem is to obtain the required accuracy and transparency of the rule base in such a situation. A lot of different methods have already been developed both for structure selection and parameter estimation of the neuro-fuzzy network, but there is a demand for better, more effective algorithms, and active research is still conducted in this area.

Takagi-Sugeno neuro-fuzzy networks can be viewed as multi-model systems which consist of some rules, and each rule defines a single model as the consequent of the rule [28, 29, 44]. The global neuro-fuzzy system is a set of N_r partial models, where N_r determines the number of fuzzy rules. The output of the global system is calculated as a mixture of partial model outputs. The rule fulfillment is determined by fuzzy sets. In order to ensure the desired accuracy of the neurofuzzy system, the membership functions of fuzzy sets must be placed properly in the input space, the number of rules must be appropriate and the parameters of partial models must be chosen to minimize the defined error.

5.1. Robust neuro-fuzzy networks

The application of neuro-fuzzy networks in diagnostic areas [3, 4] creates a demand for suitable design procedures which would take into account the

specificity of the fault diagnosis task. An important problem from the diagnostic point of view is residual confidence interval minimization because it makes it possible to detect a fault appropriately early. It has to be stressed that the value of the confidence interval for residuals depends directly on the uncertainty of the model which is used to generate the residuals. If the confidence interval is not consistent with model uncertainty, the fault detection system can trigger off a lot of false alarms. It is obvious in such a situation that model uncertainty has to be considered in fault detection threshold calculations [5, 47, 48]. It is also important to minimize model uncertainty in order to obtain a reliable fault detection system that would be able to detect a fault fast and at an early stage. So special procedures for neuro-fuzzy model design must be developed.

To overcome the problem, an alternative approach in the form of the BEA method [34] can be applied to tune the parameters of the Takagi-Sugeno neuro-fuzzy network and to calculate the admissible set of parameters and the confidence interval for the network output. The method requires only the information about the range of the disturbances which corrupt measurements. The application of the BEA algorithm for computing the confidence interval of the Takagi-Sugeno fuzzy model output requires to establish some assumptions in order to view the model in the form of an Linear in Parameter (LP) system [28, 29]. The main assumption based on the fact that the parameters of the membership functions of the fuzzy sets are known. Appropriate selection of the values of these parameters has an essential influence on the uncertainty of the whole fuzzy model. Wrong values of these parameters can significantly increase model uncertainty, thus the model can be unsuitable for diagnostic tasks. In order to present the BEA approach for estimating the parameters of the determining dynamic T-S network, let us consider the following model:

$$y_k = \sum_{i=1}^{n} \phi_{i,k}, y_{i,k} \tag{17}$$

where $y_{i,k}$ is the output od the *i*-th rule and

$$\phi_{i,k} = \frac{\mu_{i,k}}{\sum_{j=1}^{n} \mu_{j,k}}. \tag{18}$$

The model described by the equation (17) can be viewed in the form of an LP system:

$$y = x_k^T \theta \tag{19}$$

where

$$x_k = \begin{bmatrix} \phi_{1,k} z_1^k \\ \phi_{2,k} z_2^k \\ \vdots \\ \phi_{n,k} z_n^k \end{bmatrix}, \quad \theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix},$$

if the parameters of the fuzzy sets are treated like constant values. Here z_i^k denotes the input vector containing the delayed inputs u_i^k of the local models and the delayed output y_i^k of the local models, i.e., $z_i^k = \left[y_i^k, y_i^{k-1}, \ldots, y_i^{k-n_a}, y_i^{k-1}, y_i^{k-2}, y_i^{k-n_b},\right]$. The output error is given by the following formulae:

$$\varepsilon_k^m \le \varepsilon_k \le \varepsilon_k^M. \tag{21}$$

thus the admissible set of parameters for N data points is given by the following expression:

$$P = \left\{\theta \in R^n \middle| y_k' - \varepsilon^M \le x_k^T \theta \le y_k' - \varepsilon^m, k = 1, \ldots N\right\} \tag{22}$$

Each point inside the set P defines the vector of model parameters and all sets of parameters determine the group of models consistent with the measurements and bounds. This means that, instead of one model, a set of models with different parameters is given and the output signal is represented in the form of an interval which contains all possible model responses. Real applications usually require a single output value, thus one set of parameters must be chosen. The most common approach chooses the geometrical center of the area P as the set of parameters that is used to calculate the output of the model. This sample procedure is shown in Fig. 3. If the maximum and minimum values of the parameters are known:

$$\theta_i^m = \arg\min_{\theta \in P} \theta_i, \tag{23}$$

$$\theta_i^M = \arg\max_{\theta \in P} \theta_i, \tag{24}$$

the estimates of the parameters can be computed using the following formula:

$$\theta_i = \frac{\theta_i^m + \theta_i^M}{2}, \quad i = 1, \ldots, N \tag{25}$$

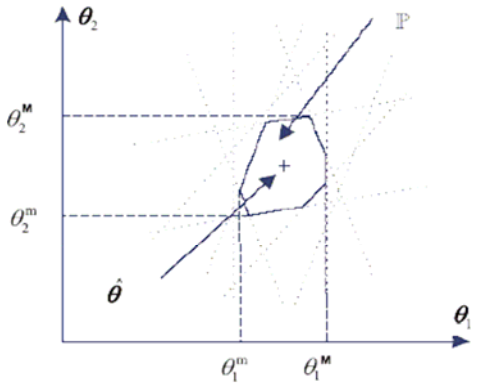


Fig. 3. Sample set of parameters P

The minimum and maximum values for the following parameters are determined using the linear programming technique [34]. The feasible set of parameters is used also to compute the confidence interval for the output of the system:

$$x_k^T \theta_k^m + \varepsilon^m \le y_k' \le x_k^T \theta_k^M + \varepsilon^M, \tag{26}$$

were

$$\theta_k^M = \arg\max_{\theta \in W} x_k^T \theta \tag{27}$$

$$\theta_k^m = \arg\min_{\theta \in W} x_k^T \theta \tag{28}$$

The confidence interval can be directly applied to calculate the adaptive threshold for the residual signal:

$$r_k = y_k^{'} - y_k \,. \tag{29}$$

Finally, the adaptive threshold is described by the following inequalities:

$$x_k^T \theta_k^m + \varepsilon^m - y_k \le e_{r,k} \le x_k^T \theta_k^M + \varepsilon_k^M - y_k \tag{30}$$

Unfortunately, the computations required to determine all verticesWof the convex polyhedron P are so time and memory consuming that it is hard to employ the classical BEA algorithm for complicated models. In this case the methods that approximate the actual set P by the area which has a simplified shape should be employed [34]. One of the proposed solution is the Outer Bounding Ellipsoid (OBE) method which has been applied to fault detection in a DC engine [29].

6. NEURO-FUZZY-BASED FAULT DETECTION OF AN INTELLIGENT ACTUATOR

The scheme of the actuator with an intelligent positioner is given in Fig. 4. Such actuator has been investigated by international research group during the realization of the so-called DAMADICS [6] project. In the Fig. 6 the following notations are used: V_1, V_2 and V_3 are cut-off valves, *ACQ* is a data acquisition unit, *CPU* is a positioner central processing unit, *E/P* is an electro-pneumatic transducer, and *DT*, *PT* and *FT* denote displacement, pressure and volume flow tranducers, respectively. For remote on-line diagnostics, the following measured variables are accessible: the flow rate of juice after the control valve (F), the actuator's rod displacement (X), the input setpoint (C_V), juice temperature at the input of the control valve (T_1), and juice pressures at the input and outlet of the control valve, respectively (P_1 and P_2).

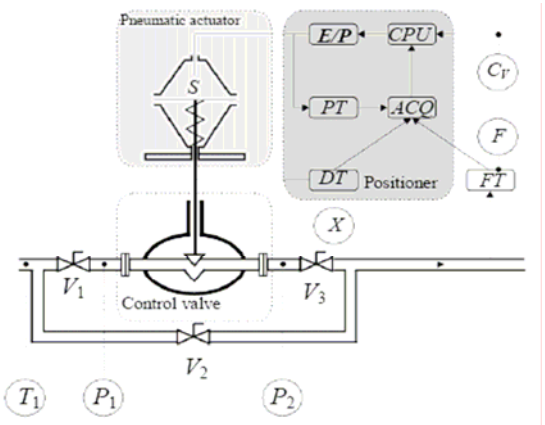


Fig. 4. Scheme of the intelligent actuator

Applying the method for structure generation of NF models [28, 29] and the results presented in Subsection 4.1, two NF models can be defined. The obtained structures are described in Table 1.

Table 1. Neuro-fuzzy models

quantity	f_F	f_X
global inputs	X	C_V
local inputs	X, P_1, P_2, T_1	C_V , P_1, P_2, T_1
no. of rules	7	3

The parametres of fuzzy sets were estimated from the results obtained during structure generation and the parameters of the consequents were estimated using the OBE algorithm.

The first step of the experimental study was to present the modelling abilities of the obtained NF models and, additionaly, their system output uncertainty. Figure 5 presents the modelling abilities of the obtained model along with corresponding system output bounds. At the time $T_f = 250$ the big fault (the valve was blocked) occured.

From Fig. 6, which shows the residual and its bounds given by the adaptive threshold, follows that this fault is detected very fast, with a small delay, approximately 5 units.

The developed fault detection scheme with NF models using the available data containing 44 faulty scenarios generated by the actuar simulator [6] was tested as well.

Table 2. Fault detection results
(S-small, M-medium, B-big, I-incipient)

No.	Description	S	M	B	I
	Control valve faults				
f_1	Valve clogging	Y	Y	Y	
f_2	Sedimentation			Y	Y
f_3	Seat erosion				Y
f_4	Bushing frictions				Y
f_5	External leakage				N
f_6	Internal leakage				Y
f_7	Medium evaporation	Y	Y	Y	
	Servo-motor faults				
f_8	Twisted piston rod	N	N	Y	
f_9	Housing				N
f_{10}	Diaphragm perforation	Y	Y	Y	
f_{11}	Spring fault			Y	Y
	Positioner faults				
f_{12}	E/P transducer fault	N	N	N	
f_{13}	Rod displ. sensor fault	Y	Y	Y	Y
f_{14}	Pressure sensor fault	N	N	N	
f_{15}	Feedback fault			Y	
	External faults				
f_{12}	Pressure drop	Y	Y	Y	
f_{13}	Unexpected pressure change			Y	Y
f_{14}	Opened bypass valves	Y	Y	Y	Y
f_{15}	Flow rate sensor fault F	Y	Y	Y	

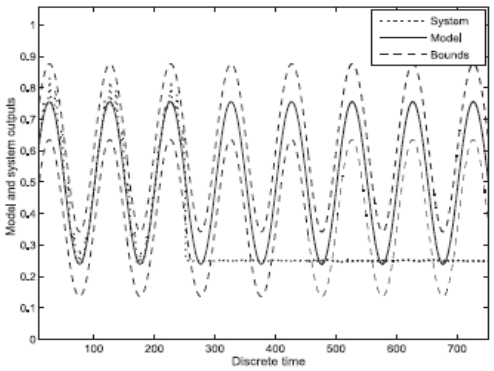


Fig. 5. Model and system output with system output bounds (big fault)

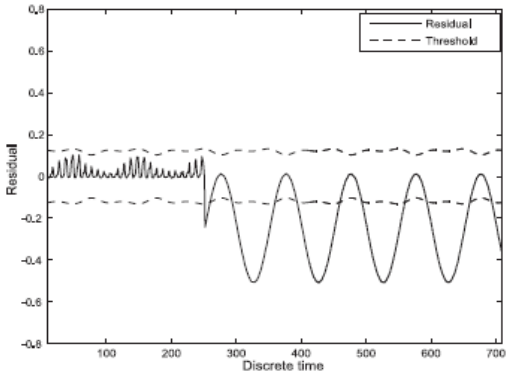


Fig. 6. Residual and adaptive threshold (big fault)

The fault detection results obtained for all scenarios are shown in Table 2, where the following notations are introduced: Y indicates the fault detected using the designed NF models, N indicates the fault that was not detected by the designed NF models.

From Table 2 it follows that most faults can be detected, however, there are a few faults that cannot. The reason for such a situation was that the system output bounds obtained by the OBE algorithm were too large and hence sensitivity to faults was not high enough. This means that it is necessary to employ a more accurate technique than the OBE algorithm.

7. CONCLUSIONS

From the view point of engineering, it is clear that providing fast and reliable fault detection and isolation is an integral part of control design, particularly as far as the control of complex industrial systems is considered. The main objective of this paper was to consider a robust model-based fault detection system applying soft computing models. Special attention was paid to the uncertainty of such models and their usefulness in fault diagnosis. In particular, uncertainties of GMDH neural networks and Takagi-Sugeno NF networks were considered. The proposed approach was based on the bounded-error approach, which is superior to the celebrated least-square method in many practical applications. It was shown that the defined confidence interval for the system output of the GMDH and T-S networks can be used to develop an adaptive threshold that permits robust fault detection. In the last part, an experimental study performed with the DAMADICS benchmark problem showed the effectiveness of such robust fault detection based on the uncertainty of neuro-fuzzy models.

LITERATURA

1. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J. and Staroswiecki M. (2003): *Diagnosis and Fault-Tolerant Control.* New York: Springer-Verlag.
2. Boutayeb M. and Aubry D. (1999): *A strong tracking extended Kalman observer for nonlinear discrete-time systems*. IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 44, No. 8, pp. 1550–1556.
3. Calado J. M. F, Korbicz J., Patan K., Patton R. J. and Sa da Costa J. M. G (2001): *Soft computing approaches to fault diagnosis for dynamic systems*. European Journal of Control, Vol. 7, No. 2-3, pp. 248–286.
4. Calado J. M. F., Sa da Costa J. M. G., Bartys M. and Korbicz J. (2006): *FDI approach to the DAMADICS benchmark problem based on qualitative reasoning coupled with fuzzy neural networks*. Control Engineering Practice, Vol. 14, No. 6, pp. 685–698.
5. Chen J. and Patton R. J. (1999): *Robust Model Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems.* London: Kluwer Academic Publishers.
6. DAMADICS (2002): *Website of the RTN DAMADICS: Development and Application of Methods for Actutator Diagnosis in Industrial Control Systems* http://diag.mchtr.pw.edu.pl/damadics
7. Frank P. M., Schreier G. and Garcia E. A. (1999): *Nonlinear observers for fault detection and isolation*, In: New Directions in Nonlinear Observer Design (Nijmeijer H. and T. Fossen, Eds.) Berlin: Springer-Verlag.
8. Gupta M. M., Jin L. and Homma N. (2003): *Static and Dynamic Neural Networks. From Fundamentals to Advanced Theory.* New Jersey: Wiley.
9. Haykin S. (1999): *Neural Networks. A omprehensive Foundation*. New Jersey: Prentice-Hall.
10. Hui S. and ˙Zak S. H. (2005): *Observer design for systems with unknown input*. Int. J. Appl. Math. and Comput. Sci., Vol. 15, No. 4, pp. 431–446.
11. Isermann R. (2006): *Fault Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. New York: Springer-Verlag.
12. Ivakhnenko A. G. and Mueller J. A. (1995): *Selforganizing of nets of active neurons*. System Analysis Modelling Simulation, Vol. 20, pp. 93–106.

13. Janczak A. (2005): *Identification of Nonlinear Systems Using Neural Networks and Polynomial Models. A Block-oriented Approach*. Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 310, Berlin: Springer-Verlag.
14. Koivo H. M. (1994): *Artificial neural networks in fault diagnosis and control*. Control Engineering Practice, Vol. 2, No. 7, pp. 90-101.
15. Korbicz J. (2006): *Fault detection using analytical and soft computing methods*. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, Vol. 54, No. 1, pp. 75–88.
16. Korbicz J. (Ed.) (2006): *Soft Computing in Control and Fault Diagnosis*. Special section in Int. J. Appl. Math. and Comput. Sci., Vol. 16, No. 1, pp. 7–114.
17. Korbicz J. and Bidyuk P. I. (1993): *State and Parameter Estimation. Digital and Optimal Filtering, Applications.* Technical University of Zielona Góra Press.
18. Korbicz J., Kościelny J. M., Kowalczuk Z. and Cholewa W. (Eds.) (2004): *Fault Diagnosis. Models, Artificial Intelligence, Applications*. Berlin: Springer-Verlag.
19. Korbicz J., Kościelny J. M., Kowalczuk Z. and Cholewa W. (Eds.) (2002): *Diagnostyka procesów. Modele, Metody sztucznej inteligencji, Zastosowania*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo Techniczne, WNT, (in Polish).
20. Korbicz J., Kowal M. (2007): *Neuro-fuzzy networks and their application to fault detection of dynamical systems*. Engng. Appl. of Artif. Intelligence, Vol. 20, pp. 609–617.
21. Korbicz J. and Mrugalski M. (2008): *Confidence estimation of GMDH neural networks and its application in fault detection systems*. Int. J. System Science, (accepted).
22. Korbicz J., Patan K. and Kowal M. (Eds.) (2007): *Diagnostics of Processes and Systems*.Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, (in Polish).
23. Korbicz J., Patan K and Kowal M. (Eds.) (2007): *Fault Diagnosis and Fault Tolerant control*. Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT.
24. Korbicz J., Patan K. and Obuchowicz A. (2001): *Neural network fault detection system for dynamic processes*. Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences., Vol. 49, No. 2, pp. 301–321.
25. Korbicz J., Obuchowicz A. and Uciński D. (1994): *Artificial Neural Networks. Fundations and Applications*. Warsaw: Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, (in Polish).
26. Korbicz J. and Kowal M. (2007): *Neuro-fuzzy networks and their application to fault detection of dynamical systems*. Engng. Appl. Artif. Intelligence, Vol. 20, pp. 609-617.
27. Kościelny J. M. (2001): *Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych*. Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, (in Polish).
28. Kowal M. (2005): *Optimization of Neuro-Fuzzy Structures in Technical Diagnostics*. Lecture Notes in Control and Computer Science, Vol. 9, University of Zielona Góra Press.
29. Kowal M. and Korbicz J. (2006): *Robust fault detection using neuro-fuzzy models.* Przegląd Elektrotechniczny, No. 1, pp. 32–36.
30. Koza J. R. (1992): *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection.* Cambridge: The MIT Press.
31. Köppen-Seliger B. and Frank P. M. (1999): *Fuzzy logic and neural networks in fault detection*. In: Fusion of Neural Networks, Fuzzy Sets, and Genetic Algorithms (L. Jain and N. Martin, Eds.). New York: CRC Press, pp. 169–209.
32. Ligeza A., Fuster-Parra P. (1997): *And/or/not causal graph – a model for diagnostic reasoning*. Appl. Math. and Comput. Sci., Vol. 7, No. 1, pp. 183–203.
33. Michalewicz Z. (1996): *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs.* Berlin: Springer-Verlag.
34. Milanese M., Norton J., Piet-Lahanier H. and Walter E. (1996): *Bounding Approaches to System Identification.* New York: Plenum Press.
35. MrugalskiM. (2003): *Neural Network Based Modelling of Nonlinear Systems in Fault Detection Schemes.* Ph.D. thesis, University of Zielona Góra, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Telecommunications, (in Polish).
36. Mrugalski M. and Korbicz J. (2005): *Robust fault detection via GMDH neural networks*. Proc. 16-th IFAC World Congress, Prague, Czech Republic, CD-ROM.
37. Obuchowicz A. (2003): *Evolutionary Algorithms for Global Optimization and Dynamic System Diagnosis.* Zielona Góra: Lubuskie Towarzystwo Naukowe.
38. Osowski S. (2006): *Artificial Neural Networks for Information Processing*. Warsaw: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, (in Polish).
39. Patan K. (2007): *Stability analysis and the stabilization of a class of discrete-time dynamic neural networks*. IEEE Trans. Neural Networks, Vol. 18, No. 3, pp. 660-673.
40. Patton R. J., Frank P. M. and Clark R. N. (2000): *Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems.* Berlin: Springer-Verlag.
41. Patton R. J. and Korbicz J. (Eds.) (1999): *Advances in Computational Intelligence for Fault Diagnosis Systems*. Int. J. Appl. Math. and Comput. Sci., Special Issue, Vol. 9, No. 3, pp. 471–735.
42. Patton R. J., Korbicz J. and Lesecq S. (Eds.) (2006): *A Benchmark Study of Fault Diagnosis for an Industrial Actuator*. Control Engineering

Practice, Special Issue, Vol. 14, No. 6, pp. 575–717.
43. Patton R. J., Korbicz J., Witczak M. and Uppal F. (2005): *Combined computational intelligence and analytical methods in fault diagnosis*. In: Intelligent Control Systems using Computational Intelligence Techniques (Rauno A. E. (Ed.). London: The IEE Press, pp. 349–392.
44. Piegat A. (2003): *Modelling and Fuzzy Systems.* Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, (in Polish).
45. Rutkowska D. (2002): *Neuro-Fuzzy Architectures and Hybrid Learning.* Heidelberg, New York: Physica-Verlag, Springer-Verlag Company.
46. Walter E. and Pronzato L. (1997): *Identification of Parametric Models from Experimental Data*. London: Springer.
47. Witczak M. (2007): *Modelling and Estimation Strategies for Fault Diagnosis of Non-linear Systems*. Lecture Notes in Control and Information Sciences, No. 354, Berlin, Heidelberg: Springer.
48. Witczak M. (2006): *Advances in model-based fault diagnosis with evolutionary algorithms and neural networks*. Int. J. Appl. Math. and Comput. Sci., Vol. 16, No. 1, pp. 85–99.
49. Witczak M., Korbicz J., Mrugalski M. and Patton R. J. (2006): *A GMDH neural network-based approach to robust fault diagnosis: application to the DAMADICS benchmark problem*. Control Engineering Practice, Vol. 14, No. 6, pp. 671–683.
50. Witczak M., Obuchowicz A. and Korbicz J. (2002): *Genetic programming based approaches to identification and fault diagnosis of non-linear dynamic systems*. Int. J. Control, Vol. 75, No. 13, pp. 1012–1031.
51. Zhang Y. (2007): *Active fault-tolerant control systems: integration of fault diagnosis and reconfigurable control*, In: Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control. (Korbicz J., Patan K. and Kowal M., Eds.), Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, pp. 21–41.

CRACK DETECTION IN BEAM LIKE STRUCTURES PART I. IDENTIFICATION OF CRACK LOCATION

Leszek MAJKUT

Katedra Mechaniki i Wibroakustyki, AGH Kraków
majkut@agh.edu.pl

Summary

This paper deals with detection of a transverse crack location in beam like structure. An input quantity for detection a natural mode of vibrations was chosen. The crack is substituted by rotational spring, which flexibility is calculated by using Castigliano theorem and laws of the fracture mechanics. Based on this model of crack the first natural mode of Bernoulli-Euler beam was determined then analysed.

The modal assurance criterion (MAC coefficients) were determined as a function of crack depth and location. These quantities can be used for crack detection in beam like structures. In order to crack location the discrete and continuous wavelet analysis of mode shapes was used.

Keywords: crack detection, eigenvectors, wavelet transform.

DETEKCJA PĘKNIĘCIA W ELEMENTACH BELKOWYCH
CZĘŚĆ I. IDENTYFIKACJA MIEJSCA PĘKNIĘCIA

Streszczenie

W pracy opisano pewien sposób detekcji pęknięcia oraz identyfikacji jego lokalizacji. Jako wielkości wejściowe procesu identyfikacji wybrano wektory własne belki z pęknięciem. Jako model pęknięcia przyjęto przegub sprężysty, którego podatność wyznaczono na podstawie praw mechaniki pękania i twierdzenia Castigliano. Wykorzystując taki opis pęknięcia wyznaczono wektory własne pękniętej belki opisanej modelem Bernoulliego-Eulera.

Wyznaczono współczynniki MAC (modal assurance criterion) w funkcji głębokości i miejsca pęknięcia. Wielkości te pozwalają jedynie na detekcję pęknięcia. W celu wyznaczenia lokalizacji uszkodzenia wykorzystano dyskretną i ciągłą analizę falkową wektorów własnych.

Słowa kluczowe: detekcja pęknięcia, transformata falkowa, wektory własne.

1. INTRODUCTION

Structural elements and systems are very frequently subject to loads changing in time. Changing mechanical or kinematic loads induce stresses changing in time, producing complex coincidence of effects and fatigue changes in the material, dependent on the volume of stresses and number of their cycles. Fatigue changes are visualized by crack of the structural material and with continued use lead to element damaging. Therefore a question about crack existence becomes essential with respect to the design safety. This quantity enables to evaluate the suitability of the construction for further operation.

A crack diagnostic system can have four levels [1]:

- level 1: the presence of crack,
- level 2: the geometric location of crack,
- level 3: the quantification of the crack depth,
- level 4: the prediction of the remaining service live of the structure

Diagnostic on level 1 can be carried out by for example analysis of natural frequency changes [2, 3] or forced vibrations amplitudes [2, 4].

This paper deals with detection (level 1) and the location (level 2) a transverse crack in beam like structure. An input quantity for detection a natural mode of vibrations was chosen. The crack is substituted by rotational spring, which flexibility is calculated by using Castigliano theorem and laws of the fracture mechanics. Based on this model of crack the first natural mode of Bernoulli – Euler beam model was determined then analysed. In description of bending vibrations the generalized functions was used.

For detection of crack (level 1) the modal assurance criterion (MAC coefficients) were determined as a function of crack depth and location.

In order to determine the crack location the discrete and continuous wavelet analysis of mode shapes was used.

2. CRACK MODEL

In order to estimate the effect of crack on beam vibration it has been simulated as a rotational spring. The spring flexibility c_g binds bending moment in the cross-section with a coordinate $x = x_p$ and angles of rotation (angular displacement) from the right and left side of the cross-section, in which the crack exists, i.e.:

$$y'(x_p^+) - y'(x_p^-) = c_g \cdot EI \cdot y''(x_p^-) \tag{1}$$

The equation binding the spring flexibility and crack depth based on fracture mechanic will be shown in the next section of the article.

2.1. Flexibility at the cracked place

The fracture mechanics studies allow to find relations between global quantity G – Energy Release Rate determining the increase in elastic strain energy for infinitesimal crack surface increase [6]:

$$G = \frac{\partial U}{\partial A_p}$$

and local quantity K – Stress Intensity Factor (SIF), which is function of crack depth a:

$$G = \frac{1-\nu^2}{E} \cdot K_I{}^2 \tag{2}$$

where: G - energy release rate represents the elastic energy per unit crack surface area, A_p – area of crack, ν - Poisson ratio, E - Young modulus.

After simple transformation the elastic strain energy due to the crack has form:

$$U = \int_{A_p} G \, dA_p \tag{3}$$

SIF can be expressed as follows:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot F_I\left(\frac{a}{h}\right)$$

where: dA_p - elementary crack area, a – depth of crack, σ - normal stress, F_I - correction function also called "shape functions".

Relation between the function F_I and crack depth for different geometries elements with crack and different ways of loading can be found in catalogues e.g. [5] and for pure bending it takes the following form:

$$F_I\left(\frac{a}{h}\right) = 1.122 - 1.40\left(\frac{a}{h}\right) + 7.33\left(\frac{a}{h}\right)^2 + \\ -13.08\left(\frac{a}{h}\right)^3 + 14.0\left(\frac{a}{h}\right)^4$$

The section with the crack shall be replaced with a flexible joint (rotational spring) having the same potential energy (3).

In order to determine the flexibility c_g of such joint, the Castigliano's theorem shall be used, and after simple transformations we obtain the equation, which binds spring flexibility and increase in potential energy of deformation U:

$$c_g = \frac{\partial^2 U}{\partial M_g^2(x_p)}$$

The flexibility of the elastic element modelling of the cracked cross-section will be used to find the natural frequencies and modes of beam bending vibration.

3. FLEXURAL VIBRATION OF THE CRACKED BEAM

The equation of the natural vibration of the beam with crack in co-ordinate $x=x_p$ has form:

$$X^{(4)} - \lambda^4 X = c_g \cdot EI \cdot X''(x_p) \cdot \delta''(x_p) \tag{4}$$

The solution of the equation (4) can be found in class of generalized function. The following function is a solution of equation (4):

$$X(x) = P\cosh\lambda x + Q\sinh\lambda x + R\cos\lambda x + \\ + S\sin\lambda x + \frac{c_g}{2\lambda} \cdot EI \cdot X''(x_p) \cdot \\ \cdot [\sinh\lambda(x - x_p) + \sin\lambda(x - x_p)] \cdot H(x, x_p) \tag{5}$$

where: $\delta(x, x_p)$ - Dirac delta function at $x = x_p$, $H(x, x_p)$ - Heaviside step function at $x = x_p$, $\lambda = \omega^2 \rho A / EI$, ρ - beam material density, A – cross-sectional area.

Integration constants P, Q, R, S depends on the beam boundary conditions.

For beam showed on fig.1 the boundary conditions are described by equations $X(0) = 0$, $X'(0) = 0$, $X''(l) = 0$, $X'''(l) = 0$.

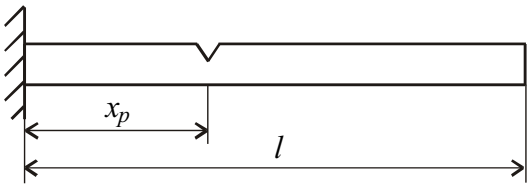


Fig. 1. Cantilever cracked beam

Four equations, which describes boundary conditions can be described in matrix form. This homogeneous set of equations has non trivial solution only in case in which the determinant of the main matrix is equal zero. From this condition the natural frequencies are determined.

For such value of frequency described above homogeneous set of equations have infinitely many solutions dependent on one of the constants. Without loss of generality one can assume that $P = 1$. Determined in such way integral constants P, Q, R, S introduced to equation (5) described the model vector of the beam with a crack.

On fig. 2 the first eigenvector is showed, but here each amplitudes was normalized to 1.

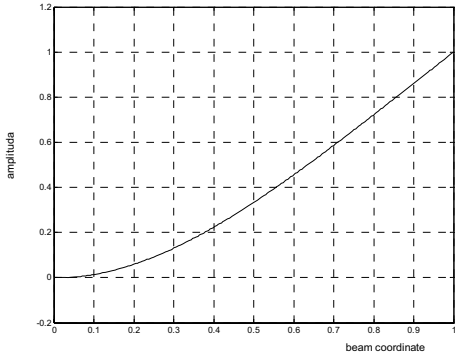


Fig. 2. First natural eigenvector

4. CRACK DETECTION – MAC COEFFICIENT

The first used criterion of crack detection is analysing the correlation between the cracked and not-cracked beam eigenvectors by visual comparison of amplitude vectors. Very commonly a diagram in the Cartesian coordinate system is created, where amplitudes obtained from cracked beam model are placed on x axis, and the same amplitudes from not-cracked beam model are placed on y axis. If the models are coincident the corresponding points should be located on the straight line inclined at an angle of 45°. Mathematical notation of this type of comparison (described and used in modal analysis for finding the correlation between the eigenvectors) is done using *MAC* (Modal Assurance Criterion) coefficient [7]:

$$MAC(\mathbf{X},\mathbf{Y}) = \frac{\left|\mathbf{X}^{*T}\mathbf{Y}\right|^2}{\left(\mathbf{Y}^{*T}\mathbf{Y}\right)\cdot\left(\mathbf{X}^{*T}\mathbf{X}\right)} \tag{6}$$

where: X^*, X and Y^*, Y are two eigenvectors obtained from the cracked and not-cracked beam model.

Table 1 summarizes the *MAC* coefficients computed by comparison the first natural vibration modes, obtained for different crack depth (a) and location (x_p).

Table 1 *MAC* coefficients

x_p/l a/h	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
0.1	1	1	1	1	1
0.2	1	1	1	1	1
0.3	0.9999	1	1	1	1
0.4	0.9998	0.9999	0.9999	1	1
0.5	0.9995	0.9998	0.9998	1	1

As one can see the changes in *MAC* coefficients can be treated as a symptom of a crack in beam, but its sensitivity is to little even for vectors determined without any errors.

5. DETECTION OF CRACK LOCALIZATION – DISCRETE VAWELET TRANSFORM

The wavelet transform is an excellent tool for discontinuity detection in signal but also in its derivates.

This property of the transformation allow to detect a crack (in signal of the amplitudes of modal vector), because the crack cause discontinuity in first derivate of the vibration amplitude – see eq. (1).

In fig. 1 the variation of the detail d_1 is showed.

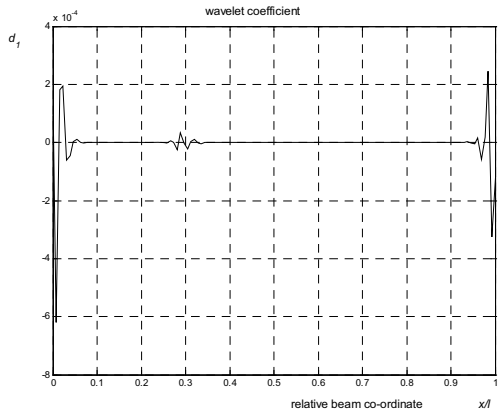


Fig. 3. Detail d_1 of the cracked beam modal vector

As one can see in variation of the detail d_1 occurred near the coordinate x/l = 0.3, where the crack was simulated and also near the both ends of the beam. These variations near the beam ends arise from the problem that the beam and with it the analysed signal ends. These variations are much stronger than the variation associated with the crack.

Because of this a some procedure which allow to avoid the variations of the detail d_1 near the beam ends is proposed.

Proposed procedure refer to solution assumed in Finite Element Method analysis of a beam vibration. In FEM the solution "over" an element as a polynomial of the 3-rd order is assumed.

Likewise in case of the FEM the polynomial coefficients "over" the first end last element of the beam are determined. Then with these polynomials the signal was expanded beyond the beam ends.

The variation of the detail d_1 extrapolated in such way modal vector in fig. 2 is showed.

In order to improve the resolution, it means to increase the amount of samples, the described above procedure can be used, but in this case the polynomial coefficients "over" every element have to be found. Having known these coefficients which described the vibration amplitudes between every two samples, it is possible to interpolate solution inside such sector and determination the vibration amplitudes for additional coordinates.

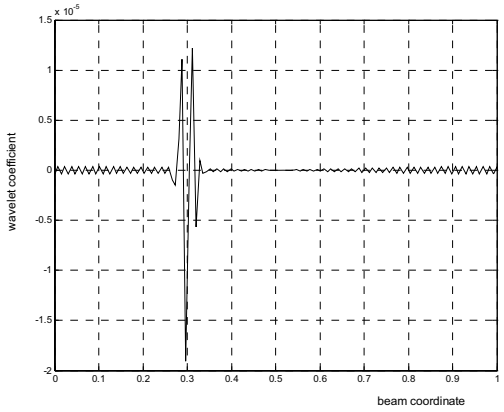


Fig. 4. Detail d_1 extrapolated model vector of the cracked beam

6. DETECTION OF CRACK LOCALIZATION – CONTINUOUS VAWELET TRANSFORM

The continuous wavelet transform to analysis the amplitudes of modal vector signal is utilised after described above procedure of extrapolation. In such way the vector with many samples and extended beyond the beam ends is obtained.

In fig. 3 the typical example of the continuous wavelet transform modulus is showed.

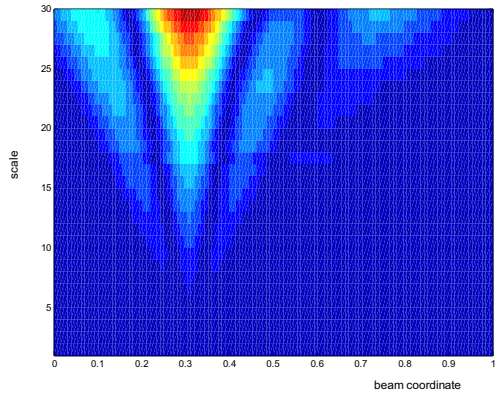


Fig. 5. Continuous wavelet transform of the modal vector

In fig. 4 the wavelet transform modulus for scale s = 30 is shown.

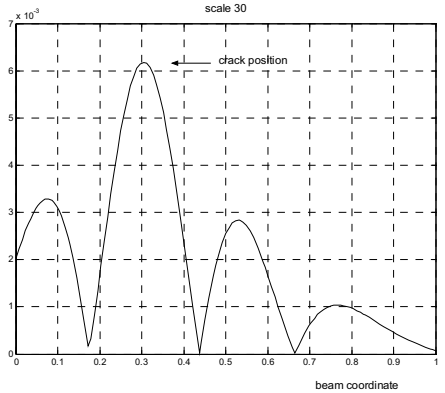


Fig. 6. The wavelet transform modulus for scale s = 30.

In case of the continuous wavelet transform the crack location is indicated by the linear changing of the transform modulus.

7. SUMMARY

In part 1 of this work some methods for detection of the transverse crack location in beam like structure are described. These methods are based on discrete and continuous wavelet transform of a modal vector

Some method of crack depth determination (3-rd level of crack diagnostics) is described in second part of article: Crack detection in beam like structures. Part II. Quantification of crack depth

This work was done as a part of research project N 504 042 32/3443

LITERATURA

[1] Adams D.: *Health monitoring of structural materials and components: methods with applications*, Willey 2007
[2] Majkut L.: *Wibroakustyczne symptomy pęknięcia belki*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, 40 z. 4, str. 165-181
[3] Majkut L.: *Identyfikacja pęknięcia w belkach na podstawie pomiaru częstości własnych.* Kwartalnik AGH Mechanika 24 (2005), str. 21-28
[4] Majkut L.: *Identyfikacja pęknięcia w belkach na podstawie pomiarów amplitud drgań wymuszonych*. Kwartalnik AGH Mechanika 24 (2005), str. 199-204
[5] Murakami Y.: *Stress Intensity Factors Handbook*, Pergamon Press Oxford, 1987
[6] Neimitz A.: Mechanika pękania, Warszawa PWN 1998
[7] Uhl, T.: K*omputerowo wspomagana identyfikacja modeli konstrukcji mechanicznych*, Warszawa, WNT 1997

dr inż. **Leszek MAJKUT** (ur. 1970), absolwent Wydziału Elektroniki, Automatyki, Informatyki i Elektrotechniki AGH (1995). Pracę doktorską dotyczącą wpływu lokalnej zmiany sztywności na amplitudę drgań i widmo częstości obronił w 1999 na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. Obecnie prace badawcze dotyczące diagnostyki wibroakustycznej, problemów związanych z odwracaniem modeli diagnostycznych oraz szeroko pojętej teorii drgań (drgania, wibroizolacja, hałas), ze szczególnym uwzględnieniem układów ciągłych i dyskretno-ciągłych prowadzi w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki AGH.

CRACK DETECTION IN BEAM LIKE STRUCTURES PART II. QUANTIFICATION OF CRACK DEPTH

Leszek MAJKUT

Katedra Mechaniki i Wibroakustyki, AGH Kraków
majkut@agh.edu.pl

Summary

In the first part of this work the some methods of the location of a transverse crack in beam like structure based on wavelet analysis of mode shape is described. In this part of work this quantity was used for identification of crack depth. An input quantity for identification the frequency response function FRF was chosen. The crack is substituted by rotational spring, which flexibility c_g is calculated by using Castigliano theorem and laws of the fracture mechanics. Based on inverse model of forced vibration cracked beam the depth of crack was identified.

Keywords: crack identification, forced vibration.

DETEKCJA PĘKNIĘCIA W ELEMENTACH BELKOWYCH
CZĘŚĆ II. IDENTYFIKACJA GŁĘBOKOŚCI PĘKNIĘCIA

Streszczenie

W pierwszej części pracy opisano metodę wyznaczenia lokalizacji pęknięcia w oparciu o ciągłą i dyskretną transformatę falkową zastosowaną do analizy wektorów własnych. W tej części pracy wykorzystano tę wielkość do identyfikacji głębokości pęknięcia. Jako wielkość wejściową procesu identyfikacji wykorzystano charakterystykę amplitudowo – częstotliwościową. Jako model pęknięcia przyjęto przegub sprężysty, którego podatność wyznaczono na podstawie praw mechaniki pękania i twierdzenia Castigliano. Wykorzystując taki opis pęknięcia wyznaczono model odwroty drgań wymuszonych belki, z którego wyznaczono głębokość pęknięcia

Słowa kluczowe: identyfikacja pęknięcia, drgania wymuszone.

1. INTRODUCTION

The detection of damages in structural elements determines the serious challenge for present technique. The used at present non-destructive procedures of diagnosis the damages, it means the method: visual observations, ultrasonic, radiographical, or magnetical analysis, possess the many essential limitations. The most often to effective their utilization, it is necessary to carry out many of additional actions connected with correctness of diagnosis process, as well as the a priori knowledge about the place of potential damage. From here using these methods in places with difficult access, and on early stage of damage evolution is limited and burdened with large uncertainty.

Mentioned above conditions required research on finding the new methods of damage detection, the global one, which based on changes of dynamic response of constructions, would permit to estimate degree of damage.

A crack diagnostic system can have four levels [1]:

- level 1: the presence of crack,
- level 2: the geometric location of crack,
- level 3: the quantification of the crack depth,
- level 4: the prediction of the remaining service live of the structure.

In part 1 of this work some methods for detection of the transverse crack location in beam like structure are described. These methods are based on discrete and continuous wavelet transform of a modal vector.

In this part of work this quantity was used for identification of crack depth (3-rd level of crack diagnostics). An input quantity for identification the frequency response function FRF was chosen. The crack is substituted by rotational spring, which flexibility c_g is calculated by using Castigliano theorem and laws of the fracture mechanics. Based on inverse model of forced vibration of cracked beam the depth of crack was identified.

2. FORCED VIBRATION OF THE CRACKED BEAM

The equation of the harmonic forced vibration of the beam with crack in co-ordinate $x=x_p$ has form:

$$X^{(4)} - \lambda^4 X = c_g \cdot X''(x_p) \cdot \delta''(x, x_p) + - F \cdot \delta(x, x_f) \tag{1}$$

The solution of the equation (1) can be found in class of generalized function. The function given by (2) is a solution of equation (1):

$$X(x) = X_0(x) + \frac{c_g}{2\lambda} X''(x_p) \cdot \cdot[\sinh \lambda(x - x_p) + \sin \lambda(x - x_p)]H(x, x_p) + - \frac{F}{2 \cdot EI \cdot \lambda^3} \cdot \cdot[\sinh \lambda(x - x_f) + \sin \lambda(x - x_f)]H(x, x_f) \quad (2)$$

where:
$X_0 = P\cosh \lambda x + Q\sinh \lambda x + R\cos \lambda x + S\sin \lambda x$,
$\delta(x, x_p)$ - Dirac delta function at $x = x_p$, $H(x, x_p)$ - Heaviside step function at $x = x_p$, $\lambda = \omega^2 \rho A / EI$, ρ - beam material density, A – cross-sectional area.

Amplitude of forced vibrations In measured point with coordinate $x = c$ has form:

$$X(c) = X_0(c) + \frac{c_g}{2 \cdot \lambda} \cdot \cdot[\sinh \lambda(c - x_p) + \sin \lambda(c - x_p)]H(c, x_p) + - \frac{F}{2 \cdot EI \cdot \lambda^3} \cdot \cdot[\sinh \lambda(c - x_f) - \sin \lambda(c - x_f)]H(c, x_f) \quad (3)$$

where:
$X_0(c) = P\cosh \lambda c + Q\sinh \lambda c + R\cos \lambda c + S\sin \lambda c$.

Integration constants *P, Q, R, S* depends on the beam boundary conditions.

The course of action at the identification of crack depth for which an input quantity is the amplitude of forced vibrations is shown on the cantilever beam example.

2.1. Cantilever beam

Analysed beam model in fig. 1 is showed

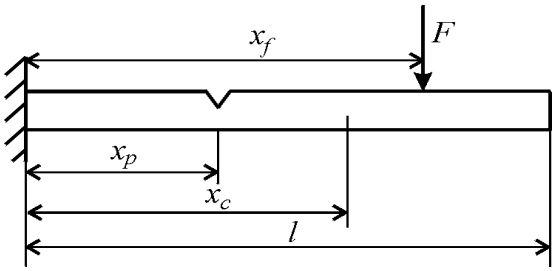


Fig. 1. Cantilever beam with crack

For beam showed on fig. 1 the boundary conditions are described by equations $X(0) = 0$, $X'(0) = 0$, $X''(l) = 0$, $X'''(l) = 0$.

The boundary conditions equation for beam can be written in matrix form:

$$\mathbf{M} \cdot \mathbf{CS} = \mathbf{W} \quad (4)$$

where matrix M:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ \cosh \lambda l & \sinh \lambda l & -\cos \lambda l & -\sin \lambda l & a_{35} \\ \sinh \lambda l & \cosh \lambda l & \sin \lambda l & -\cos \lambda l & a_{45} \\ \mathrm{ch}\lambda x_p & \mathrm{sh}\lambda x_p & \cos \lambda x_p & \sin \lambda x_p & -1 \end{bmatrix}$$

where:

$$a_{35} = \frac{c_g}{2\lambda} \cdot \left[\sinh \lambda(l - x_p) - \sin \lambda(l - x_p)\right]$$

$$a_{45} = \frac{c_g}{2\lambda} \cdot \left[\cosh \lambda(l - x_p) - \cos \lambda(l - x_p)\right]$$

vector of constants CS:

$$\mathbf{CS}^T = \left[P \quad Q \quad R \quad S \quad X''(x_p)\right]^T$$

and vectors of W:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{F}{2 \cdot EI \cdot \lambda^3} \cdot \left[\sinh \lambda(l - x_f) - \sin \lambda(l - x_f)\right] \\ \frac{F}{2 \cdot EI \cdot \lambda^3} \cdot \left[\cosh \lambda(l - x_f) - \cos \lambda(l - x_f)\right] \\ \frac{F}{2EI\lambda^3}\left[\sinh \lambda(x_p - x_f) + \sin \lambda(x_p - x_f)\right]H(x_p, x_f) \end{bmatrix}$$

If excitation frequency is different from any natural beam frequency the Cramer's rule can be used for solving of equation (4).

For solution the identification problem, some procedure will be proposed.

3. INVERSE MODEL OF CRACKED BEAM

For solution the identification problem will be proposed following methodology, which permits to create of computer algorithm:

1. in main matrix M one should replace value c_g with 1 (one) – this matrix is named A;
2. one should construct matrix named B, from matrix A by eliminate last row and last columns;
3. at such denotation main matrix determinant can be written as:
$$|\mathbf{M}| = c_g \cdot \left(\det(\mathbf{A}) + \det(\mathbf{B})\right) - \det(\mathbf{B})$$
4. one should construct 5 others matrix C_i obtained from matrix A by replacing *i*-th column by vector W (i = 1,2,3,4,5);
5. in way described in point 2 one should construct from matrices C_i other matrices named D_i;
6. introducing denotation:
   $L_1 = \det(\mathbf{A}) + L_2$; $L_2 = \det(\mathbf{B})$;
   $L_3 = \det(\mathbf{C_1}) + L_4$; $L_4 = \det(\mathbf{D_1})$;
   $L_5 = \det(\mathbf{C_2}) + L_4$; $L_6 = \det(\mathbf{D_2})$;
   $L_7 = \det(\mathbf{C_3}) + L_4$; $L_8 = \det(\mathbf{D_3})$;
   $L_9 = \det(\mathbf{C_4}) + L_{10}$; $L_{10} = \det(\mathbf{D_4})$;
   $L_{11} = \det\mathbf{C_5})$;

integration constants can be obtain from equation:

$$P = \frac{c_g \cdot L_3 - L_4}{c_g \cdot L_1 - L_2}; \quad Q = \frac{c_g \cdot L_5 - L_6}{c_g \cdot L_1 - L_2};$$

$$R = \frac{c_g \cdot \mathrm{L}_7 - \mathrm{L}_8}{c_g \cdot \mathrm{L}_1 - \mathrm{L}_2}; \quad S = \frac{c_g \cdot \mathrm{L}_9 - \mathrm{L}_{10}}{c_g \cdot \mathrm{L}_1 - \mathrm{L}_2};$$

$$X''(x_p) = \frac{\mathrm{L}_{11}}{c_g \cdot \mathrm{L}_1 - \mathrm{L}_2}$$

7. for location of crack x_p which was determined in part one of this work, the flexibility c_g can be obtain from equation:

$$c_g = \frac{L_P - \mathrm{L}_2 \cdot Z}{L_N - \mathrm{L}_1 \cdot Z + L_H} \tag{5}$$

where:

$$L_p = \mathrm{L}_4 \cosh \lambda c + \mathrm{L}_6 \sinh \lambda c + \mathrm{L}_8 \sin \lambda c + \mathrm{L}_4 \cos \lambda c$$

$$L_N = \mathrm{L}_3 \cosh \lambda c + \mathrm{L}_5 \sinh \lambda c + \mathrm{L}_7 \sin \lambda c + \mathrm{L}_9 \cos \lambda c$$

$$L_H = \frac{\mathrm{L}_{11}}{2\lambda} \cdot \left[\sinh \lambda (c - x_p) + \sin \lambda (c - x_p)\right] \cdot H(c, x_p)$$

$$Z = POM(c) + \frac{F}{2 \cdot EI \cdot \lambda^3} \cdot \cdot [\sinh \lambda (c - x_f) - \sin \lambda (c - x_f)] H(c, x_f)$$

$POM(c)$ – is measured value of vibration amplitude in beam coordinate $x = c$.

Using described above methodology the flexibility c_g can be determined for each frequency and corresponding vibration amplitudes of FRF.

4. CRACK DEPTH IDENTIFICATION

Some methods based on discrete and continuous wavelet transform for the crack location determination in part one of this work have been described. The results of this identification is used to the quantification of the crack depth. The crack depth identification based on the described above inverse model of beam.

In fig. 2 the FRF of cantilever beam obtained as a computer simulation by finite element analysis.

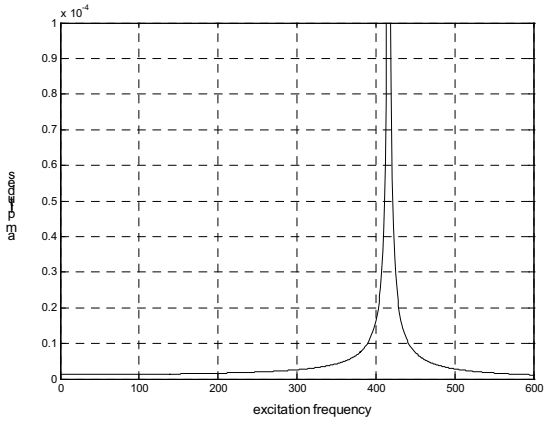


Fig. 2. FRF for the cantilever beam

In fig. 3 the identified local flexibility c_g, determined (from equation 5) for each frequency below the first natural frequency and corresponding amplitudes of vibration of FRF is showed.

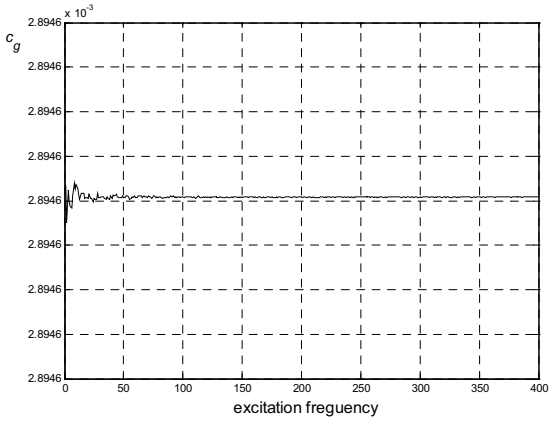


Fig. 3. Identified local flexibility c_g as a function of frequency excitation

Having identified the flexibility c_g (as a mean value identified for each frequency) the depth of crack have been determined.

Table 1 summarizes the modelled and identified crack depth with relative error of identification.

Table 1 Crack depth identification

modelled crack depth	identified flexibility c_g	identified crack depth	relative error
0.1	$2.8946*10^{-3}$	0.099	1.0 %
0.2	$11.295*10^{-3}$	0.201	0.5 %
0.3	$26.447*10^{-3}$	0.300	0 %
0.4	$51.792*10^{-3}$	0.401	0.04 %
0.5	$95.267*10^{-3}$	0.498	0.4 %

In fig. 4 the FRF with some error due to measure and signal processing is showed.

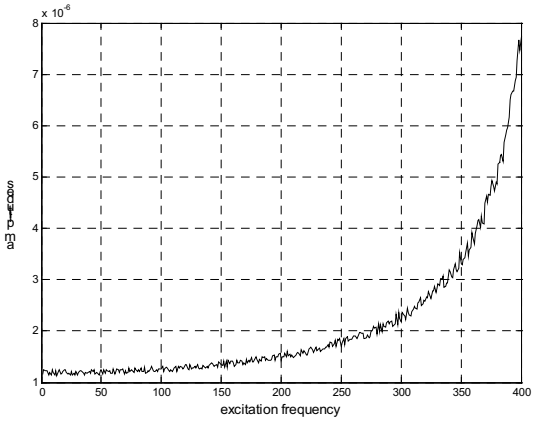


Fig. 4. FRF with some errors

In fig. 5 the identified local flexibility c_g, determined (from equation 5) for each frequency below the first natural frequency and corresponding amplitudes of vibration of FRF is showed.

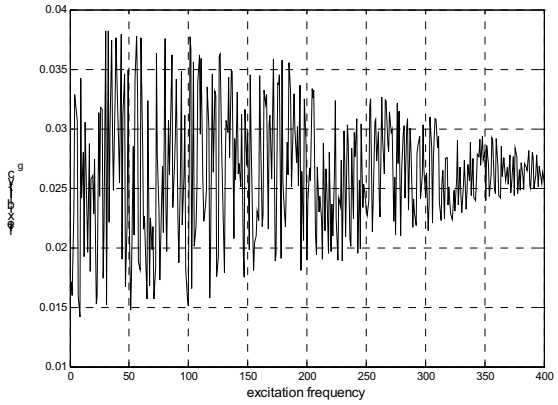


Fig. 5. Identified local flexibility c_g as a function of frequency excitation

Table 2 summarizes the modelled and identified from amplitudes determined with error (addition 3 % of amplitude multiplied by random value from (-1;1) range) crack depth with relative error of identification.

Table 1 Crack depth identification

modelled crack depth	mean value of c_g	identified crack depth	relative error
0.1	$2.832*10^{-3}$	0.098	2 %
0.2	$11.281*10^{-3}$	0.202	1 %
0.3	$26.321*10^{-3}$	0.299	0.33 %
0.4	$52.026*10^{-3}$	0.401	0.25 %
0.5	$95.490*10^{-3}$	0.501	0.2 %

5. SUMMARY

In part 2 of this work some method of crack depth determination (3-rd level of crack diagnostics) is described. Presented method is based on the crack location identification described in part 1 of this work.

The depth identification is based on FRF and inverse model of beam.

This work was done as a part of research project N 504 042 32/3443

LITERATURA

[1] Adams D.: *Health monitoring of structural materials and components: methods with applications*, Willey 2007.
[2] Majkut L.: *Wibroakustyczne symptomy pęknięcia belki*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, 40 z.4, str. 165-181.
[3] Majkut L.: *Identyfikacja pęknięcia w belkach o znanych warunkach brzegowych*. Diagnostyka nr 32/2004.
[4] Majkut L.: *Identyfikacja pęknięcia w belkach na podstawie amplitud drgań wymuszonych*. Kwartalnik AGH Mechanika 24 z. 3 (2005) str. 199-204.
[5] Murakami Y.: *Stress Intensity Factors Handbook*, Pergamon Press Oxford, 1987
[6] Neimitz A.: *Mechanika pękania*, Warszawa PWN 1998.

dr inż. **Leszek MAJKUT** (ur. 1970), absolwent Wydziału Elektroniki, Automatyki, Informatyki i Elektrotechniki AGH (1995). Pracę doktorską dotyczącą wpływu lokalnej zmiany sztywności na amplitudę drgań i widmo częstości obronił w 1999 na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. Obecnie prace badawcze dotyczące diagnostyki wibroakustycznej, problemów związanych z odwracaniem modeli diagnostycznych oraz szeroko pojętej teorii drgań (drgania, wibroizolacja, hałas), ze szczególnym uwzględnieniem układów ciągłych i dyskretno-ciągłych prowadzi w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki AGH.

STATISTICAL VIBRATION-BASED SYMPTOMS IN ROTATING MACHINERY DIAGNOSTICS

Tomasz GAŁKA

Instytut Energetyki, 01-330 Warszawa, ul. Mory 8
fax (+48) 22 642 83 78, e-mail tomasz.galka@ien.com.pl

Summary

Rotating machinery condition assessment is usually based on vibration spectra and trends analysis. They are, however, usually influenced by many factors other than technical condition parameters. Analysis of a large number of vibration trends, obtained from large steam turbines, has suggested that some other time-dependent parameters might be used as diagnostic symptoms. In particular, parameters that describe scatter of measurement results or variations of vibration levels between consecutive measurements seem to be quite sensitive to technical condition. The paper deals with preliminary results of statistical symptoms application, obtained with a few steam turbines in utility power plants. These results seem very promising. In order to formalize this approach and develop quantitative measures, a modification of the theoretical model is necessary. This work is currently under way and some results obtained so far are also outlined.

Keywords: rotating machine, vibration, technical condition, diagnostic symptom.

STATYSTYCZNE SYMPTOMY DRGANIOWE W DIAGNOSTYCE MASZYN WIRNIKOWYCH

Streszczenie

Ocena stanu technicznego maszyn wirnikowych jest zwykle oparta na analizie widm i trendów drgań. Wpływ na nie wywierają jednak zwykle, oprócz parametrów stanu, różne inne czynniki. Analiza znacznej liczby trendów drgań, uzyskanych z badań turbin parowych dużej mocy, wskazuje, że w charakterze symptomów diagnostycznych mogą być wykorzystane również inne parametry zależne od czasu. W szczególności parametry opisujące rozrzut wyników pomiaru wydają się wrażliwe na stan techniczny. Artykuł opisuje wstępne wyniki zastosowania symptomów statystycznych, uzyskane dla kilku turbin parowych w energetyce zawodowej. Wyniki te wydają się bardzo obiecujące. Aby sformalizować takie podejście i opracować miary ilościowe, konieczna jest modyfikacja modelu teoretycznego. Prace te są obecnie w toku i zaprezentowano niektóre z dotychczasowych rezultatów.

Słowa kluczowe: maszyna wirnikowa, drgania, stan techniczny, symptom diagnostyczny.

1. INTRODUCTION

According to [1], damage can be defined as a 'continuous or sudden loss of integrity and/or operational feature'. This definition is in a way related to the classification given in [2], wherein damage can be either 'natural', i.e. resulting from ageing/ wear, or 'random'. Natural damage is represented by a continuous change of a condition parameter with time, while random damage is of a stepwise type. Usually it can be assumed that the same refers to diagnostic symptoms as functions of time.[1]

Measures of technical diagnostics were initially intended to detect and locate a failure. This means that they were focused on random damages, which are either present or not present. Furthermore, this implies a 'two-state' classification of damage, of the 'good/ faulty' type. Such approach is satisfactory only for simple objects, which in turn do not justify advanced diagnostics. Thus the development proceeded to the next stage, which included a quantitative damage assessment; of course, this meant focusing on natural damage. An example of such approach can be found in [4]. Currently the issue of technical condition evolution forecasting (or predicting) has become very important, at least for large, costly and critical objects, often operated beyond their design life. This puts stress on trends analysis and evolutionary symptoms (see e.g. [5]). This approach is, from the theoretical point of view, based on the representation of machine condition in diagnostic symptoms, in the form of the Energy Processor (EP) model; detailed treatment can be found e.g. in [6].

[1] This can be understood on the basis of considerations given e.g. in [3].

Typically, a diagnostic symptom (i.e. a physical quantity covariant with object condition) is analyzed as a function of time. This is based on the assumption that

$$\mathbf{S}(\theta) = F[\mathbf{X}(\theta)] , \qquad (1)$$

where S and X denote diagnostic symptoms and condition parameters vectors, respectively, both depending on time θ. In most cases it is, however, necessary to assume that [7]

$$\mathbf{S}(\theta) = F[\mathbf{X}(\theta), \mathbf{R}(\theta), \mathbf{Z}(\theta)] , \qquad (2)$$

where vectors R and Z account for the influences of control and external interference, respectively. Generally influences of R and Z cannot be neglected, which imposes a serious limitation on this approach. It is therefore justified to study the suitability of other time-dependent parameters in condition evolution assessment.

In the following, Section 2 shall outline some limitations of evolutionary symptoms in more detail. In Section 3 a new type of symptoms, tentatively referred to as statistical ones, shall be introduced, and Section 4 shall present a few examples. Finally, in Section 5, prospects for further development shall be discussed. This paper is devoted mainly to vibration-based symptoms, which means that components of the vector S are vibration levels in frequency bands determined from diagnostic models. It seems, however, that such approach can be generalized, to include a broader class of symptoms.

2. LIMITATIONS OF EVOLUTIONARY SYMPTOMS

Large critical rotating machines are usually designed for long service life. Evolution of their technical condition is thus in most cases slow.[2] In [5] it has been shown, on the basis of the EP model, that $S(\theta) \in \mathrm{S}$ can be approximated by a straight line, providing that

$$\theta/\theta_b << 1 , \qquad (3)$$

where θ_b denotes time to breakdown, determined from the EP model [3, 6]. This is equivalent to the condition that machine residual life is not too small. In such approach, the slope of the approximating line and a measure of departure from linearity can be employed as diagnostic symptoms.

$S(\theta)$ plots sometimes reveal considerable regularity. An example is shown in Fig. 1. In this case, damage evolution is comparatively fast and we may infer that in Eq. (2) the influence of condition parameter – or parameters – dominates over that of control and interference. This is, however, seldom the case. Example shown in Fig. 2 is perhaps more typical, especially for vibration components generated by fluid-flow systems in turbines or compressors. Here, evolution of technical condition is slow, but components of the control and/or interference vectors cause large fluctuations, which dominate the symptom time history.

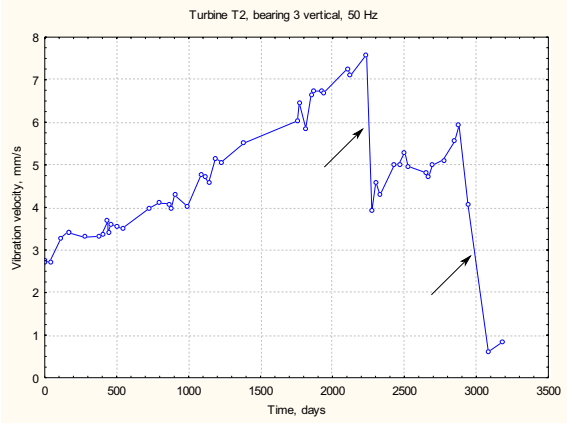


Fig. 1. Vibration trend: 230 MW unit, rear IP turbine bearing, 50 Hz component, vertical direction. Arrows indicate rotor balancing.

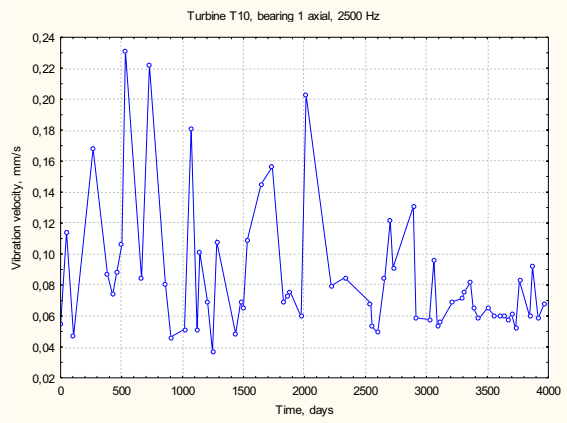


Fig. 2. Vibration trend: 200 MW unit, front HP turbine bearing, 2500 Hz component, axial direction.

In general we can conclude that fluctuations are superimposed on a symptom vs. time curve resulting from technical condition evolution. Usually it is reasonable to assume that control and interference parameters have no monotonic time trend, which means that

$$\bigwedge_i \Delta\theta \to \infty \Rightarrow \frac{\Delta Z_i(\theta)}{\Delta\theta} \to 0 , \qquad (4)$$

$$\text{where } \bigwedge_i \Delta\theta \to \infty \Rightarrow \frac{\Delta R_i(\theta)}{\Delta\theta} \to 0 , \qquad (5)$$

$$\Delta Z_i(\theta) = Z_i(\theta + \Delta\theta) - Z_i(\theta) , \qquad (6)$$

$$\Delta R_i(\theta) = R_i(\theta + \Delta\theta) - R_i(\theta) . \qquad (7)$$

[2] Large stepwise changes can result from an overhaul. In the following we assume that influence of overhauls can be normalized; see e.g. [8].

This implies that influence of the R and Z vectors can be neglected if $\Delta\theta$, or the period covered by the trend under consideration, is sufficiently long. This condition is obviously of qualitative nature only: for a given object and a given symptom in real plant environment we cannot determine how large should $\Delta\theta$ be. This is clear from the example shown in Fig. 3. In this case, overall slope for the entire period under consideration (over twelve years) is very small, close to zero, which is normal for this frequency range with long residual life [5]. We can, however, see that this value 'stabilizes' only after about five years, which is a long period.

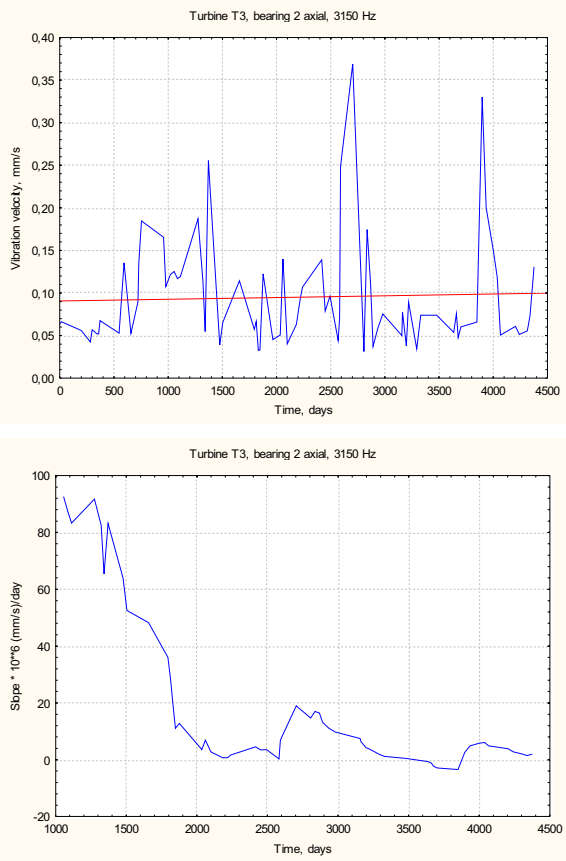


Fig. 3. Vibration trend: 230 MW unit, HP/IP turbine bearing, 3150 Hz component, axial direction (upper) and linear approximation slope plotted against time (lower).

It should be kept in mind that, in principle, influence of control parameters can be normalized. This issue is beyond the scope of this paper; as far as control parameters are concerned, only approximate normalization procedures can be employed in practice, at least for more complex objects [8]. Any external interference, even measurable, defies normalization.

Moreover, if the influence of R and Z vectors on actual symptom value is dominant, as in the case shown in Fig. 2, results of any fitting, either of a straight line or any monotonic curve, can be highly sensitive to single data points. This feature can be also seen in Fig. 3. It can be a serious drawback, as evolutionary symptom values are determined directly from fitting results. In many cases linear approximation even gives negative slope, which is not consistent with the EP model, at least in its basic form. It thus seems justified to study if time-dependent parameters other than the symptom value can be employed to trace technical condition evolution.

3. STATISTICAL SYMPTOMS

As mentioned above, the term 'statistical symptom' is tentative and reflects procedures employed to yield symptom value rather than its physical origin.

To begin with, let us consider the EP model in its original form [6]. For the i-th symptom $S_i(\theta)$ we have

$$S_i(\theta) = \Phi_i[V_0(1 - \theta/\theta_b)^{-1}] \ , \qquad (8)$$

where V_0 denotes the power of residual processes for $\theta = 0$ and Φ_i is the i-th symptom operator. In practice, $S_i(\theta)$ shall be determined from a set of m observations:

$$\{S_i\} = \{S_i(\theta_1), S_i(\theta_2), \ldots, S_i(\theta_m)\}. \qquad (9)$$

EP model is deterministic, so for each $l = 1, 2, \ldots m$ the value of $S_i(\theta_l)$ depends only on θ_l, as V_0, θ_b and Φ_i for a given object and symptom do not change with time.

If the influence of R and Z vectors is to be taken into account, it is reasonable to treat S_i as a random variable. $S_i(\theta)$ is thus a stochastic process and we may assume that *parameters of this process depend on the object condition*. This means that *they can be employed as diagnostic symptoms*. In the following, we shall call them statistical symptoms.

It seems possible to support this assumption within the framework of the EP model. In order to accomplish this, however, the model has to be developed. Let us remind here that Eq. (8) has been derived from the general equation [9]

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{\beta(\alpha-1)V}{1-\beta(\alpha-1)\theta} \ , \qquad (10)$$

wherein α and β remain constant throughout the entire life of the object. In particular, α refers to the object internal structure and physically describes proportionality between total dissipation power and V, while β describes destructive feedback.

In order to account for the influence of $R_i(\theta)$ components it is necessary to assume that they affect the values of α, β or both. $Z_i(\theta)$ components are more problematic, partly due to the fact that the very term 'interference' is very broad. It seems reasonable to assume that external interference does not affect the object itself, but acts at the 'interface' between the object and measurable symptoms. This can be described either as a modi-

fication of the symptom operator Φ_i or by replacing Eq.(8) by:

$$S_i(\theta) = \Phi_i[V_0(1 - \theta/\theta_b)^{-1} + V_Z(\theta)] \ , \qquad (11)$$

where

$$V_Z = f[Z_1(\theta), Z_2(\theta), ..., Z_n(\theta)] \qquad (12)$$

is the additional power resulting from the Z vector components. The second approach seems certainly more convenient from the mathematical point of view, but cannot be accepted, as V_Z does not depend on object condition parameters (an example shall be provided in the next section). This problem obviously needs further study. Here we may note that, if R_i and Z_i are treated as random variables, then also S_i become random variables. Strictly speaking, each empirically recorded symptom time history $S_i(\theta)$ consists of statistical fluctuations superimposed on a monotonic trend. This is equivalent to introducing a statistical description while retaining the deterministic nature of the EP model itself.

For a given object operated in a given environment throughout its entire life[3] we may assume that statistical parameters of R_i and Z_i remain constant. Let us view the recorded $S_i(\theta)$ time history and introduce a moving 'window', within which the statistical parameters of S_i are determined. This is shown schematically in Fig. 4. If these parameters do change as we move along the time axis, they depend on the object condition and can be employed as diagnostic symptoms.

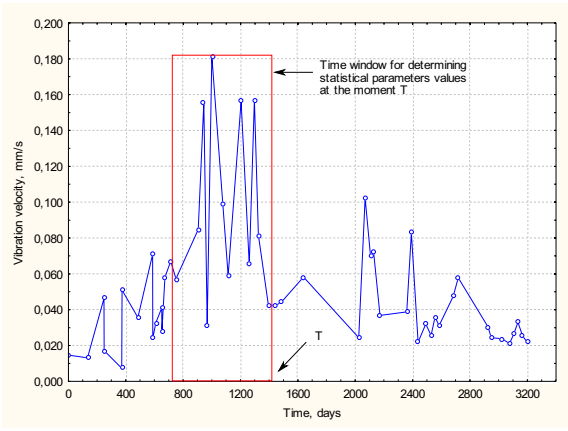


Fig. 4. The idea of determining statistical parameters as a function of time (see main text for details). Data refer to a real object (230 MW steam turbine).

Can this approach be validated theoretically and given a mathematical description? The question of interference still remains open. Influence of the control parameters can be most easily represented by introducing a dependence of model parameters on input power N. Detailed treatment can be found in [10], where various possible model modifications have been analyzed. If it can be shown that

$$\partial S_i/\partial N = f(\theta) \ , \qquad (13)$$

then, taking into account that N is a random variable with constant parameters, the statistical parameters of S_i are sensitive to the object condition.

Model modifications presented in [10] consist in various representations of α and β, which are explicit or implicit functions of time. This leads to differential equations, which can be viewed as modifications of the original Eq. (10). Unfortunately, in most cases they can be solved only numerically, so it is not possible to check the condition given by Eq. (13). It should be also kept in mind that for many large rotating machines the function

$$N = f(\mathrm{R}) = f(R_1, R_2, ..., R_n) \qquad (14)$$

is unique, but not single, as various vectors R may yield the came value of N [11]. All these deficiencies obviously again call for further model refinement.

4. EXAMPLES

While analytical description still has to be developed, it is possible to check the suitability of statistical symptoms empirically. For a number of large rotating machines, in particular steam turbines, sufficient databases are available and there are some cases wherein certain malfunctions have been detected. It is thus possible to perform a study schematically shown in Fig.4.

Preliminary analysis of a large number of vibration-based symptoms defined in Section 1 has revealed that their fluctuations do change with time. This observation is obviously qualitative, so in order to obtain more insight into the problem two statistical symptoms have been proposed [12]:

- standard deviation σ_i,
- mean difference between two consecutive values $\Delta_i = |S_{i+1} - S_i|$,

both determined within the 'window' shown in Fig.4, which includes 10 data points.

The latter of these needs some explanation. Assume that we record two values of the symptom S_i, namely:

$$S_{i1} = F[\mathrm{X}(\theta), \mathrm{R}(\theta), \mathrm{Z}(\theta)] \ , \qquad (15)$$

$$S_{i2} = F[\mathrm{X}(\theta + \Delta\theta), \mathrm{R}(\theta + \Delta\theta), \mathrm{Z}(\theta + \Delta\theta)] \ . \qquad (16)$$

If $\Delta\theta$ is sufficiently small, we may assume that

$$\mathrm{X}(\theta + \Delta\theta) \approx \mathrm{X}(\theta) \ , \qquad (17)$$

so the difference between S_{i1} and S_{i2} results from the R and Z vectors only and hence is a random variable.

Fig. 5 shows an example for a 200 MW steam turbine. $\theta = 0$ corresponds to about 150,000 hours

[3] This refers e.g. to stationary steam or gas turbines and many industrial installation, but is open to dispute e.g. for marine propulsion turbines.

of operation (the turbine was commissioned in early 1960s). After about 2000 days low-pressure rotor was replaced during a scheduled overhaul. Vibration time history (trend), shown in Fig.5a, exhibits only moderate increase during the period before rotor replacement, which is to a certain degree 'masked' by fluctuations. Plots of $\sigma_i(\theta)$ and $\Delta_i(\theta)$ are much easier to interpret, as the increase is evident. Of course, both these plots exhibit a 'lag', caused by the time window: corresponding values cannot decrease immediately after repair. This is, however, not an important disadvantage, as we are certainly more interested with the 'leading edge', which provides a warning.

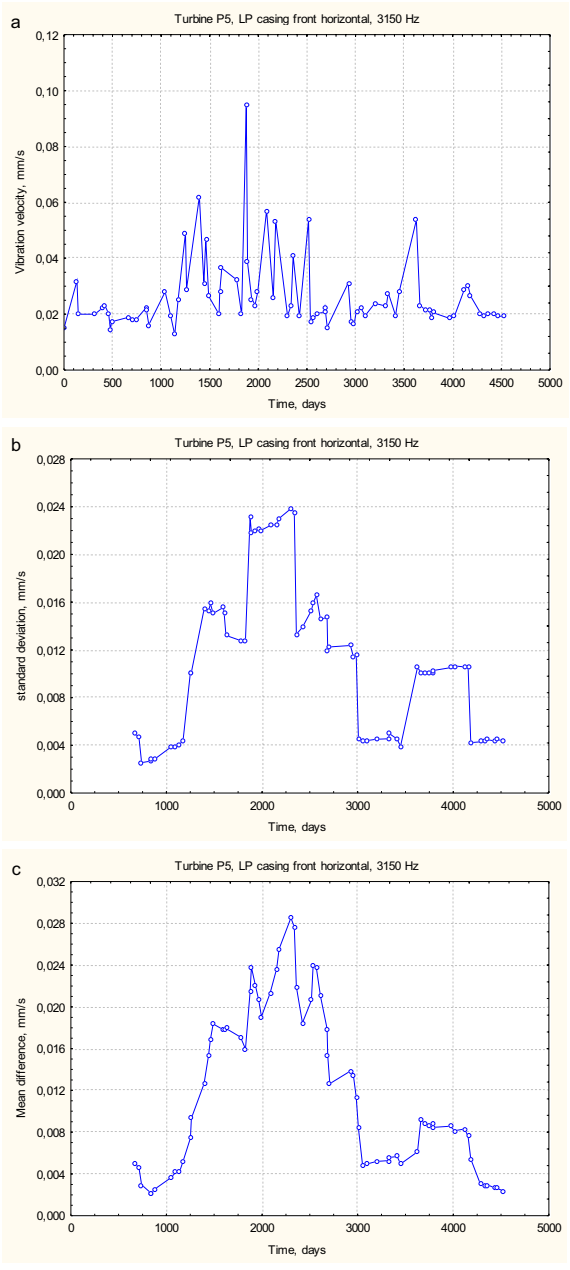


Fig. 5. Vibration velocity (a), standard deviation σ (b) and mean difference Δ (c) plotted against time: 200 MW turbine, LP casing front horizontal, 3150 Hz frequency band.

Another example refers to a similar turbine that suffered an IP rotor failure (fracture of some last stage blades) and is shown in Fig. 6 Detailed description of this very interesting case can be found elsewhere [13]; here the attention shall be focused on statistical symptoms. Again, vibration trend shows an increase, but linear approximation slope is not alarming [5, 11] and no substantial departure from linearity can be detected. On the other hand, plots of standard deviation and mean difference clearly reveal the approaching failure, with considerable advance of a few hundred days, which is exceptionally valuable for planning maintenance and repairs.

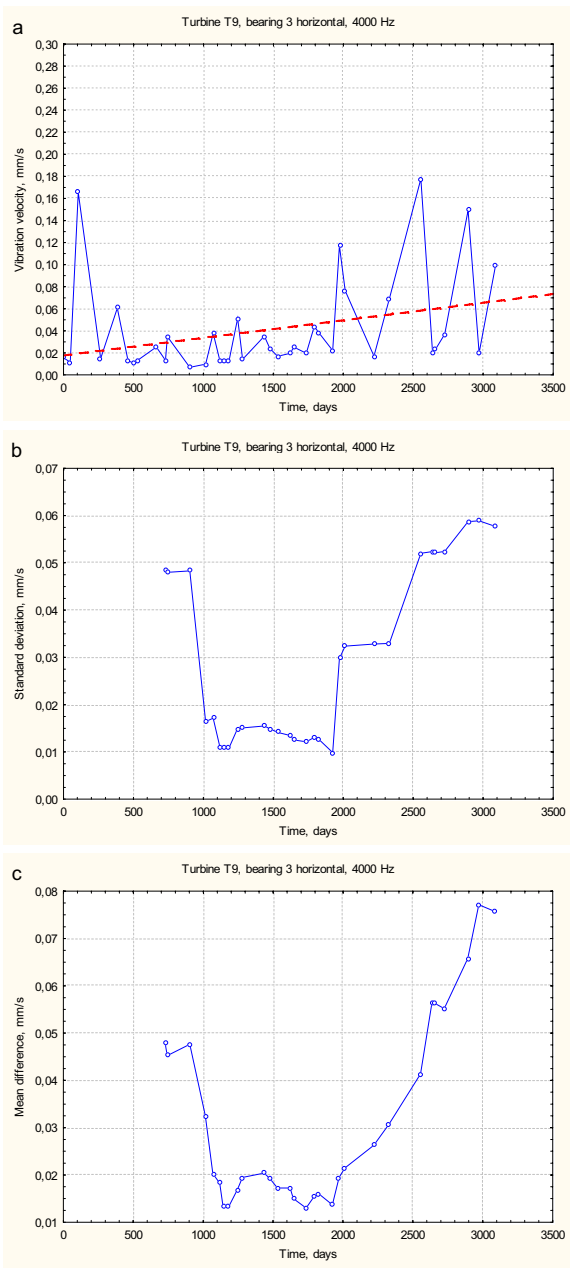


Fig. 6. Vibration velocity (a), standard deviation σ (b) and mean difference Δ (c) plotted against time: 200 MW turbine, rear IP bearing horizontal, 4000 Hz frequency band.

Figs. 5 and 6 suggest that $\Delta_i(\theta)$ plots are more useful that $\sigma_i(\theta)$, as they seem more regular and less sensitive to single 'peaks' in vibration time histories. However, at present it seems unjustified to accept one of these symptoms and discard the other, as differences are not large. Further studies will possibly clarify this issue.

An interesting feature of statistical symptoms is demonstrated by another example, shown in Fig. 7. This example refers to a 230 MW turbine, which was commissioned in 2000. Available symptom time histories cover the entire period of operation, as first measurements were performed only a few days after first startup.

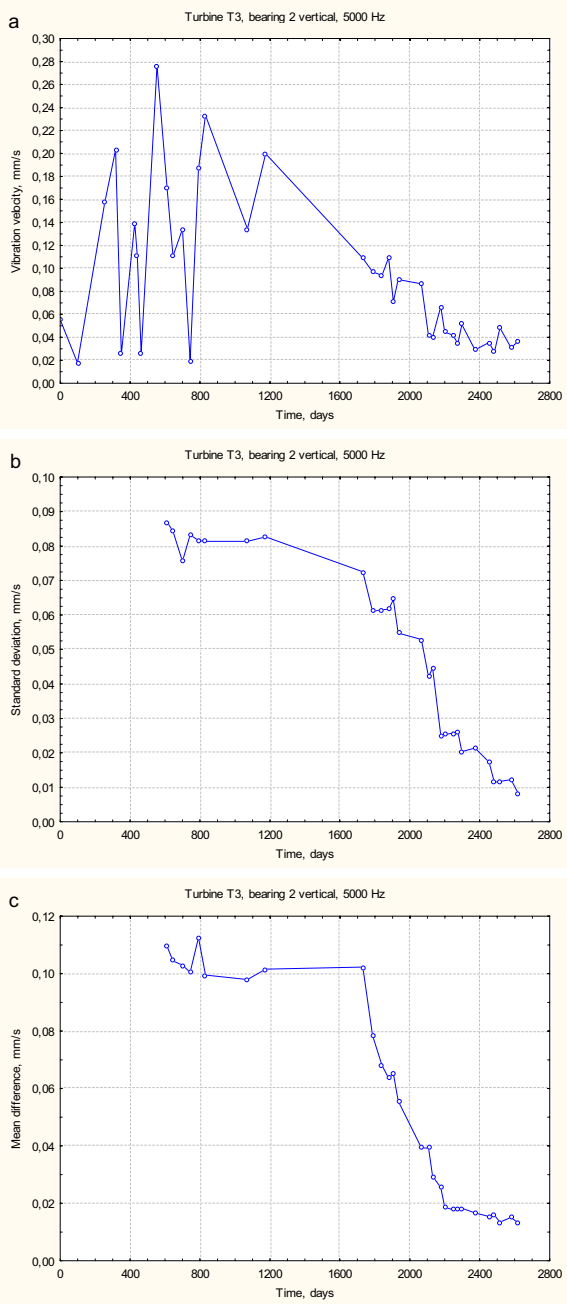


Fig. 7. Vibration velocity (a), standard deviation σ (b) and mean difference Δ (c) plotted against time: 230 MW turbine, HP/IP bearing vertical, 5000 Hz frequency band.

It is easily seen that both $\sigma_i(\theta)$ and $\Delta_i(\theta)$ show considerable decrease. Most probably this can be attributed to the 'running-in' effect; in fact, both these plots remind a sort of bathtub-type curve, well known in terotechnology. It should be noted here that the original EP model cannot account for this type of a symptom vs. time relation; in [10] this was accomplished by introducing negative initial value of the destructive feedback factor β (cf. Eq.(10)).

All three above examples refer to vibration-based symptoms from the blade frequency range. This range contains vibration components generated by interaction between turbine fluid-flow system and steam flow. Their amplitudes depend on the technical condition of this system [7] and therefore provide important diagnostic information. As already mentioned, time histories of these vibration components usually exhibit large fluctuation (see Fig. 2) and we may infer that they are more sensitive to the R and Z vectors. In fact, this can be directly confirmed. Fig. 8 shows plots of normalized standard deviation, defined as $\sigma_n = \sigma/S_{av}$ (S_{av} is the mean value), against frequency, for two different turbines. Values have been determined from samples of 100 vibration spectra.

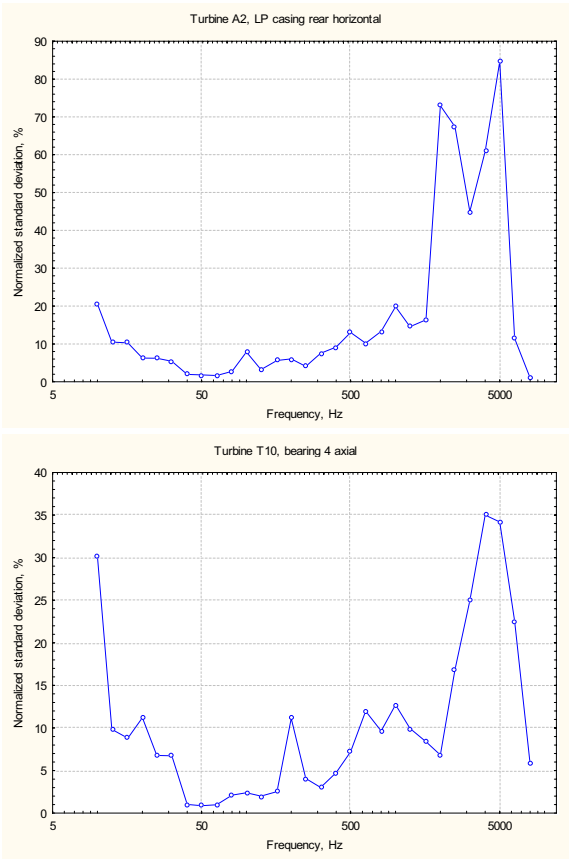


Fig. 8. Normalized standard deviation vs. time; upper plot: 120 MW turbine, LP casing rear horizontal; lower plot: 200 MW turbine, front LP bearing axial.

It can be easily seen that for the blade frequency range (above 1000 Hz) σ_n is considerably higher; moreover, both plots are qualitatively very similar. Both turbines have been operated at constant load and measurements have covered comparatively short periods (about one hour in both cases), during it may be inferred that the scatter is due primarily to external interference. This example also shows that the simple approach suggested in Eq. (12) is unacceptable, as interference obviously cannot be neglected. It should be noted that large fluctuations in the blade frequency range make vibration time histories more difficult to interpret, which emphasizes the need for better diagnostic symptoms.

All examples presented above refer to the blade frequency range. There is no reason for not applying such approach to harmonic components. Two issues, however, have to be pointed out. First, vibration time histories from the harmonic frequency range are usually easier to interpret, so there is no particular need for using a more sophisticated approach. Second, these components are very sensitive even to minor overhauls, repairs and adjustments, which result in stepwise changes. These changes are not related to long-term evolution of object condition, but they disturb σ_i and Δ_i

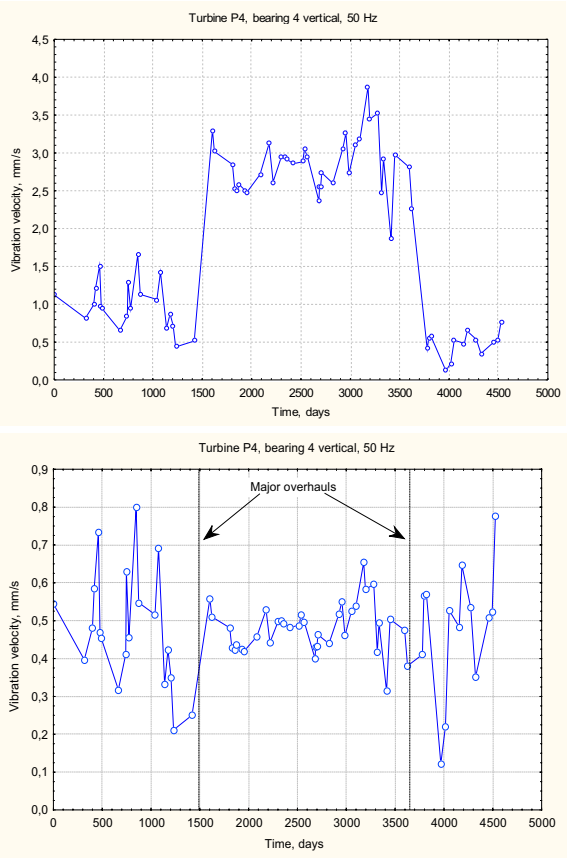


Fig. 9. Raw (upper graph) and normalized (lower graph) time histories of the 50 Hz component: 200 MW turbine, front LP bearing vertical (after [12]).

statistical symptoms, raw $S_i(\theta)$ plots have to be normalized. This issue is beyond the scope of this paper; details can be found in references (see e.g. [8]). An example is shown in Fig. 9 [12]; we may see that stepwise changes are much larger than 'normal' fluctuations.

In this particular case, stepwise changes of the 50 Hz component resulted from IP/LP rotors alignment adjustments. Symptom normalization reveals that, after the first overhaul, a monotonic trend can be seen, most probably resulting from some slowly developing malfunction. This is much more obvious from statistical symptom time histories, which are shown in Fig. 10.

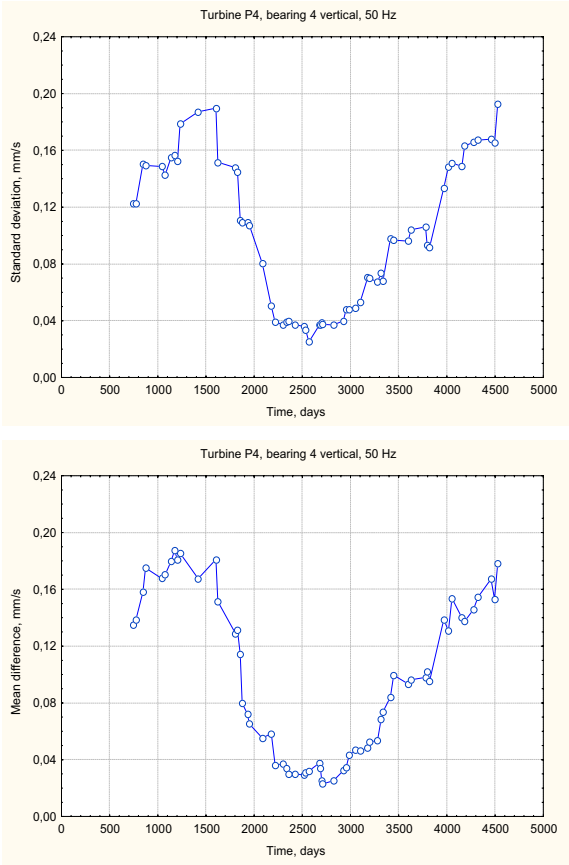


Fig. 10. Standard deviation σ (upper) and mean difference Δ (lower) plotted against time for the symptom time history from Fig. 10 (after [12]).

5. CONCLUSION

Currently it seems reasonable to conclude that statistical vibration-based symptoms can be useful in interpreting time histories determined by object condition evolution. Their application for random-type faults is perhaps not justified, as symptom time history analysis usually yields conclusive results. There is, however, a need for methods of lifetime consumption and residual life assessment; for these purposes, statistical symptoms seem to provide a useful tool. It should be kept in mind that all examples presented in this paper have been based on available data rather than results of

a purpose-designed diagnostic experiment. With state-of-the-art monitoring systems, often installed on large critical rotating machines, data acquisition for determining statistical symptom values should not be a particular problem.

At present the most important task is to develop a suitable model. This has already been stressed in the above considerations. While it may be intuitively understood that statistical parameters proposed in this paper can be employed as diagnostic symptoms, a strict treatment is obviously necessary. Work in this field is currently under way.

ACKNOWLEDGEMENT

Some of the results used and quoted in this paper have been obtained with the support of the Ministry of Science and Higher Education, within the framework of the N504 030 32/2693 Research Project.

REFERENCES

[1] Collacott R. A.: *Structural Integrity Monitoring*. Chapman and Hall, London, 1985.
[2] Konieczny J., Olearczuk E., Żelazowski W.: *Elements of Terotechnology*. WNT, Warszawa, 1969 (in Polish).
[3] Cempel C.: *Damage initiation and evolution in operating mechanical systems*. Bulletion of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences vol.40 No.3, 1992, pp.201-214.
[4] Orłowski Z., Gałka T.: *Symptom reliability – a new tool for quantitative assessment of turbine technical condition*. Proceedings of the IASTED Conference 'High Technology in the Power Industry'. Acta Press, Anaheim, 1997, pp.65-70.
[5] Gałka T.: *Evolutional symptoms in rotating machinery diagnostics*. Proceedings of the International Conference 'Condition Monitoring 2005', King's College, Cambridge, 2005, pp.255-260.
[6] Natke H. G., Cempel C.: *Model-Aided Diagnosis of Mechanical Systems*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1997.
[7] Orłowski Z.: *Vibrodiagnostics of Steam Turbines*. Proceedings of the Institute of Power Engineering, Warszawa, 1989 (in Polish).
[8] Gałka T.: *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.
[9] Cempel C.: *Theory of energy transforming systems and their application in diagnostics of operating systems*. Applied Mathematics and Computer Science, 1993, vol.3, No.3, pp. 533-548.
[10] Tabaszewski M.: *Diagnostic symptom models of machines treated as operating systems*. PhD thesis. Poznań University of Technology, 2001 (in Polish).
[11] Gałka T.: *Representation of machine technical condition in evolutionary diagnostic symptoms*. Eksploatacja i Niezawodność, Vol. 1/ 2008, pp.23-29.
[12] Gałka T.: *Parameters of statistical distributions as evolutionary symptoms in turbine fluid-flow system diagnostics*. Diagnostyka, vol.1(37)/2006, pp.31-38 (in Polish).
[13] Gałka T., Kiebdój J.: *Untypical vibroacoustic symptoms of a steam turbine fluid-flow system failure*. Diagnostyka, vol.3(43)/2007, pp.5-10.
[14] Gałka T.: *Influence of turbine load on vibration pattern and symptom limit value determination procedures*. Proceedings of the COMADEM 2001 International Conference. Elsevier, Oxford, 2001, pp. 967-976.

Tomasz GAŁKA, Ph.D graduated from Warsaw University of Technology, Faculty of Electronics. Since 1982 he has been employed at the Institute of Power Engineering. His main professional interests are focused on vibration-based diagnostics of large rotating machines, in particular steam turbines. He has participated in a number of research projects in this field. He has authored or co-authored about 60 publications. His nonprofessional interests include railways and scuba diving.

ROLE OF SIGNAL PREPROCESSING IN LOCAL DAMAGE DETECTION IN MINING MACHINES

Radosław ZIMROZ

Wroclaw University of Technology,
Diagnostics and Vibro-Acoustics Science Laboratory
Pl. Teatralny 2, Wroclaw, 50-051, Poland
Tel. (+48 71) 320 68 49, Telefax (+48 71) 344 45 12
E-mail: radoslaw.zimroz@pwr.wroc.pl

Summary

Local damage - a very important form of change of condition in gearboxes and bearings - is asociated with local change of stiffness/mass. In vibration signal it is manifested by appearance of periodic (at least cyclic) impulses and this properties of signal is used as a basis for damage detection. Unfortunately, especially at early stage, local damage "produces" weak signature that is completely masked by other sources of vibration. It means that one may not see any impulses in signal. A crucial problem in local damage detection is to eliminate non-informative parts of signal, improve *signal to noise ratio* or - in other words – to extract signal of interest (SOI). This paper shows results of application different pre-processing techniques to vibration signals captured from mining machines during normal operation.

Keywords: informative signal extraction, local damage, gearboxes, bearings, local damage.

ROLA WSTĘPNEGO PRZETWARZANIA SYGNAŁÓW W DETEKCJI USZKODZENIA LOKALNEGO W MASZYNACH GÓRNICZYCH

Streszczenie

Uszkodzenie lokalne jest bardzo ważną formą zmiany stanu w przekładniach i łożyskach. Zwykle wiąże się z lokalną zmianą sztywności i/lub ubytkiem masy. W sygnale drganiowym uszkodzenie lokalne powoduje chwilowe zaburzenie sygnału o impulsowym, cyklicznym charakterze. W praktyce sygnał informacyjny jest niskoenergetyczny i jest maskowany przez inne źródła drgań w maszynie, co oznacza brak możliwości wykrycia impulsów w sygnale zarejestrowanym na obiekcie. Fundamentalne znaczenie w detekcji uszkodzeń lokalnych ma odpowiednie wstępne przetworzenie sygnału eliminujące zakłócenia lub innymi słowy wyodrębniające sygnał informacyjny. W pracy pokazano wyniki zastosowania wybranych procedur przetwarzania sygnałów jako przetwarzanie wstępne mające na celu wyodrębnienie informacji o uszkodzeniu lokalnym. Wykorzystane sygnały zostały zarejestrowane na obudowie przekładni i łożyska w czasie normalnej eksploatacji w warunkach kopalni odkrywkowej.

Słowa kluczowe: ekstrakcja sygnału informacyjnego, przekładnie, łożyska, uszkodzenie lokalne.

1. INTRODUCTION

Local damage is a important form of change of condition in machines. This kind of damage in literature is mainly associated with gearboxes and bearings. Local change of stiffness/mass in mechanical system is manifested in vibration signal by appearance of periodic (at least cyclic) impulses. It is a basis for damage detection. Typical example of such change of condition is crack/breakage or spall/pitting on one tooth in gearbox and local damage of rolling element, outer/inner race – in bearing.

Unfortunately, especially at early stage, local damage "produces" weak signature that is completely masked by other sources of vibration. It means that one may not see any impulses in signal. That is crucial problem in local damage detection. A natural way is to eliminate non-informative parts of signal, improve signal to noise ratio or - in other words – to extract signal of interest (SOI).

For analysed objects – namely driving units used in mining machines - local damage seems to be very dangerous. Local damage (for example crack) may achieve final phase of degradation (i.e. breakage) quickly. A special feature for mining machines is non-stationary operating condition with frequent starts and stops of operation with fully loaded machine. It causes overloading of machine very often – especially if one consider bucket wheel excavator – that significantly accelerates degradation process.

Analysed machines (bucket wheel excavator, belt conveyor, stocking machine) work as production

system connected in series. Breakage of one of them is critical and will stop whole system.

In this paper it will be showed that for mining machines with complex design, non-stationary operation, high level of random/deterministic interferences etc., detection of local damage is challenging task. Detection of local damage may be much easier if one will apply proper pre-processing technique. This paper shows results of application different pre-processing techniques (different form of classic filtering, adaptive filtering, wavelet based decomposition and cyclostationarity based tools) to vibration signals captured from mining machines during normal operation.

2. VIBRATION SIGNAL PREPROCESSING TECHNIQUES

For needs of local fault detection SOI is described as impulsive (due to local change of stiffness) and periodic signal (for example with period related to rotating shaft).

SOI generated by local damage may be interpreted as AM/PM modulated signal. Procedure of recovering modulating signal – for example amplitude demodulation (envelope analysis) becomes a standard in gearbox and bearing local damage detection [1].

During last decade an approach using cyclostationarity of signal was exploited extensively [2-6]. Cyclicity is a generalisation of periodicity. Assumption of periodicity may be not adequate if machine works under non-stationary speed – then one should consider cycles instead of periods.

Cyclostationarity of signal gives a chance to calculate 3D map of statistical relation between carriers frequencies and cyclic frequencies "*alpha*" interpreted as a modulating signal. An advantage of using spectral correlation density (SCD) is very clear during diagnosis of multi-faults that happens in mining machines.

A powerful application of cyclostationarity is usage of information about cyclic frequency and number of its harmonic for blind separation of cyclostationary sources. It gives a chance to extract any SOI with different frequency alpha from complex mixture of vibration signals [7-9].

Signals generated by gearboxes and bearing have a different properties from statistical signal processing point of view. Signal related to damaged bearing is stochastic and random in opposite to gearbox mesh/shaft signals that are deterministic. This difference gives opportunity for separation signals from damaged bearing masked by signal generated by mesh (cooperating geared wheel). It was introduced by Randall and other [10, 11] for bearings diagnostics in helicopters,

It was shown also by Lee and White [12] that this approach may be used for extraction of SOI associated with local damage from gearbox.

In previous work done by Zimroz it was found that it can be used in mining machines [12, 14].

As SOI is locally impulsive, non-stationary signal a natural direction is to use time-frequency methods. Application of wavelets analysis (especially Wavelets Packets) may be very useful for signal decomposition. It allows to decompose signal into SOI and non-informative signal.

3. APPLICATION TO INDUSTRIAL SIGNALS FROM MINING MACHINES

Results of application selected signal processing techniques to vibration signals are presented in this chapter.

3.1. Band-pass filtering – cut off frequencies selection

Band-pass filtering is a very simple and intuitive tool used as a pre-processor for example in envelope analysis. The purpose of band-pass filtering is to extract carrier and sidebands for demodulation of signal. Problem with centre frequency and bandwidth selection can be solved by optimisation of cut-off frequencies searching, fig. 1.

a) b)

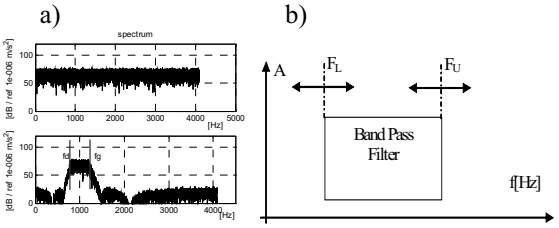


Fig. 1. a) Filter shape, b) idea of optimisation

a) b)

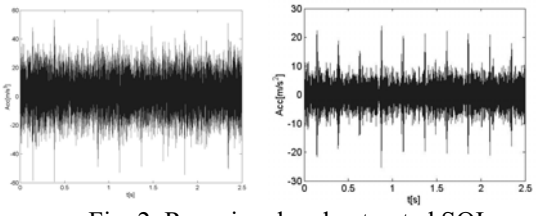


Fig. 2. Raw signal and extracted SOI

Optimisation is performed with kurtosis as a criterion, so pre-processed signal will be as much as possible spiky, fig. 2. [15]

$$FC(f_L, f_U) = \max\left(Kurtosis\left(F_{f_L}^{f_U}(S(t))\right)\right)$$

where

FC cost function

$S(t)$ raw signal

f_L, f_U cut off frequencies of band pass filter

$F_{f_L}^{f_U}$ filtering operator at f_L, f_U

Kurtosis – $k = \dfrac{E\{(s-\mu)^4\}}{\sigma^2}$ where E-expected value, μ,σ - respectively mean and standard deviation of process s(t)

Result of optimisation is pair of cut off frequencies of band pass filter, Fig. 3.

On fig. 3 a distribution of kurtosis versus cut-off frequencies is presented. As it was shown in [16] due to random impulses (not related to fault) kurtosis may be not effective criterion. To avoid problems with non-cyclic impulses another criterion (normalised sum of components in envelope spectrum) was proposed in [17], fig. 3b.

a) b)

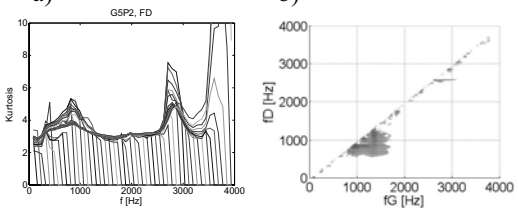


Fig. 3. Results of optimisation a) with kurtosis as a criterion(2D view) b) with NSofS as a criterion

3.2. Adaptive filtering

Assuming that vibration signal is a mixture of deterministic (with discrete components in spectrum – mainly related to geared wheels) and stochastic, random (related to wideband excitation caused by fault in bearing) signals it is possible to use adaptive filtering bases on prediction theory (deterministic signal may be predict, random not).

On Fig. 4 raw signal (no cyclic impulses) and filtered signal (clearly seen impulses) are presented

a) b)

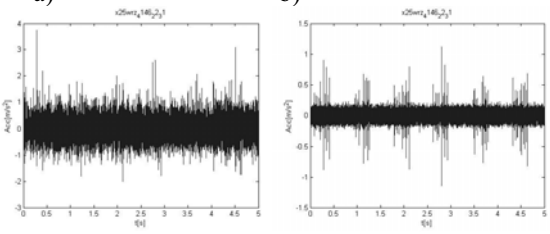


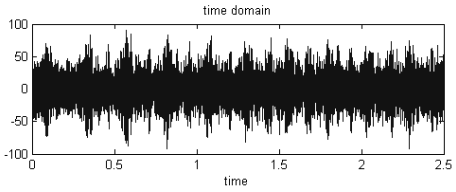
Fig. 4. Adaptive filtering for bearings signals: a) raw signals, b) extracted SOI

3.3. Wavelet based decomposition

Wavelets analysis seems to be very attractive tool for non-stationary signal analysis [18]. One of possible usage is signal decomposition.

The wavelet packet [19] method is a generalization of wavelet decomposition that offers a richer range of possibilities for signal analysis. In the wavelet packet decomposition (WPD), both the detail and approximation coefficients are decomposed. Fig. 5 shows original signal and SOI obtained by decomposition (Wavelet Packet, "dmey" wavelet, 5 levels of decomposition, node {5,10}). It is clear that in raw signal cyclic disturbance of signal has different period and nature (shape) than in SOI. It is example of multi-faults problem that appears in 2 stage gearbox.

a)



b)

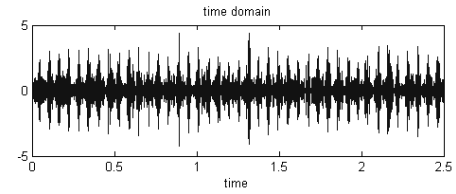


Fig. 5. Application of WPT: a) original signal, b) extracted impulsive signal

3.4. Cyclostationarity based tools

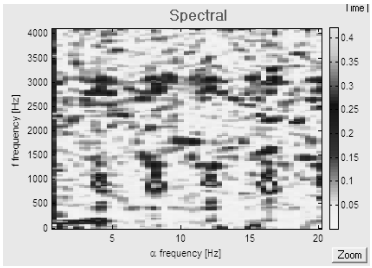
To take profit from cyclostationarity of signal one must estimate fundamental cyclic frequencies and number of their harmonics.

Cyclic sources in signal may be identified in the frequency domain through the double Fourier transform of auto-correlation function $R_x(t,\tau)$.

After selection of particular cyclic frequency one may extract source of vibration generating cyclic signal using reduced-rank cyclic regression method developed by Boustany and Antoni [7, 8].

Fig. 6a shows spectral Correlation density map as a base for separation. Fig. 6b presents raw and extracted signal

a)



b)

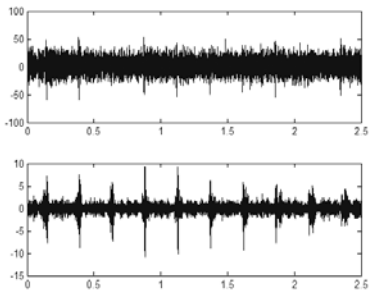


Fig. 6. Extraction of 2nd order cyclostationary SOI: a) Spectral Correlation Density map, b) original and extracted signal

4. CONCLUSION

Results of application of selected signal pre-processing methods for local damage detection oriented signal extraction have been presented.

It has been stated that for gearboxes and bearings used in mining machines local damage detection for raw signal is difficult. Using signal pre-processing it is possible to enhance signal significantly so one may use simple tool for detection and damage recognition

LITERATURA

[1] Ho D. and Randall R. B.: *Optimisation of bearing diagnostic techniques using simulated and actual bearing fault signals.* 2000 Mechanical Systems and Signal Processing 14, 763–788.

[2] Capdessus C., et al.: *Cyclostationary processes: application in gear faults early diagnosis*, Mech Sys and Signal Proc. 14 (3) (2000) 371–385.

[3] Bouillaut L., Sidahmed M.: *Cyclostationary approach and bilinear approach: comparison, applications to early diagnosis for helicopter gearbox and classification method based on HOCS*, Mech. Sys. and Signal Proc., 15 (5) (2001) 923–943.

[4] McCormick A. C., Nandi A. C.: *Cyclostationarity in rotating machine vibrations,* Mech. Systems and Signal Proc. 12 (2) (1998) 225–242.

[5] Antoniadis I. and Glossiotis G.: *Cyclostationary analysis of rolling-element bearing vibration signals* Journal of Sound and Vibration, Volume 248, Issue 5, Pages 829-845.

[6] Antoni J., Bonnardot F., Raad A., Badaoui M. El: *Cyclostationary modelling of rotating machine vibration signals*. Mechanical Systems and Signal Processing 18 (2004) 1285–1314.

[7] Boustany R. and Antoni J.: *"Blind extraction of a cyclostationary signal using reduced-rank cyclic regression – A unifying approach*", accepted for publication in Mech Systems and Signal Processing.

[8] Boustany R.,:"*Second-Order Blind Separation of Cyclostationary Sources: Application to Vibroacoustic Measurements*", PhD Thesis, Université de Technologie de Compiègne, Dec. 2005.

[9] Bonnardot F., Randall R. B.: *Guillet Extraction of second-order cyclostationary sources—Application to vibration analysis.* Mechanical Systems and Signal Proc. 19 (2005) 1230–1244.

[10] Antoni J., Randall R. B.: *Differential diagnosis of gear and bearing faults*. ASME Journal of Vibr. and Acoustics 124 (2) (2002) 165–171.

[11] Antoni J., Randall R. B.: *Unsupervised noise cancellation for vibration signals*. Part I–evaluation of adaptive algorithms, Mechanical Systems and Signal Processing (2003) 89–101.

[12] Lee S. K. White P. R.: *The enhancement of impulsive noise and vibration signals for fault detection in rotating and reciprocating machinery.* Journal of Sound and Vibration, 1998, 217(3), pp 485-505.

[13] Zimroz R.: *Application of Adaptive Filtering for extraction of informative signal for diagnostics of bearing used in belt conveyor's pulley (In Polish),* Mining and Geology, 2008

[14] Zimroz R.: *Application of Adaptive Filtering for separation of impulsive disturbance In planetary gearbox's signal (in Polish)*, Conference on Machine Diagnostics, Węgierska Górka 2008.

[15] Bartelmus W. Zimroz R.: *Optimal frequency band for amplitude demodulation for local damage detection (in Polish)*. Diagnostyka (Warszawa). 2006 nr 1, s. 141-150, 2006.

[16] Zimroz R.: *Optimisation of bandwidth selection in amplitude demodulation for local damage detection in mining machines (in Polish)*. Transport Przemysłowy. 2006 nr 4, s. 67-73.

[17] Zimroz R.: *Optimisation of amplitude demodulation procedure with normalized sum of sidebands as a criterion of decision (in Polish)*. Górnictwo i geologia IX. Wrocław: Oficyna Wydaw. PWroc., 2007 s. 151-161, 2007.

[18] Peng Z. K. and. Chu F. L: *Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography*. Mech. Sys. and Signal Proc., Volume 18, Issue 2, March 2004, Pages 199-221.

[19] Nikolaou N. G. and Antoniadis I. A.: *Rolling element bearing fault diagnosis using wavelet packets* NDT & E International, Volume 35, Issue 3, April 2002, Pages 197-205.

Radosław ZIMROZ, PhD MSc from Faculty of Electronics (speciality -Acoustics) Wroclaw University of Technology, 1998, PhD (2002) at Mining Faculty, WUT (with honours). Until now with Machinery Systems Group at Institute of Mining Engineering, WUT. 9 months postdoc (2004) at Cranfield University (SOE/PASE/AMAC), UK.

Interest: modelling and diagnostics of gearboxes used in mining industry, vibration signal processing, application of AI methods, adaptive systems.

DIAGNOSTIC SENSITIVITY OF ULTRASONIC MOBILE FLAW DETECTION OF HEAD CHECKING TYPE FLAWS IN RAILWAY RAILS

Piotr LESIAK

Technical University in Radom, Faculty of Transport,
29 Malczewskiego St., 26-600 Radom, e-mail: plesiak@pr.radom.net

Summary

This paper presents analysis of diagnostic sensitivity of ultrasonic mobile testing of railway rails done with the help of measurement car. To verify the concept, most hazardous flaws of head checking type were used. These faults cause multiple rail cracks and fractures. The properties of these flaws and testing procedures have been described together with diagnostic sensitivity analysis on the basis of measurements run on a representative section of railway main line.

Keywords: diagnostic sensitivity, railway rails, ultrasonic tests, head checking flaws.

WRAŻLIWOŚĆ DIAGNOSTYCZNA ULTRADŹWIĘKOWYCH MOBILNYCH BADAŃ WAD TYPU HEAD CHECKING W SZYNACH KOLEJOWYCH

Streszczenie

W pracy przedstawiono analizę wrażliwości diagnostycznej, ultradźwiękowego mobilnego badania szyn kolejowych wagonem pomiarowym. Do weryfikacji wykorzystano niezwykle niebezpieczne wady typu head checking, które powodują liczne pęknięcia i złamania szyn. Omówiono właściwości tych wady, technologię badania oraz przeprowadzono analizę wrażliwości diagnostycznej na podstawie badań reprezentatywnego odcinka magistralnej linii kolejowej.

Słowa kluczowe: wrażliwość diagnostyczna, szyny kolejowe, badania ultradźwiękowe, wady head checking.

1. INTRODUCTION

Railway track is a technical structure exceptionally susceptible to defects, therefore it is subjected to routine diagnostics. We expect the track to be safe and the journey to be comfortable, this is especially important since train speed rise all the time.

When it comes to track quality measurements, ultrasonic mobile diagnostics of rails, conducted with the help of specialised vehicles such as light weight cars and measurement cars [4], is of utmost importance. It is aimed at flaw detection in rails and rail joints of standard, welded and thermite welded types. Rail measurement results should be reliable, since they constitute the basis for making diagnostic decisions during rail operation. In particular, assessment of nearly critical flaws is most important. If such a flaw is not detected or if it not assessed correctly, then it may lead to huge economic losses and put human safety at risk. That is why the author conducts research targeted at improving diagnostic susceptibility of ultrasonic rail diagnostics [6].

The key issue in ultrasonic rail diagnostics is to determine the set of diagnostic signals or signal properties. Analysis of diagnostic sensitivity might be the tool helping to solve this problem [7]. Application of this analysis, using expert knowledge and intuition will be helpful in creating more efficient and effective diagnostic system.

In order to verify these issues, most dangerous flaws of head checking type, which cause numerous rail cracks and fractures have been utilised in this paper [1, 3, 8].

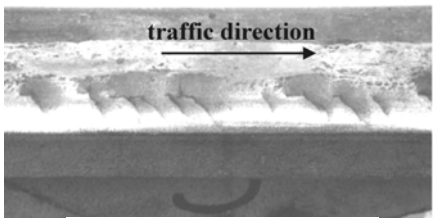
2. PROPERTIES OF HEAD CHECKING FLAWS

Last ten years of 20th century have brought about a whole new class of rail flaws. These have been colloquially called contact stress flaws. The primary cause of these flaws is significant stress occurring in wheel-rail contact zone.

The head checking flaws may be referred to as the classic example of contact stress flaws, they are labelled as 2223 in flaw catalogue [3], Fig. 1. They are present mostly at the rail head inner surface in curves or in straight portions of the track. They arise in places with maximum dynamic action (centrifugal force). These are small cracks seen more or less regularly at 0.5 to 10 mm, at 10 to 15° angles depending on the prevailing rail-wheel contact geometry. When they develop, in some cases they may attain a depth of few mm.

These inconspicuous flaws are characterised by high concentration of stresses in the railhead. Given their cyclic occurrence, they may cause multiple rail fractures. This poses enormous threat to train operation [1].

a)



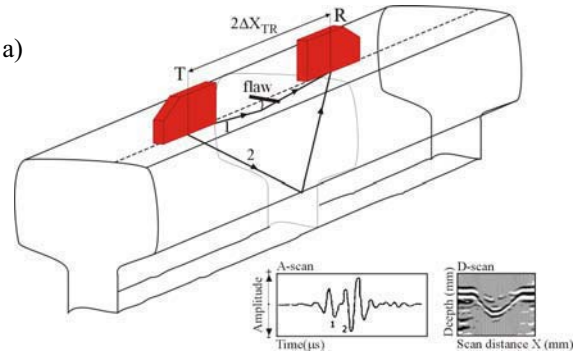
b)

Fig. 1. Characteristic patterns of head checking flaws: a) with surface shining in the flaw zone, b) wear centre at the railhead lateral surface

3. MEASUREMENT BASICS

In PKP measurement car, TOFD method (*Time-Of-Flight Diffraction* -[2]), is used to detect head checking flaws. This method is based on diffraction of ultrasonic waves at the flaw edge - see Fig. 2 [5].

a)



b)

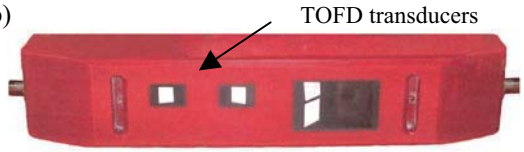


Fig. 2. Probe used for head checking flaws detection, with subsurface transducers, a) measurement principle, b) probe construction

Ultrasonic probe utilising longitudinal subsurface wave with very short impulses is used (so-called wideband probe). Additionally, piezoelectric transducers should be placed as near as possible to each other (small ΔX_{TR}) and shifted in relation to rail longitudinal symmetry axis towards the track centre (Fig. 2b). Electronic circuits must allow for impulse precise time measurements.

In this case, the depth of diffusing fault edge at the nth rail level is equal to:

$$Y_n = \frac{1}{2}\sqrt{(t_o C_L)^2 + 4 t_o C_L \Delta X_{TR}} \qquad (1)$$

where: t_o – delay time of diffractional impulse (1) – Fig. 2a, related to subsurface wave impulse (this wave passes directly between sending transducer T and receiving transducer R),

$2\Delta X_{TR}$ – distance between ultrasonic transducers centres,

C_L - velocity of longitudinal ultrasonic wave in the rail.

Absolute error of flaw edge location, after differentiation, may be calculated from:

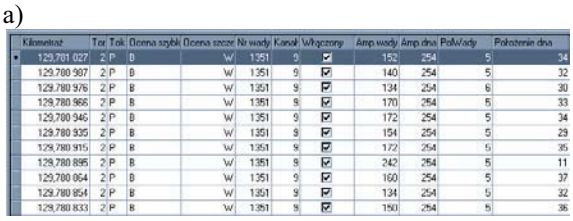
$$\Delta Y_n = \left(\frac{C_L}{2Y_n}\right)\Delta t_o \sqrt{Y_n^2 + \Delta X_{TR}^2} \qquad (2)$$

where: Δt_o - absolute error of time measurement of diffraction impulse location.

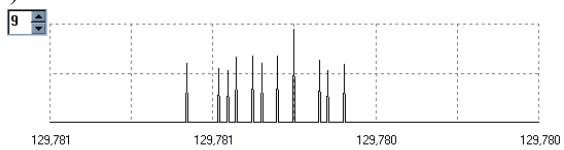
Measurement accuracy decreases for faults located close to the surface, where Y_n is small (in rail track measurement practice, the measurements are achieved for depths greater than 5 mm). This limit is due to the measurement principle and is the most serious drawback of the method.

Example of head checking flaw recording on railway track is shown in Fig. 3. This fault has been recorded by probe #9 (as in Fig. 2), for 194 mm length, it was 5-6 mm deep down into the rail and echo of rail head bottom was equal to 33 mm at the average. In one case there was a reflector present in the head at 11 mm depth.

a)



b)



c)

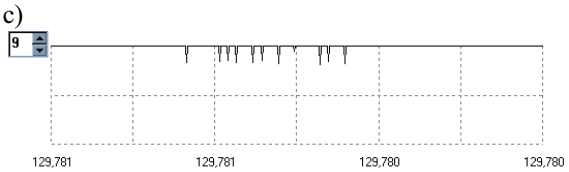


Fig. 3. Recording of head checking flaw with measurement car: a) flaw record window b) flaw amplitude signal, c) flaw depth

4. SENSITIVITY ANALYSIS

The task of diagnostic sensitivity analysis of railway rails is the selection of specified subset from the available set of diagnostic parameters characteristics. These characteristics are measurable indicators of rail technical condition.

Sensitivity ϖ of parameter characteristic Ω to technical condition λ_i of R rail is defined as the relative change of this characteristic's value due to this condition, or [7]:

$$\varpi(\Omega(R)|\lambda_i)=\frac{V(\Omega(R)|\lambda_i)}{V(\Omega(R)|\Lambda)},\Lambda=\{\lambda_1,\lambda_2,...\lambda_I\} \quad (3)$$

where: R – investigated rail, Λ - set of rail technical conditions, λ_i - examined technical condition, $\Omega(R)$ – value changes of the parameter characteristic under investigation, $V(\Omega(R)|\Lambda)$ – maximum value of measure of variability V of parameter characteristic Ω, taking into consideration whole set of conditions, $V(\Omega(R)|\lambda_i)$ - value of measure of variability V of parameter characteristic Ω, determined for investigated technical condition λ_i.

Only two signal characteristics are measured in ultrasonic diagnostics: ultrasonic wave amplitude determined with 8-bit resolution and time of wave flight in the rail (when velocity of the given ultrasonic wave and probe transducer angle are calculated, the fault depth or rail height is obtained – for a standard probe). Imaging precision of geometrical diagnostic parameters is influenced by the distance between successive wave generations by ultrasonic transducer, that is sampling step (in practice it is 2, 5 and 10 mm), and this defines horizontal resolution of fault geometry. Under operational conditions, decreasing sampling step along the rail would cause decrease of testing speed at the track and would affect train traffic, hence biggest sampling step is routinely adopted.

Signal characteristics such as e.g. time vs. ultrasonic wave velocity may be influenced by local changes in rail steel structure, rail temperature or stress; amplitude may be affected by condition of railhead surface, geometrical dimensions of the track and its dynamic properties (quality of acoustic coupling between the probe and the railhead may vary).

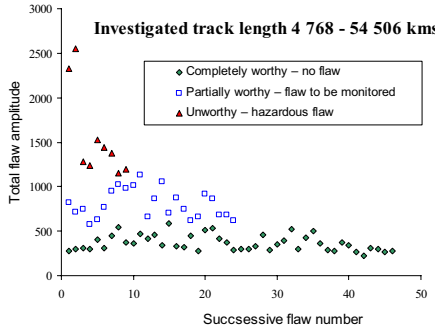
In order to assess the sensitivity of *head checking* flaws, the results of tests carried out with PKP measurement car have been analysed. The measurements were run in 2007 at four tracks with total length of *c.* 200 km, at the mainline with allowable speed limit of 160 km/h - Fig. 4. This line is continuously subjected to modernisation, hence different rails, with different operation time may be found here. Therefore it may be assumed to be representative for analysis purposes.

Classifier automated algorithm has been the basis for assessment of rail technical condition. To increase assessment reliability, the algorithm has been additionally subjected to expert analysis (done by the author of this paper).

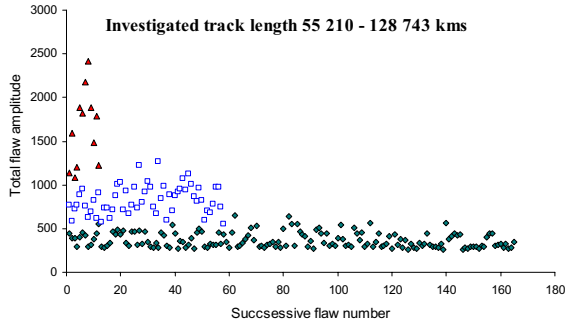
In many cases classification was changed. Different worthiness classes have been assigned to the rails: λ_B – no fault, partial worthiness λ_O – fault to be monitored, unworthiness λ_W – hazardous fault.

Total amplitude of ultrasonic wave $\sum_{m\in R} S_m$ received by the probe in different samples (m longitudinal cross-sections of R rail section) has been adopted as single fault parameter characteristic Ω.

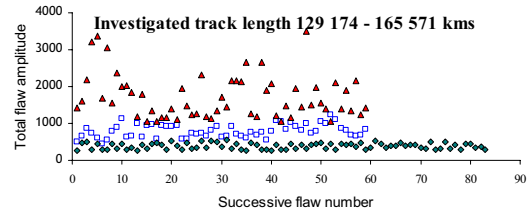
a)



b)



c)



d)

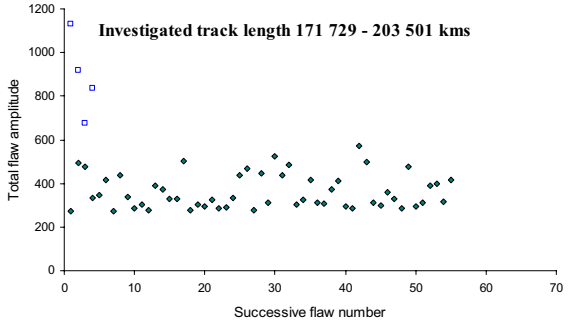


Fig. 4. Results of railway rails mobile tests; rails with head checking flaws

Next, average value of these amplitudes for all detected υ flaws at a given rail section R and classified into every λ_i technical condition under consideration has been determined, i.e. $\frac{1}{\upsilon}\sum_{\upsilon}\sum_{m\in R} S_m$.

Finally, the results for ρ track sections have been summed up (for instance, there were 4 sections in Fig. 4 example).

As a result, starting with formula (3), average sensitivity $\overline{\varpi}$ of flaw signal amplitude S to technical condition λ_i of R rail has been obtained:

$$\overline{\varpi}(S|\lambda_i)=\frac{\sum_{\rho}\left[\frac{1}{\upsilon}\sum_{\upsilon}\sum_{m\in R}S_m|\lambda_i\right]}{\sum_{\rho}\left[\frac{1}{\upsilon}\sum_{\upsilon}\sum_{m\in R}S_m|\Lambda\right]},\ \Lambda=\{\lambda_B,\lambda_O,\lambda_W\} \quad (4)$$

In particular, complete unworthiness of the R rail is important. Therefore changes in signal amplitude arising from several flaw classes have been determined for the summed results of tests seen in Fig. 4. Average sensitivities $\overline{\varpi}(S|\lambda_W)=0.504$, $\overline{\varpi}(S|\lambda_O)=0.34$ i $\overline{\varpi}(S|\lambda_B)=0.153$ have been calculated from Table 1.

Even though the hazardous flaws are characterised by highest possible diagnostic sensitivity, it does not mean that the ultrasonic method is perfect. Alternative diagnostic methods of head checking type flaws are continuously researched [5].

Table 1

track kms	Flaws amplitudes						
	λ_B no flaw		λ_O flaw to be monitored		λ_W hazardous flaw		
	1	2	1	2	1	2	3
4.768 - 54.506	16913	368	19310	805	14114	1568	2741
55.210- 128.743	60878	367	49102	832	20666	1590	2789
129.174- 165 571	31942	384	47055	797	101494	1720	2901
171.729- 203.501	19960	362	3560	890	0	0	1252
Σ		1481		3324		4878	9683

1- sum of amplitudes of all flaws, 2- average amplitude value per flaw, 3- sum of average flaw amplitudes for all rail conditions

5. CONCLUSION

Analysis of diagnostic sensitivity of ultrasonic rail tests is original concept suggested by the author. It is also a proposal for PKP appropriate services to adopt this indicator in order to improve diagnostic system.

During further analyses the length of analysed track should be increased, different line categories should be tested and other than head checking popular flaws should also be analysed.

Other signal characteristics might also be adopted for sensitivity analysis, e.g. value of rail load Q in Tg [8]. These data are given in manual tests results (if available), for hazardous flaws in particular. Hence assessment of rail technical condition might be practically limited to λ_W.

REFERENCES

[1] Bałuch M.: *Interpretacja pomiarów i obserwacji nawierzchni kolejowej*. Monografia nr 79, Wyd. Politechniki Radomskiej, Radom 2005.

[2] ENV 583-6 Non-destructive testing - Ultrasonic examination - Part 6: *Time-of-flight-diffraction technique as a method for detection and sizing of discontinuities.*

[3] *Katalog wad w szynach*, UIC 712R, wydanie IV, styczeń 2002.

[4] Lesiak P.: *Virtual Instruments and Measurement: Diagnostic Systems in Railway Transportation. Part 1. Ultrasonic Diagnostics for Railway Rails*. The Archives of Transport, No 1, Vol. XVIII, 2006, pp. 17-35.

[5] Lesiak P., Moszczyński R.: *Alternative methods of mobile diagnostics of flaws such as head checking in railway rails*. 11TH International Conference, "Computer Systems Aided Science, Industry and Transport", Zakopane 2007, Vol. 1, pp. 461-468.

[6] Lesiak P.: *Metody poprawy podatności diagnostycznej ultradźwiękowych mobilnych badań szyn kolejowych w torze*. Przegląd Komunikacyjny, 5/2007, pp. 28-37.

[7] Sławik D.: *Przykład zastosowania analizy wrażliwości w diagnostyce maszyn*. 3rd International Congress of Technical Diagnostics, Diagnostics` 2004, Diagnostyka, Vol. 30, t. 2, 2004, pp. 101-104.

[8] Towpik K.: I*nfrastruktura drogi kolejowej. Obciążenia i trwałość nawierzchni*. Monograficzna seria wydawnicza Biblioteki Problemów Eksploatacji. Wyd. Politechnika Warszawska, 2006.

Dr inż. **Piotr LESIAK** works as Assistant Professor at the Faculty of Transport in Technical University in Radom. He researches measurement and diagnostic tools for rail transport. His scientific achievements include many technical solutions implemented by railway operators. He has won three awards of Minister of Higher Education and Science for his designs.

IDENTYFIKACJA USZKODZEŃ W UKŁADACH LINIOWYCH

Jan Maciej KOŚCIELNY, Dariusz CHALECKI

Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Instytut Automatyki i Robotyki
ul. św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa, tel.: (22) 234 83 80
jmk@mchtr.pw.edu.pl, dchalecki@mchtr.pw.edu.pl

Streszczenie

Przedstawiono metodę identyfikacji uszkodzeń z wykorzystaniem residuów w postaci wewnętrznej. Założono występowanie uszkodzeń pojedynczych. Identyfikacja bazuje na wykorzystaniu unormowanych sygnatur kierunkowych poszczególnych uszkodzeń. Zamieszczono przykład obliczeniowy.

Słowa kluczowe: identyfikacja uszkodzeń, residuum, sygnatura unormowana, model liniowy.

FAULT IDENTIFICATION IN LINEAR SYSTEMS

Summary

A method of identification of faults based on residuals in the inner form has been presented. Assumption about occurrence of single faults has been undertaken. Fault identification makes use from the normalized directional signatures of particular faults. An appropriate calculation example has been given.

Keywords: fault identification, residual, normalized signature, linear system.

1. WPROWADZENIE

Celem diagnostyki jest rozpoznanie aktualnego stanu technicznego obiektu diagnozowania. Proces diagnozowania można podzielić na trzy etapy:

- detekcję uszkodzeń – wykrywanie wystąpienia uszkodzeń w diagnozowanym obiekcie;
- lokalizację uszkodzeń – określanie rodzaju, miejsca i czasu wystąpienia uszkodzeń
- identyfikację uszkodzeń – określanie rozmiaru i charakteru zmienności uszkodzeń w czasie

Znanych jest wiele metod detekcji i lokalizacji uszkodzeń [1-5], natomiast identyfikacja uszkodzeń, była dotychczas tematem nielicznych prac badawczych [3]. W niniejszym artykule opisano problem identyfikacji uszkodzeń pojedynczych w obiektach opisanych dokładnym zlinearyzowanym modelem matematycznym.

2. OPIS OBIEKTU DIAGNOZOWANIA Z UWZGLĘDNIENIEM WPŁYWU USZKODZEŃ

Do identyfikacji uszkodzeń niezbędna jest znajomość związku między uszkodzeniami oraz wartościami sygnałów diagnostycznych. Związek ten może być określony w wyniku modelowania obiektu z uwzględnieniem wpływu uszkodzeń. Uszkodzenia f traktowane są jako specyficzne wejścia obiektu. Układy rzeczywiste zwykle są nieliniowe, ale dla uproszczenia opisu matematycznego przeprowadza się jego linearyzację, co pozwala na sformułowanie przybliżonego opisu liniowego, ważnego w otoczeniu wybranego punktu pracy na charakterystyce statycznej (punkt ten odpowiada najczęściej nominalnym lub uśrednionym warunkom pracy układu). Powszechnie stosowaną postacią opisu obiektu liniowego (obok równań stanu) jest model transmitancyjny, zwierający układ równań określających zależność poszczególnych wyjść obiektu od wejść i uszkodzeń [1-5]:

$$\mathbf{y}(s) = \mathbf{G}(s)\mathbf{u}(s) + \mathbf{H}(s)\mathbf{f}(s) \qquad (1)$$

gdzie: y – wektor wyjść,
u – wektor wejść,
f –wektor uszkodzeń,
G(s) – macierz transmitancji wyj. – wej.,
H(s) – macierz transmit. wyj. – uszkodzenia.

Poszczególne równania mają postać:

$$y_j(s) = \mathbf{G}_j(s)\mathbf{u}(s) + \mathbf{H}_j(s)\mathbf{f}(s), \qquad (2)$$

przy czym $\mathbf{G}_j(s),\ j = 1,...,J;$ zwiera transmitancje typu wyjście - wejście:

$$G_{jp}(s) = y_j(s)/u_p(s);\ \ p = 1,...,P, \qquad (3)$$

a $\mathbf{H}_j(s), j = 1,...,J;$ transmitancje dla poszczególnych par wyjście - uszkodzenie:

$$H_{jk}(s) = y_j(s)/f_k(s);\quad k = 1,...,K. \qquad (4)$$

Przy braku uszkodzeń spełniona jest zależność: $y_j(s) - \mathbf{G}_j(s)\mathbf{u}(s) = \mathbf{H}_j(s)\mathbf{f}(s) = 0$. Residua wyliczane są z zależności zwanej postacią obliczeniową:

$$r_j(s) = y_j(s) - \mathbf{G}_j(s)\mathbf{u}(s). \qquad (5)$$

Równanie (6) odzwierciedla ogólny związek między danym residuum a uszkodzeniami. Jest to tzw. postać wewnętrzna residuum [1-4].

$$r_j(s) = \mathbf{H}_j(s)\mathbf{f}(s) = H_{j1}(s)f_1(s) + \\ + ... + H_{jk}(s)f_k(s) + ... + H_{jK}(s)f_K(s). \quad (6)$$

Transmitancja $H_{jk}(s)$ określa wrażliwość residuum na dane uszkodzenie:

$$H_{jk}(s) = \frac{r_j(s)}{f_k(s)} = \frac{\delta(r_j)}{\delta(f_k)} \quad (7)$$

Dla wszystkich residuów związek ten możemy przedstawić w postaci tab. 1.

Tab. 1. Postać wewnętrzna residuów

	f_1	...	f_k	...	f_K
r_1	H_{11}		H_{1k}		H_{1K}
...					
r_j	H_{j1}		H_{jk}		H_{jK}
…					
r_J	H_{J1}		H_{Jk}		H_{JK}

Opis wpływu uszkodzeń na wartości residuów w postaci wewnętrznej (6) lub tab. 1 określa wrażliwość residuów na poszczególne uszkodzenia nie tylko jakościowo lecz również ilościowo. Sygnatura uszkodzenia jest określona przez kolumnę tab.1, odpowiadającą danemu uszkodzeniu.

Na podstawie transmitancji $H_{jk}(s)$ można wyznaczyć wzmocnienie residuum uszkodzeń na dane uszkodzenie:

$$c_{jk} = \lim_{s\to 0} H_{jk}(s). \quad (8)$$

Zwykle transmitancje $H_{jk}(s)$ mają charakter statyczny (nie zawierają członów całkujących), co oznacza, że granica (8) ma wartość skończoną. W przypadku transmitancji zawierających człony całkujące (astatycznych), granica (8) jest równa nieskończoności z odpowiednim znakiem.

Wektor wzmocnień residuów odpowiadających danemu uszkodzeniu (tab. 2) określa pewien kierunek w przestrzeni residuów (zwanej przestrzenią parzystości), charakterystyczny dla danego uszkodzenia. Jest to podstawą metody residuów kierunkowych (*ang. directional residual*) [1-5].

Tab. 2. Sygnatury kierunkowe

	f_1	...	f_k	...	f_K
r_1	c_{11}		c_{1k}		c_{1K}
...					
r_j	c_{j1}		c_{jk}		c_{jK}
…					
r_J	c_{J1}		c_{Jk}		c_{JK}

3. UNORMOWANE SYGNATURY USZKODZEŃ

Wartości residuów można unormować indywidualnie dla każdego z uszkodzeń, dzieląc je przez wartość wzmocnienia residuum na dane uszkodzenie:

$$r^*_{jk}(t) = \frac{r_j(t)}{c_{jk}}. \quad (9)$$

Celem normalizacji jest uzyskanie niezależności residuum od wzmocnienia uszkodzenia c_{jk}. Po normalizacji dla *k*-tego uszkodzenia uzyskujemy równanie *j*-tego residuum w postaci:

$$r_j(s) = \frac{H_{j1}(s)}{c_{jk}} f_1(s) + ... + \\ + \frac{H_{jk}(s)}{c_{jk}} f_k(s) + ... + \frac{H_{jK}(s)}{c_{jk}} f_K(s)$$

gdzie:

$$\frac{H_{jk}(s)}{c_{jk}} = H^*_{jk}, \quad (10)$$

przy czym H^*_{jk} jest transmitancją unormowaną o wzmocnieniu równym 1.

Macierz transmitancji unormowanych (tab. 3) wyznacza unormowane sygnatury poszczególnych uszkodzeń, którym odpowiadają poszczególne kolumny w tab. 3.

Tab. 3. Sygnatury dynamiczne

	f_1	...	f_k	...	f_K
r_1	H^*_{11}		H^*_{1k}		H^*_{1K}
...					
r_j	H^*_{j1}		H^*_{jk}		H^*_{jK}
…					
r_J	H^*_{J1}		H^*_{Jk}		H^*_{JK}

4. IDENTYFIKACJA USZKODZEŃ

Załóżmy występowanie uszkodzeń pojedynczych. W przypadku wystąpienia *k*-tego uszkodzenia wzór (6) upraszcza się do postaci:

$$r_j(s)\big|_{f_k} = H_{jk}(s)f_k(s), \\ f_m = 0,\ m = 1,2,...,K,\ m \neq k \quad (11)$$

Przebieg czasowy residuum nieznormalizowanego można wyznaczyć, przy znajomości funkcji $f_k(t)$, na podstawie odwrotnego przekształcenia Laplace'a:

$$r_j(t) = L^{-1}r_j(s) = L^{-1}[H_{jk}(s)f_k(s)]. \quad (12)$$

Dla obiektów statycznych i uszkodzeń o wartości skończonej, residuum przy $t \to \infty$ będzie dążyło do wartości ustalonej. W stanie ustalonym

residuum przyjmuje wartość zależną od wzmocnienia oraz wartości uszkodzenia:

$$\begin{aligned}&\lim_{t\to\infty} r_j(t)\Big|_{f_k} = \lim_{s\to 0} s r_j(s)\Big|_{f_k} = \lim_{s\to 0} sH_{jk}(s) f_k(s)\\ &= \lim_{s\to 0} sc_{jk} H^*_{jk} \frac{1}{s} f_{kU} = c_{jk} f_{kU}\end{aligned} \tag{13}$$

gdzie: f_{kU} – wartość uszkodzenia w stanie ustalonym.

Po normalizacji, w stanie ustalonym, wartość residuum dla obiektów statycznych jest równa wartości uszkodzenia:

$$\lim_{t\to\infty} r^*_{jk}(t) = \lim_{s\to 0} sH^*_{jk} \frac{1}{s} f_{kU} = f_{kU}\,. \tag{14}$$

Zatem dla obiektów statycznych i dowolnego *k*-tego uszkodzenia wartości wszystkich residuów unormowanych, wrażliwych na to uszkodzenie powinny być w stanie ustalonym jednakowe i równe wartości uszkodzenia. Stwierdzenie to jest słuszne tylko w przypadku idealnych modeli obiektu oraz braku szumów pomiarowych i zakłóceń. W praktyce należy zakładać, że wartości residuów powinny mieć zbliżone wartości. Z zależności (14) wynikają następujące reguły wnioskowania:

$$\begin{aligned}&IF[r^*_{ak}(t\to\infty)\neq 0]\cong\\ &\cong [r^*_{jk}(t\to\infty)]\cong \ldots \cong THEN\ f_k\end{aligned} \tag{15}$$

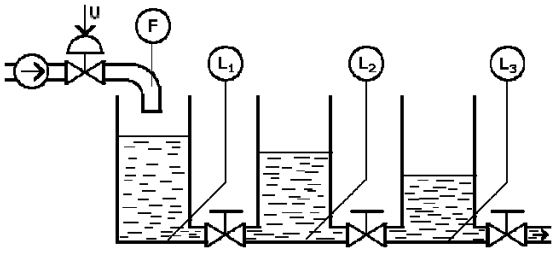
Wyrażenia $[r^*_{ik}(t\to\infty)\neq 0]$ w regule (15) występują dla wszystkich residuów unormowanych, wrażliwych na uszkodzenie wskazywane w konkluzji reguły.

Diagnoza wskazuje nie tylko uszkodzenie, ale także jego rozmiar:

$$f_{kU} = r^*_{ik}(t\to\infty) = r^*_{jk}(t\to\infty)\,. \tag{16}$$

5. PRZYKŁAD

Przeprowadzono badania symulacyjne identyfikacji uszkodzeń dla zespołu trzech zbiorników pokazanego na rys. 1.



Rys. 1. Zespół trzech zbiorników

Zespół trzech zbiorników opisany jest równaniami:

$$F = F_{\max}\cdot X(U) \tag{17a}$$

$$F = A\frac{dL_1}{dt} + \alpha_{12}S_{12}\sqrt{2g(L_1 - L_2)} \tag{17b}$$

$$\begin{aligned}&\alpha_{12}S_{12}\sqrt{2g(L_1 - L_2)} =\\ &= A\frac{dL_2}{dt} + \alpha_{23}S_{23}\sqrt{2g(L_2 - L_3)}\end{aligned} \tag{17c}$$

$$\alpha_{23}S_{23}\sqrt{2g(L_2 - L_3)} = A\frac{dL_3}{dt} + \alpha_3 S_3\sqrt{2gL_3}\,, \tag{17d}$$

gdzie:

F, $F_{\max}$ – przepływ bieżący i wydatek pompy;

$X(U)$ – charakterystyka statyczna zaworu (X – pozycja otwarcia zaworu, U – sygnał sterujący);

A, L – pole powierzchni lustra cieczy i poziom cieczy w zbiorniku;

α, S – współczynnik przepływu cieczy przez kanał i pole przekroju kanału;

g – stała grawitacji.

Rozważone zostaną dwa uszkodzenia, nierozróżnialne na podstawie binarnej macierzy diagnostycznej [4]. Są to uszkodzenie toru pomiarowego poziomu L_3 w zbiorniku 3 (f_L) i przytkanie kanału S_{23} pomiędzy zbiornikami 2 i 3 (f_S). Na oba te uszkodzenia są wrażliwe residua utworzone na podstawie równań (17c i d) z uwzględnieniem wpływu uszkodzeń:

$$\begin{aligned}&\alpha_{12}S_{12}\sqrt{2g(L_1 - L_2)} =\\ &= A\frac{dL_2}{dt} + (\alpha_{23}S_{23} - f_S)\sqrt{2g[L_2 - (L_3 + f_L)]}\end{aligned} \tag{18a}$$

$$\begin{aligned}&(\alpha_{23}S_{23} - f_S)\sqrt{2g[L_2 - (L_3 + f_L)]} =\\ &= A\frac{dL_3}{dt} + \alpha_3 S_3\sqrt{2g(L_3 + f_L)}\end{aligned} \tag{18b}$$

Po linearyzacji modelu w punkcie pracy i przejściu do dziedziny zmiennej zespolonej s uzyskujemy równania residuów w postaci obliczeniowej (19) i wewnętrznej (20).

$$r_{1o} = L_2(s) - \frac{k_1}{T_2 s + 1}L_1(s) - \frac{k_3}{T_2 s + 1}L_3(s) \tag{19a}$$

$$r_{2o} = L_3(s) - \frac{k_2}{T_3 s + 1}L_2(s) \tag{19b}$$

$$r_{1w} = \frac{k_L}{T_2 s + 1}f_L(s) + \frac{k_{S1}}{T_2 s + 1}f_S(s) \tag{20a}$$

$$r_{2w} = -f_L(s) - \frac{k_{S2}}{T_3 s + 1}f_S(s) \tag{20b}$$

Residua unormowane uzyskamy dzieląc poszczególne residua przez wartości wzmocnień. W stanie ustalonym residua w postaci wewnętrznej są następujące:

$$r_{1wL} = f_L(s) + \frac{k_{S1}}{k_L}f_S(s) \tag{21a}$$

$$r_{2wL} = f_L(s) + k_{fS2}f_S(s) \tag{21b}$$

$$r_{1wS} = \frac{k_L}{k_{S1}}f_L(s) + f_S(s) \tag{21c}$$

$$r_{2wS} = \frac{1}{k_{S2}} f_L(s) + f_S(s). \qquad (21d)$$

Dla celów symulacji założono wartość poziomu L_3 = 0,5 m. Określono punkt pracy zespołu trzech zbiorników w stanie zdatności, wykorzystując w tym celu model w postaci (17):

L_{10} = 0,722 [m], L_{20} = 0,611 [m], L_{30} = 0,5 [m], F_0 = 0,00207 [m^3/s].

Iloczyny współczynników αS wynoszą:

$\alpha_{12}S_{12}$ = 0,0014 [m^2], $\alpha_{23}S_{23}$ = 0,0014 [m^2], $\alpha_3 S_3$ = 0,00066 [m^2],

Uszkodzenie f_L objawiło się błędnym wskazaniem przetwornika L_3 – mniejszym o 0,05 m od rzeczywistego, czyli L_3 = 0,45 m. Stałe wzmocnienia wynoszą:

k_1 = 0,5, k_2 = 0,818, k_3 = 0,5, k_L = 0,5, k_{S1} = 79,286 [m^{-1}], k_{S2} = 129,95 [m^{-1}].

Wartości residuów r_{1o} i r_{2o} w stanie ustalonym przy braku uszkodzeń są równe lub zbliżone do zera:

$$r_{1o} = L_{20}(s) - k_1 L_{10}(s) - k_3 L_{30}(s) = 0$$
$$r_{2o} = L_{30}(s) - k_2 L_{20}(s) = 2 \cdot 10^{-4},$$

Wystąpienie uszkodzenia f_L objawia się następująco:

$$r_{1o} = L_2(s) - k_1 L_1(s) - k_3 L_3(s) = 0{,}025$$
$$r_{2o} = L_3(s) - k_2 L_2(s) = -0{,}0498 .$$

Po skorzystaniu z wzorów (22):

$$f_L(r_{1o}) = \frac{r_{1o}}{k_L} = \frac{r_{1w}}{k_L} = 0{,}05 \text{ [m]}$$

$$f_L(r_{2o}) = \frac{r_{2o}}{-1} = \frac{r_{2w}}{-1} = 0{,}0498 \text{ [m]}$$

$$f_S(r_{1o}) = \frac{r_{1o}}{k_{S1}} = \frac{r_{1w}}{k_{S1}} = 3{,}2 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$$

$$f_S(r_{2o}) = \frac{r_{2o}}{-k_{S2}} = \frac{r_{2w}}{-k_{S2}} = 3{,}9 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$$

Jak widać dla uszkodzenia f_L wartości są prawie identyczne i dalekie od zera (w skali od 0 do 1 m), natomiast dla uszkodzenia f_S różnią się od siebie o ok. 0,7 cm^2, czyli aż o ok. 22%. Stąd wniosek, że wystąpiło uszkodzenie f_L, a jego wartość wynosi:

$$f_L = \frac{f_L(r_{1o}) + f_L(r_{2o})}{2} = 0{,}0499 \text{ [m]}.$$

6. PODSUMOWANIE

Przedstawiona metoda umożliwia identyfikację, czyli określenie rozmiaru uszkodzeń pojedynczych. Pokazano, że możliwe jest określenie rozmiaru uszkodzenia w jednostkach fizycznych, nawet dla uszkodzeń nierozróżnialnych na podstawie binarnej macierzy diagnostycznej. Praktyczne zastosowanie proponowanego algorytmu wymaga jednak znajomości modelu uwzględniającego wpływ uszkodzeń na wyjścia obiektu. Modele takie mogą zostać opracowane jedynie dla stosunkowo prostych urządzeń lub aparatów technologicznych. Innym ograniczeniem jest wymóg stałości punktu pracy obiektu. Wynika to ze stosowania linearyzacji równań w punkcie pracy obiektu. Możliwe jest jednak uogólnienie metody, polegające na wnioskowaniu z wykorzystaniem residuów w postaci nieliniowej.

LITERATURA

[1] Chen J., Patton R. J. (1999): *Robust model based fault diagnosis for dynamic systems*. Kluver Akademic Publishers, Boston.

[2] Gertler J.: (1998). *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. Marcel Dekker, Inc. New York - Basel - Hong Kong.

[3] Korbicz J., Kościelny J. M., Kowalczuk Z, Cholewa W.: (2002). *Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencj*i. Zastosowania. WNT, 2004.

[4] Kościelny J. M.: (2001). *Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych*. Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa.

[5] Patton R., Frank P., Clark R. (Eds.): (2000). *Issues of fault diagnosis for dynamic systems.* Springer.

Prof. dr hab. inż. **Jan Maciej KOŚCIELNY** jest zatrudniony w Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej. Prowadzi badania w zakresie diagnostyki procesów przemysłowych i układów mechatronicznych oraz systemów automatyki tolerujących uszkodzenia. Kierował pracami badawczymi, w wyniku których opracowano i wdrożono w przemyśle systemy monitorowania i diagnostyki procesów. Jest członkiem Komitetu Automatyki i Robotyki PAN, International Editorial Board czasopisma naukowego International Journal of Applied Mathematics and Computer Science oraz redaktorem działowym czasopisma Pomiary-Automatyka-Kontrola.

Mgr inż. **Dariusz CHALECKI** – doktorant w Instytucie Automatyki i Robotyki na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Absolwent tego wydziału. Zajmuje się diagnostyką, a w szczególności identyfikacją uszkodzeń.

WIELOKRYTERIALNY SYSTEM OCENY BEZPIECZEŃSTWA I KOMFORTU JAZDY WAGONÓW POCIĄGU

Leonel CASTAÑEDA*, Bogdan ŻÓŁTOWSKI**

*EAFIT University in Medellín–Colombia
**Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Mechaniczny

Streszczenie

Artykuł przedstawia procedurę metodologii opracowania i weryfikacji praktycznej wielokryterialnego systemu oceny bezpieczeństwa ruchu i komfortu jazdy wagonów pociągu METRA, przy wykorzystaniu do tego miar stanu dynamicznego jego zespołów, dla potrzeb dynamicznego systemu eksploatacji.

Słowa kluczowe: system diagnostyczny, stan techniczny, bezpieczeństwo, komfort, stan dynamiczny, wartości graniczne, okresowość diagnozowania.

MULTIDIMENSIONAL SYSTEM FOR EVALUATING THE SAFETY AND COMFORT TRAVELLING ON RAILWAY VEHICLES

Summary

This article presents the results the methodology to elaborate and to verify a multicriterial system for the evaluation of the safety and comfort travelling of the vehicles Metro type through measurements of the dynamic state of the wheel sets in order to develop a system of dynamic exploitation under motion.

Keywords: diagnostic system, technical condition, safety, comfort, dynamic state, symptoms of the state, boundary value, periodicity of diagnostic.

WPROWADZENIE

Nowe generacje systemów kolejowych pojazdów szynowych - zarówno pojazdów trakcyjnych jak i wagonów pasażerskich są bogato wyposażone w urządzenia elektroniczne, specjalizowane komputery pokładowe, czujniki elektroniczne, sensory, monitory kontrolne i in. Stwarza to szereg nowych wyzwań w obszarze utrzymania ich w stanie zdatności i bezpieczeństwa ruchu. Najważniejsze kryteria do oceny stanu zdatności nowoczesnych pociągów dotyczą: miar bezpieczeństwa obiektu, sposobów ustalania "słabych ogniw" obiektu, metod wyznaczania prawdopodobieństwa uszkodzeń, kosztów naprawy uszkodzenia i coraz częściej - kryterium komfortu użytkowania obiektu [1, 2, 3, 4, 5, 6].

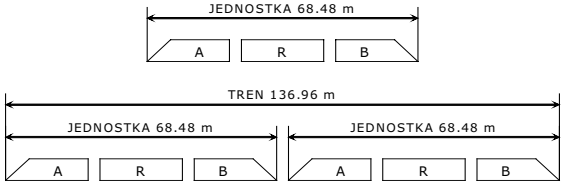
Problem główny tego opracowania obejmuje potrzebę weryfikacji przydatności do konkretnych zastosowań istniejącej normy UIC – 518, uaktualnienie jej zaleceń dla warunków konkretnej sytuacji eksploatacyjnej (miejsce, warunki, kryteria) oraz wskazanie zaleceń w obszarze bezpieczeństwa ruchu, komfortu jazdy i monitorowania zmian stanu technicznego.

Do rozwiązania tak postawionego zadania narzędziem podstawowym w opracowaniu różnych kryteriów stanu zdatności systemu pociągów METRA są metody i środki nowoczesnej diagnostyki technicznej, co w tej pracy znalazło szczególne zastosowanie. Dotyczy to zarówno implementacji wielu teoretycznie istniejących światowych propozycji, jakże często tylko literaturowych, metod, miar i procedur diagnostycznych, jak i opracowanie nowych metod i sposobów pozyskiwania i przetwarzania informacji diagnostycznej w szczególnych warunkach eksploatacji systemu pojazdów METRA.

1. OBIEKTY BADAŃ

Problemy główne tego opracowania skupiają się na zagadnieniach związanych z podstawowymi obiektami badań, którym jest system kolejowy pociągów METRA. Jest to system kolejowy zakupiony i uruchomiony w maju 1979 roku w MEDELLIN, stolicy departamentu Antioquia w Kolumbii.

Metro w Medellin ma 42 zestawy pociągów, po trzy wagony pasażerskie na każdą jednostkę. Struktura każdego z wagonów opiera się na dwóch wózkach podwoziowych. Pojazdy zasilające "A" i "B" maja identyczną konstrukcję wagonu i kabiny pilota oraz pojazd "R", który jest przyczepą i nie ma napędu (rys. 1).



Rys. 1. Struktura pociągu metra [1].

1.1. System utrzymanie ruchu pociagów Metra

Utrzymanie zdatności systemu transportowego METRA w zakresie bezpieczeństwa ruchu, komfortu jazdy oraz w zakresie zdatności technicznej głównych zespołów mechanicznych i elektrycznych badanego systemu jest realizowane w przedsiębiorstwie w ramach obowiązującego planowo - zapobiegawczego systemu obsługiwań technicznych [2].

Czynności utrzymania ruchu i stanu zdatności pojazdu pasażerskiego są następujące:

- kontrolna wizualizacja i sprawdzenie funkcjonalności poszczególnych urządzeń pojazdu,
- inspekcja i rewizja danych,
- demontaż, oczyszczanie, ocena stanu i naprawy,
- wymiana elementów, zakup, montaż,
- testy funkcjonowania zespołów pociągu,
- pomiar i profilowanie kół,
- jakość utrzymania podtorza i torów.

Czynności utrzymania ruchu pociągu, które mają największy wpływ na decyzje dotyczące rozkładu pracy, to głównie pomiar parametrów geometrycznych zestawu oś – koła. Nadzorowane w eksploatacji parametry geometryczne kół przykładowo pokazane zostały na rys. 2.

1.2. Ocena bezpieczeństwa i komfortu

Systemy kolejowe są oceniane w aspekcie bezpieczeństwa i komfortu jazdy poprzez pomiar przyspieszenia i sił działających na różne masy zawieszone i podparte pojazdów pasażerskich. Norma UIC - 518 przedstawia procedury do oceny bezpieczeństwa ruchu nowych pociągów, które opisują sposób akwizycji, rejestracji, analizy i porównywania miar dynamicznych do ich odpowiednich wartości granicznych.

Norma UIC - 518 przedstawia dwie metody wykorzystywane do pomiaru i oceny bezpieczeństwa ruchu[4]:

- normalna metoda pomiaru: sił Y i Q w miejscu współdziałania koło-szyna i przyspieszenia na wagonie pojazdu,
- uproszczona metoda pomiaru: sił poprzecznych H w zestawie oś-koło i/lub pomiaru przyspieszenia na zestawie oś-koło, ramy wózka i wagonu pojazdu (rys. 3).

Według normy UIC - 518 do oceny bezpieczeństwa ruchu pociągu na odcinkach prostych i krzywych istnieje równanie opisujące w kategoriach mierzonych sygnałów stan badanych grup odcinków. Pozwala ono na obliczenie maksymalnej wartości mierzonych wielkości na estymowanych wszystkich odcinkach toru – prostych lub krzywych, według zależności [4]:

$$\hat{x}_{\max} = \overline{x} + kS \tag{1}$$

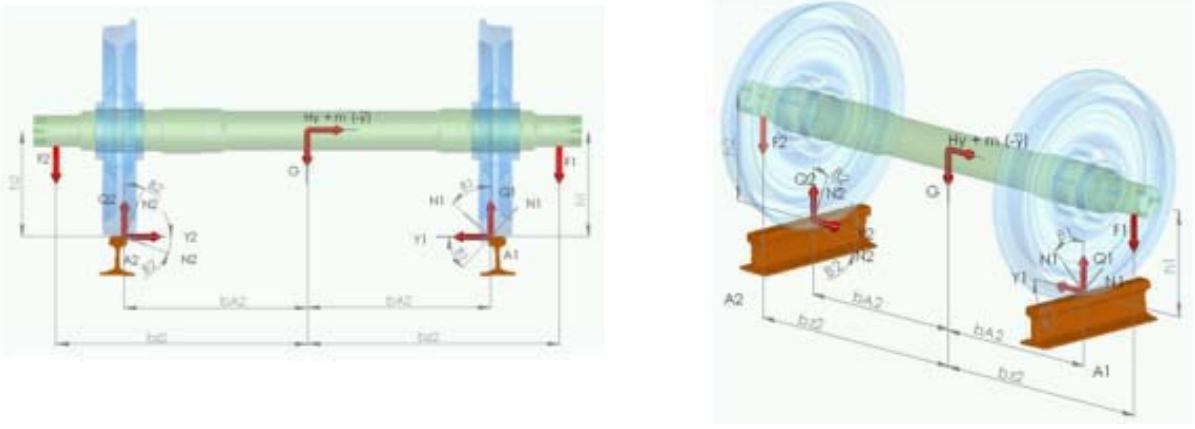
gdzie:

$\overline{x}$ – wartość średnia mierzonych danych na badanych odcinkach;

S – odchylenie standardowe na badanych odcinkach;

k – współczynnik ufności.

Rys. 2. Parametry geometryczne koła i szyny [3]

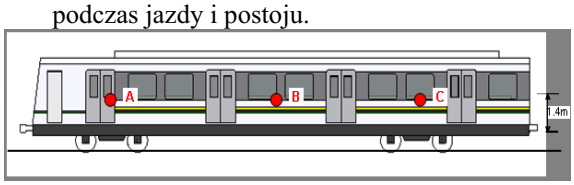


Rys. 3. Rozkład sił zestawu oś-koło na szynę

1.3. Ocena poziomu hałasu

Podczas wzrostu zużycia i starzenia systemu kolejowego można zaobserwować wzrost energii procesów towarzyszących (termicznych i wibroakustycznych), które wpływają negatywnie na środowisko naturalne. Poziom hałasu jest jednym z parametrów kontrolowanych w systemach kolejowych do oceny komfortu pasażerów i wpływu na osoby z otoczenia. Badania poziomu hałasu w systemach kolejowych klasyfikuje się następująco [5]:

- badanie poziomu hałasu wewnątrz pociągu podczas jazdy i postoju,
- badanie poziomu hałasu na zewnątrz pociągu podczas jazdy i postoju.



Rys. 4. Punkty pomiarowe hałasu wewnątrz pojazdu podczas postoju

2. METODOLOGIA BADAŃ SYSTEMU TRANSPORTOWEGO METRA

Dla zrealizowania zadania budowy i weryfikacji przydatności wielokryterialnego systemu oceny bezpieczeństwa i komfortu jazdy wagonów pociągu systemu transportowego METRA proponuje się przyjęcie toku postępowania przedstawionego na rys. 5. Ujmuje on metodologię analizy procesów wibroakustycznych dla oceny bezpieczeństwa i komfortu jazdy w systemach kolejowych oraz ich procesy zużyciowe oceniane przy pomocy cech geometrycznych układu koło-szyna.

2.1. Wybór punktów pomiarowych

Teoretyczne przesłanki prowadzenia badań w obecności zakłóceń uzasadniają wagę właściwego wyboru punktów pomiarowych, szczególnie dla pomiarów drgań obiektów rozległych.

Najlepsze punkty do oceny stanu technicznego wagonu kolejowego to są te, które mają największą ilość informacji i max. pole pod krzywą funkcji koherencji [6]. Oceniane są one miarami:

- ilością informacji między punktami zdefiniowaną jako:

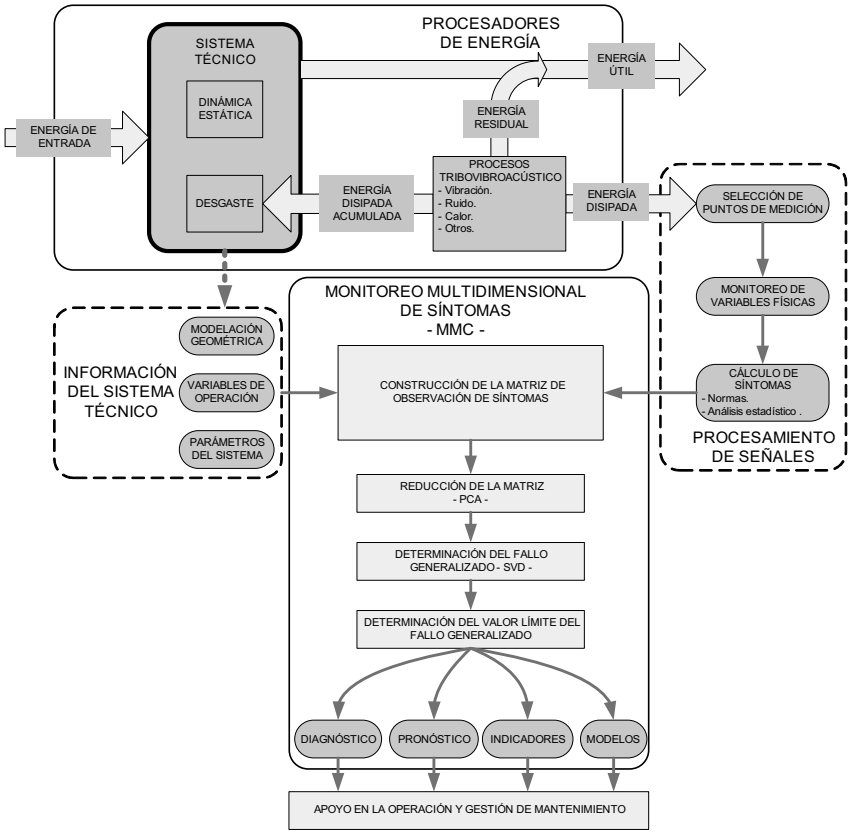
$$In_{xy}(\Theta_i) = \sum_{x=1}^{l} \lg \frac{1}{1-\gamma^2_{mn}(f_x, \Delta f_x, \Theta_i)} \qquad (2)$$

- polem pod krzywą funkcji koherencji:

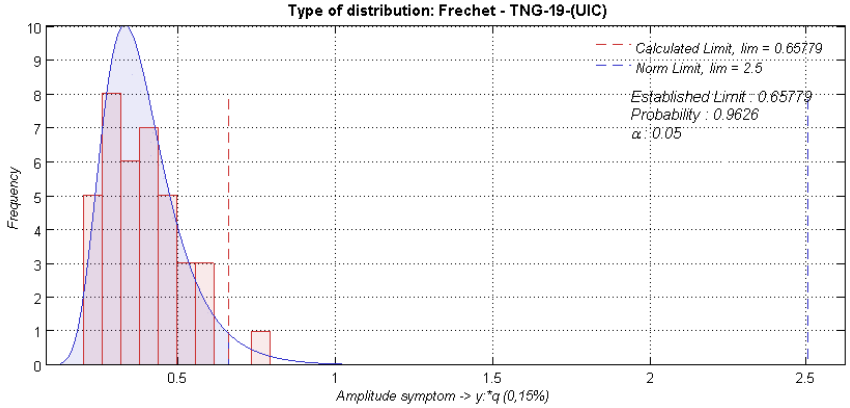
$$A\gamma^2_{xy} = \int_0^F \gamma^2_{xy}(f)\,dF \qquad (3)$$

2.2. Wyznaczanie wartości granicznych

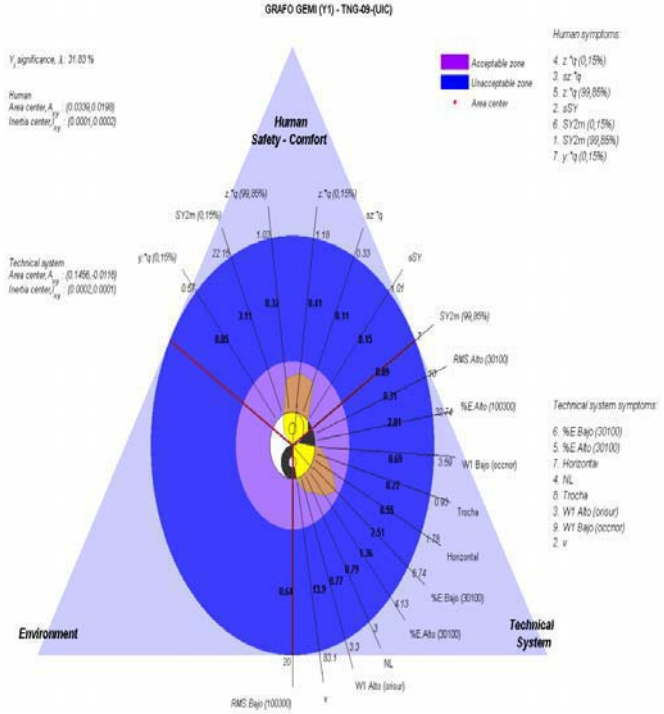
Do celu określenia stanu technicznego badanego obiektu konieczna jest znajomość wartości granicznych wszystkich parametrów diagnostycznych, charakteryzujących dynamikę pojazdu kolejowego (rys. 6).



Rys. 5. Diagram realizacji zadań do budowy wielokryterialnego systemu



Rys. 6. Diagram częstości estymatora UIC-518 do oceny komfortu pojazdu pasażerskiego



Rys. 7. Graficzna reprezentacja wektora własnego Y1

Wartość graniczną symptomu diagnostycznego wyznacza się z zależności [6]:

$$S_g \le \overline{S} \pm \sigma_s \sqrt{\frac{P(z)}{2 \cdot A}} \qquad (4)$$

gdzie: S_g – wyznaczana wartość graniczna symptomu diagnostycznego, $\overline{S}$ – wartość średnia symptomu z liczby N obserwacji obiektów, σ_s – odchylenie standardowe symptomu.

2.3. Redukcja informacji w eksperymencie biernym

W procedurze wyboru najlepszych miar wykorzystano podstawy metodyki badania składowych głównych wektora obserwacji PCA (Principal Component Analysis), często już wykorzystywanej do redukcji przestrzeni macierzy obserwacji symptomów różnych maszyn. Dokonuje się tu wyboru reprezentatywnych i zorientowanych uszkodzeniowo wielkości składowych modelu diagnostycznego obiektu (rys. 7).

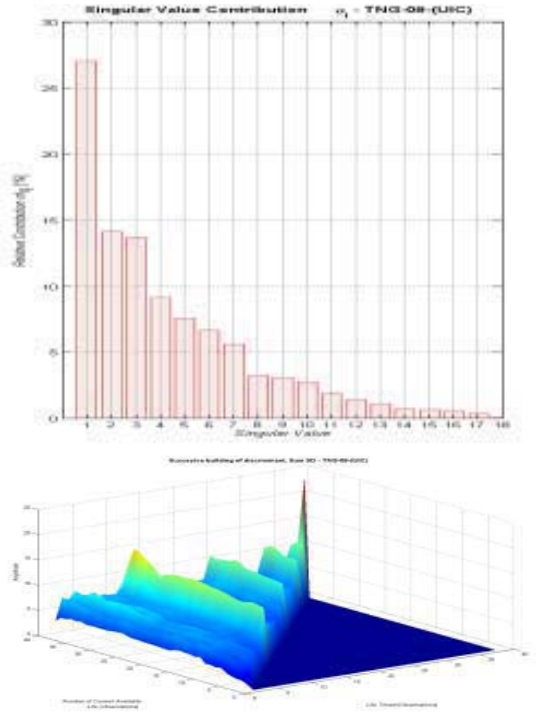
2.4. Metoda rozkładu względem wartości szczególnych SVD dla detekcji i lokalizacji uszkodzeń

Metodę SVD wykorzystuje się do ekstrakcji wielowymiarowej informacji o zużyciu obiektu (rys. 8). Aby uzyskać ogólny profil uszkodzenia systemu technicznego o przebiegu zużycia w obiekcie (suma wszystkich dyskryminant SD_t) wykorzystuje się zależność:

$$SD(\theta) = \sum_{i=1}^{z} SD_i(\theta) = \sum_{i=1}^{z} \sigma_i(\theta) \cdot u_i(\theta) = P(\theta) \qquad (5)$$

Natomiast dla uzyskania wartości ogólnej wektora uszkodzenia o zaawansowaniu zużycia w obiekcie (sumy wszystkich wartości szczególnych σ_t) używa się relacji [7]:

$$DS(\theta) = \sum_{i=1}^{z} \sigma_i(\theta) \sim \sum_{i=1}^{z} F(\theta)_i = F(\theta) \qquad (6)$$



Rys. 8. Udział procentowy wartości szczególnych otrzymanych z SVD z profilem i zaawansowaniem ogólnego uszkodzenia systemu

2.5. Metoda wyznaczania funkcji niezawodności symptomowej systemu METRA

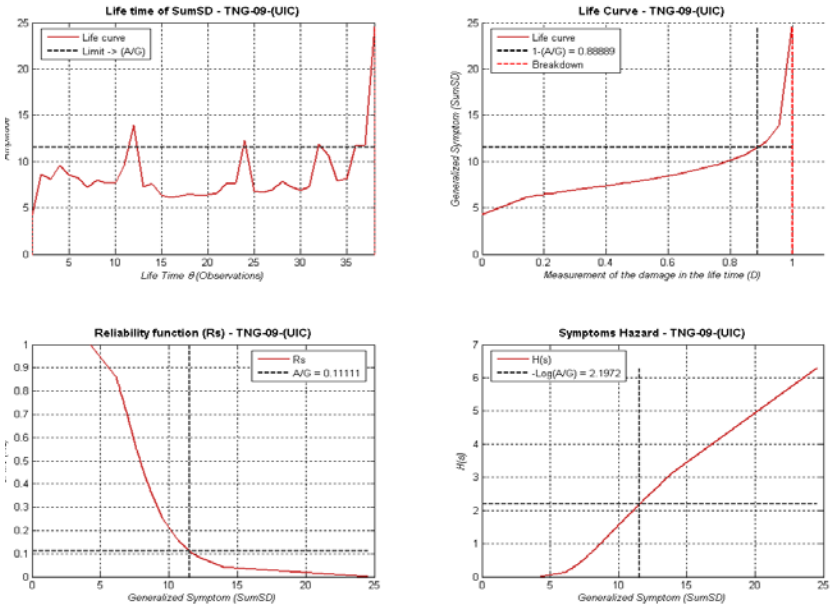
Wyniki badań niezawodności 37 badanych odcinków prostych wskazują, że te odcinki, które mają wartość symptomu ponad 11.5, muszą być koniecznie poddane czynnościom utrzymania toru, aby przywrócić je do stanu zdatności, gotowości wymaganej przez przedsiębiorstwo [7, 8]. Funkcje niezawodności symptomowej R(S), energetycznej miary destrukcji D i ryzyka symptomowego H(S) zaczynają zmieniać się przy wartości ogólnego uszkodzenia bliskiej 5 (rys. 9).

2.6. Prognozowanie terminu kolejnych badań

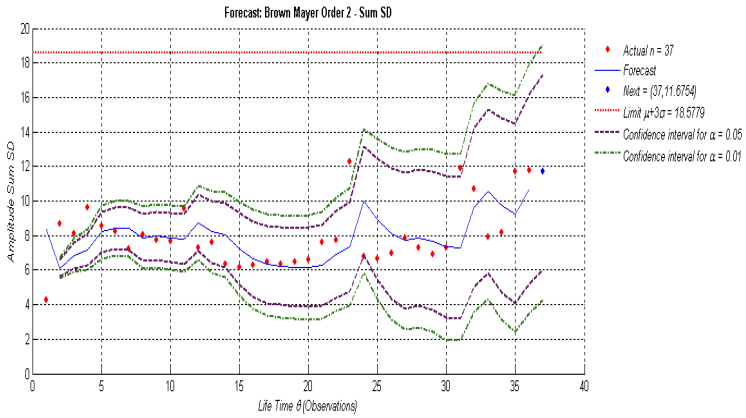
W celu poprawnego funkcjonowania strategii eksploatacji pociągów METRA według stanu technicznego istnieje potrzeba opracowania metody wyznaczania optymalnej prognozy stanu technicznego (PST) jako terminu następnego diagnozowania zespołów pojazdu (rys. 10).

3. PRZENOŚNY SYSTEM DIAGNOSTYCZNY - PSD

Realizacja wszystkich zadań tej procedury umożliwiła opracowanie i wykonanie przenośnego systemu diagnostycznego. PSD pozwala oceniać stan bezpieczeństwa i komfortu jazdy, a także za pomocą estymatorów związanych z oceną bezpieczeństwa i komfortu umożliwia detekcję uszkodzenia w układzie koło-szyna na całej trasie systemu kolejowego [8]. To pozwala na optymalizację wszystkich czynności utrzymania zdatności wagonów, utrzymania zdatności torowiska, oceny współdziałania układu koło-szyna, dając przesłanki do przechodzenia na strategię według stanu technicznego(rys. 11).



Rys. 9. Funkcja niezawodności symptomowej R(S), energetyczna miara destrukcji D oraz ryzyko symptomowe H(S) dla badanych odcinków prostych



Rys. 10. Wyznaczanie kolejnego terminu diagnozowania za pomocą metody Browna Mayera rzędu II [8]

Rys. 11. Analizowanie danych i generowanie raportów do podjęcia decyzji

WNIOSKI

W badaniach tego opracowania podjęto problem stworzenia i weryfikacji praktycznej wielokryterialnego systemu oceny bezpieczeństwa ruchu i komfortu jazdy wagonów pociągów METRA. Opracowany system ocenowy odbiega w swym zakresie od wymagań normy UIC-518 w zakresie wymagań odnośnie warunków realizacji badań oraz zakresu badań.

Zaproponowany system badań stanu METRA został przystosowany do rzeczywistych warunków eksploatacji i wykorzystuje zarówno zalecane normą UIC-518 jak i nowe estymatory stanu drganiowego. Także finalny produkt tej pracy w postaci przenośnego systemu diagnostycznego wdrożonego do systemu eksploatacji pociągów METRA, umożliwia wprowadzenie diagnostycznego systemu eksploatacji w przedsiębiorstwie METRO w Medellin.

LITERATURA

[1] Marin S., Augusto L.: *Implementación de la norma UIC 518 en vehículos de pasajeros para el Metro de Medellín*. Universidad EAFIT. Medellin, Colombia. 2006.

[2] ATEINSA, MAN, SIEMENS, *Manual de Mantenimiento Vehículo de Pasajeros*, Volumen 1, Medellín, Colombia, 1996.

[3] Castaneda L., Żółtowski B.: *Metoda środowiskowych badań pojazdu szynowego*. Inżyniera i Aparatura Chemiczna. SIMPress, Gliwice, Poland. Nr 3, 2006. IZACAX 45(37). PL ISSN 0368-0827. Pag. 100-104.

[4] International Union OF Railways (UIC): *Testing and approval of railways vehicles from the point of view of their dynamic, behaviour, safety, track fatigue and ride quality*. 2 ed. Paris : UIC, 2003. 72 p.: il. (UIC 518 OR).

[5] Piec P.: Badania eksploatacyjne elementów i zespołów pojazdów szynowych. Kraków, Politechnika Krakowska, 2004. 248 p. ISBN 83-7242-311-3.

[6] Żółtowski B.: *Podstawy diagnostyki maszyn*. ATR w Bydgoszczy, Bydgoszcz, 1996. ISBN 83-900853-9-9.

[7] Cempel C.: *Multi fault condition monitoring of mechanical system in operation*. XVII IMEKO world congress. Dubrovnik, Croacia. 2003. 1-4 p.

[8] Gainor P. E., Kirkpatrick R. C.: *Introduction to time-series modeling and forecasting in business and economics*. New York: McGraw Hill, 1994. ISBN 0-07-034913-4.

[8] Castaneda L.: *Wielokryterialny system oceny bezpieczeństwa i komfortu jazdy wagonów pociągu metra.* UTP, Bydgoszcz. 2007

EFEKT OKNA POMIAROWEGO W DYSKRETNYM WIDMIE FOURIERA

Waldemar KUROWSKI*, Andrzej PANKOWSKI**

*Instytut Inżynierii Mechanicznej
Wydział Budownictwa Mechaniki i Petrochemii, Politechnika Warszawska,
09-402 Płock, ul Jachowicza 2/4, e-mail: qurovski@wp.pl
**Zakład Matematyki i Fizyki
Wydział Budownictwa Mechaniki i Petrochemii, Politechnika Warszawska

Streszczenie

Prostokątne okno pomiarowe jest przyczyną zakłóceń dyskretnego widma Fouriera. Skończony czas pobrania sygnału diagnostycznego określa zbiór dyskretnych częstotliwości, dopuszczalnych dla przekazania informacji widmowej. Składowa harmoniczna sygnału o częstotliwości, która nie należy do zbioru dopuszczalnych jest przedstawiana w widmie dyskretnym w postaci widma zastępczego. Składowe tego widma pojawiają się tylko dla częstotliwości dopuszczalnych a ich superpozycja jest przybliżeniem tej składowej sygnału. Składowe widma zastępczego wytwarza procedura DFT według szeregu Fouriera. Zafałszowanie widma dyskretnego wynika z faktu, że składowe widma zastępczego prezentują informacje, których nigdy nie było w oryginalnym sygnale diagnostycznym.

Słowa kluczowe: informacja diagnostyczna, dyskretna transformacja Fouriera, okno pomiarowe.

EFFECT OF MEASURING WINDOW ON DISCRETE FOURIER SPECTRUM

Summary

The interferences of the discrete Fourier spectrum are the consequence of rectangular measuring window. The finite acquisition time of diagnostic signal defines a set of discrete frequencies, permissible for the representation of spectral informations. Signal harmonic component having a frequency that does not belong to the set of permissibles is presented in a discrete spectrum in the form of equivalent spectrum. The components that form an equivalent spectrum appear for permissible frequencies only, and their superposition is an approximate representation of this component. The DFT procedure produce these components according to Fourier series. The adulteration of spectral information result from the fact that components of the equivalent spectrum present informations that never existed in the original diagnostic signal.

Keywords: diagnostic information, discrete Fourier transform, measuring window.

1. TRANSFORMACJA FOURIERA SYGNAŁU DIAGNOSTYCZNEGO

Francuski matematyk i inżynier, baron Joseph Fourier udowodnił, że funkcję okresową, określoną w pewnym przedziale w sposób analityczny lub graficzny, można wyrazić jako sumę szeregu funkcji trygonometrycznych:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}\left(a_n \cos\frac{2\pi nt}{T} + b_n \sin\frac{2\pi nt}{T}\right) \quad (1)$$

Szereg (1) można określić dla funkcji, które są stacjonarne, liniowe i spełniają warunki Dirichleta, tzn. są ograniczone, przedziałami ciągłe, posiadają skończoną liczbę nieciągłości, maksimów i minimów.

Czas T - jest okresem podstawowym funkcji $f(t)$; dla funkcji nieokresowych, zakłada się okres: $(-\infty,\infty)$. Argument: $2\pi n/T = \omega_n$, jest częstością kołową n-tej funkcji harmonicznej sin i cos, a_0 - jest wartością średnią, a a_n, b_n - są współczynnikami rozkładu funkcji $f(t)$. Wyznaczanie tych współczynników dla kolejnych wartości: $n = 1,2,...,\infty$, jest analizą harmoniczną funkcji $f(t)$ [2, 5].

Oznaczając częstotliwości: $\nu = \omega/2\pi$, $\nu_n = n/T$, $\nu_{n+1} = (n+1)/T$, oraz różnicę: $\Delta\nu = \nu_{n+1} - \nu_n = 1/T$, i zastępując sumowanie po indeksach n, całkowaniem po nieskończenie małych przyrostach częstotliwości: $\Delta\nu \to d\nu$, szereg (1) można przedstawić w postaci całki Fouriera:

$$\mathrm{F}(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\cdot\exp(-j2\pi\nu t)dt \quad (2)$$

Całka (2) jest funkcjonałem, który funkcji $f(t)$ przyporządkowuje liczbę, w postaci transformaty $\mathrm{F}(\nu)$. Funkcja określona w dziedzinie czasu i jej

transformata określona w dziedzinie częstotliwości, stają się parą równoważną: $\mathrm{F}(\nu) \Leftrightarrow f(t)$. Jeżeli funkcja $f(t)$ jest sumą wielu harmonicznych o różnych częstotliwościach: $\nu \in (-\infty, \infty)$, to transformata każdej z nich jest kolejno wyznaczana przez jądro: $\exp(-j2\pi\nu t)$, i przedstawiana w postaci liczby zespolonej, uśrednionej po czasie całkowania.

Całka (2) została wyprowadzona dla funkcji o okresie: $(-\infty, \infty)$. Jeżeli funkcja $f(t)$ opisuje sygnał diagnostyczny, pobrany w przedziale domkniętym: $[-T/2, T/2]$, to czas pobrania $T = T/2 - (-T/2)$, staje się skończonym okresem podstawowym, tej funkcji. Transformacji Fouriera podlega wtedy iloczyn: $f(t): t \in (-\infty, \infty)] \cdot w(t)$, gdzie: $w(t) = 1$, dla $t \in [-T/2, T/2]$ i $w(t) = 0$, dla $t \notin [-T/2, T/2]$. Funkcja $w(t)$ opisuje prostokątne okno pomiarowe i odzwierciedla skończony czas pobrania sygnału. Rezultatem transformacji Fouriera iloczynu algebraicznego sygnału i okna, jest iloczyn splotowy ich transformat [1, 3, 4, 5]:

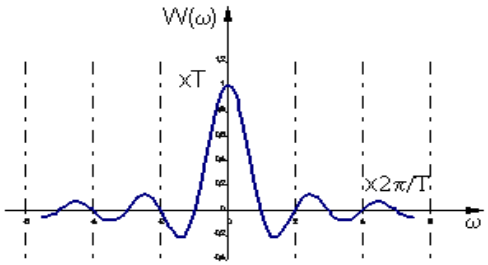
$$\int_{-\infty}^{\infty} [f(t) \cdot w(t)] \cdot \exp(-j\omega t) dt = \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot \exp(-j\omega t) dt =$$

$$= \mathrm{F}(\omega) * \mathrm{W}(\omega) \qquad (3)$$

Podstawiając $w(t)$ pod całkę (2), transformatę prostokątnego okna pomiarowego można wyznaczyć zmieniając granice całkowania funkcji ekspotencjalnej, z nieskończonych na skończone, od $-T/2$ do $T/2$, i zapisać w postaci zależności (4). Przebieg otrzymanej w ten sposób transformaty, został przedstawiony na rysunku 1.

$$\mathrm{W}(\omega) = T \frac{\sin \frac{\omega}{2} T}{\frac{\omega}{2} T} \qquad (4)$$

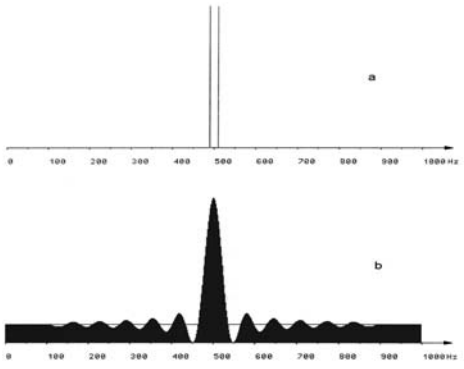
Z zależności (4) i rysunku 1 wynika, że dla zerowej wartości licznika, tzn. dla $\sin T\omega/2 = 0$, transformata okna $\mathrm{W}(\omega) = 0$, wyjątek stanowi przypadek, kiedy $\omega = 0$, wtedy $\mathrm{W}(\omega) \neq 0$, i jest proporcjonalne do T. To oznacza, że argument funkcji sinus $T\omega/2 = i \cdot \pi$, gdzie $i \neq 0$ oraz $i = \mathrm{int}$. Taka wartość argumentu odpowiada częstości kołowej: $\omega = 2\pi i / T$, i częstotliwości: $\nu = \omega / 2\pi = i / T$; współczynnik i przebiega wartości: i =,...,–3,–2,–1,1,2,3,... .



Rys. 1. Transformata prostokątnego okna pomiarowego

Dla dla: $\mathrm{W}(\omega) \neq 0$, widmo funkcji $f(t): t \in [-T/2, T/2]$, uzyskane w rezultacie transformacji Fouriera, jest zakłócone, zgodnie z zależnością (3), efektem prostokątnego okna pomiarowego (4). Dla widm uzyskanych na drodze bezpośredniego pomiaru, zakłócenia, ujawniają się w postaci zafalowań bocznych, względem $\nu = 0$ i tzw. wycieku widma, powodującego pogorszenie rozróżnialności składowych fal harmonicznych funkcji $f(t)$.

Na rysunku 2a, pokazano prawdziwe widmo modułu dwóch fal o częstotliwościach, które różnią się od siebie nieznacznie. To samo widmo modułu obciążone efektem okna pomiarowego, przedstawione na rysunku 2b, wykazuje istnienie tylko jednej fali i zafalowań bocznych. Niekorzystny efekt prostokątnego okna pomiarowego próbuje się zmniejszać, stosując okna korekcyjne (Hanninga, Hamminga i inne), które „zaokrąglają" pobrany sygnał, na początku i końcu okresu T [3, 5].



Rys. 2. Widmo dwóch składowych nierozróżnialnych

2. DYSKRETNA TRANSFORMACJA FOURIERA

Bazą danych podczas numerycznej obróbki sygnału diagnostycznego jest dyskretna postać funkcji $f(t): t \in [-T/2, T/2]$, uzyskana w rezultacie przetwarzania analogowo-cyfrowego. Jest to szereg wartości, wyznaczonych dla kolejnych chwil: $t_0, t_1, ..., t_k, ..., t_{N-1} \in [-T/2, T/2]$. Stała wartość różnicy $t_{k+1} - t_k = T_e$, określa okres próbkowania,

i częstotliwość próbkowania: $\nu_e = 1/T_e$. Wartości T i T_e, wyznaczają całkowitą liczbę próbek: $N = T/T_e = \text{int}.$ pobranego fragmentu funkcji $f(t)$, które „zmieszczą się" w oknie pomiarowym $[-T/2, T/2]$. Sygnał $f(kT_e) \equiv f(k)$, gdzie $k = 0,1,2,...,N-1$, jest poddawany dyskretnej transformacji (5), która została wyprowadzona z całki Fouriera (2), przez zastąpienie całkowania sumowaniem [1, 2, 5]:

$$\mathrm{F}(n) = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} f(k)\cdot \exp(-j2\pi nk/N) \qquad (5)$$

Dyskretne widmo Fouriera jest szeregiem prążków $\mathrm{F}(n)$, rozłożonych na osi częstotliwości, co wartość $\Delta\nu \equiv \nu_T = 1/T$, obliczonych kolejno dla $\nu_n = n\nu_T$. Indeks $n = 0,1,2,...,N/2-1$, wyznacza przedział częstotliwości $[0, \nu_{Nyq})$, gdzie $\nu_{Nyq} = \nu_e/2$. Zgodnie z kryterium Shannona-Nyquista, w tym przedziale może być określone widmo pozbawione aliasingu [1, 2, 5].

3. ZAKŁÓCENIA WIDMA DYSKRETNEGO

Wybrany przez badacza dla potrzeb eksperymentu, czas pobrania sygnału diagnostycznego T, określa częstotliwość podstawową sygnału ν_T, która na osi odciętych, na płaszczyźnie: częstotliwość-moduł i częstotliwość-kąt fazowy, oddziela od siebie dwa sąsiednie prążki, mogące wystąpić w widmie dyskretnym, i decyduje o jego rozdzielczości. Całkowita krotność $n\nu_T$ wyznacza zbiór dyskretnych wartości częstotliwości „dopuszczalnych". Tylko dla tych częstotliwości może być określone widmo dyskretne.

Wybrana także przez badacza częstotliwość próbkowania sygnału diagnostycznego $\nu_e = 1/T_e$, wyznacza pasmo częstotliwości $[0, \nu_{Nyq})$, określone przez ciąg indeksów: $n = 0,1,2,...,N/2-1$, w którym mogą być przekazywane wiarygodne informacje, w dyskretnym widmie Fouriera.

Dla stałej częstotliwości próbkowania sygnału ν_e, i szerokości pasma $[0, \nu_{Nyq})$, wraz ze wzrostem długości czasu pobrania T, rośnie liczność zbioru częstotliwości dopuszczalnych i maleje odległość między nimi. W rezultacie, wzrasta ilość informacji, które można przekazać w widmie dyskretnym, w tym paśmie. Dla $T \to \infty$ częstotliwość $\nu_T \to 0$, i widmo dyskretne dąży do postaci ciągłej.

W dyskretnym widmie sygnału, pobranego w skończonym czasie T, iloczyn splotowy (3) przedstawia przebieg transformaty okna, „zawieszony" na prążku reprezentującym składową harmoniczną, która wystąpiła dla częstotliwości dopuszczalnej, określonej przez pewien indeks n. Tak samo przebieg $\mathrm{W}(\omega)$ jest „zawieszony" na prążku dla $i = 0$, na rysunku 1.

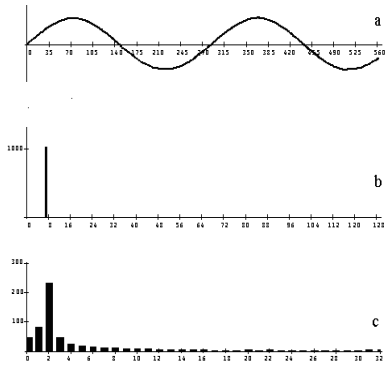
Znaczenie indeksu n, który określa zbiór częstotliwości dopuszczalnych oraz indeksu i, który określa zerowe wartości transformaty okna pomiarowego, jest identyczne. Zachodzi tu relacja: $n \equiv i$, z zastrzeżeniem, że zerowa wartość indeksu i, odpowiada wartości indeksu n, dla której występuje prążek reprezentujący składową harmoniczną. Tylko dla tej wartości: $\mathrm{W}(\nu) \neq 0$. Dla wszystkich pozostałych wartości całkowitych $n \equiv i$, wyznaczających częstotliwości dopuszczalne, transformata okna: $\mathrm{W}(\nu) = 0$, i iloczyn splotowy (3) jest również równy zero.

Wynika stąd, że zakłócenia widma dyskretnego, które są efektem istnienia okna pomiarowego, nie występują w takiej postaci jak to pokazano na rysunku 2. Mimo tego, badania widm sygnałów, obliczonych metodą DFT oraz doświadczenia zebrane podczas ich stosowania w diagnostyce urządzeń technicznych wykazują, że te widma są zakłócane.

Zakłócenie, a ściślej biorąc zafałszowanie widma dyskretnego w paśmie $[0, \nu_{Nyq})$, ujawnia się inaczej niż to wynika z zależności (3). Jest ono pośrednią konsekwencją istnienia prostokątnego okna pomiarowego i jest związane z dyskretnym (punktowym) sposobem przekazywania informacji zawartych w sygnale diagnostycznym, pobranym w postaci funkcji $f(t): t \in [-T/2, T/2]$ [1, 2, 3, 4, 5].

Skończony czas pobrania sygnału diagnostycznego T, powoduje taką dyskretyzację widma, która wyklucza możliwość przekazywania informacji dla innych częstotliwości, niż dopuszczalne. Badania wykazują, że jeżeli w pobranym sygnale znajdzie się składowa harmoniczna o częstotliwości, która nie należy do zbioru dopuszczalnych, to zostanie ona zaprezentowana w widmie w sposób przybliżony.

Na rysunku 3a, został pokazany sygnał, w postaci fali harmonicznej, który podano dyskretnej transformacji Fouriera. Jeżeli częstotliwość fali należy do zbioru dopuszczalnych, to prawdziwe widmo modułu, przedstawia prążek pokazany na rysunku 3b. Niewielkie skrócenie czasu pobrania T powoduje taki wzrost wartości ν_T, że częstotliwość tej fali straci swoje miejsce w zbiorze dopuszczalnych; prążek przedstawiony na rysunku 3b wypada teraz pomiędzy tymi częstotliwościami. Aby przedstawić badany sygnał w dziedzinie częstotliwości dopuszczalnych, procedura DFT wytwarza widmo zastępcze, pokazane na rysunku 3c, które przedstawia zbiór fal, które nie istnieją w sygnale.



Rys. 3. Sygnał, jego widmo prawdziwe i zastępcze

4. WIDMO ZASTĘPCZE

Sposób, w jaki całka Fouriera została wyprowadzona z szeregu (1) oraz dotychczasowe badania widm dyskretnych, pozwalają sformułować następującą hipotezę:

fale dyskretnego widma zastępczego są wyznaczane według szeregu Fouriera dla zadanych częstotliwości, należących do zbioru dopuszczalnych, i mają tak dobrane amplitudy i fazy, aby ich superpozycja była przybliżeniem fali o częstotliwości, która do tego zbioru nie należy.

Dla sprawdzenia wiarygodności tej hipotezy został wykonany eksperyment numeryczny, którego celem było: 1) obliczenie zastępczego widma modułu fali harmonicznej, za pomocą szeregu Fouriera, 2) porównanie tego widma, z zastępczym widmem modułu, wytworzonym przez procedurę DFT.

Wykorzystując fakt, że funkcję cosinus da się przekształcić do sinusa przez zmianę kąta fazowego, szereg Fouriera (1) można zapisać w postaci:

$$f(t) = \sum_{n=0}^{n=N/2-1} c_n \sin\left(\frac{2\pi nk}{N} + \varphi_n\right) \qquad (6)$$

Zależność (6) uzyskano z szeregu Fouriera (1) przy założeniu, że rozwijana fala harmoniczna reprezentuje sygnał pobrany w skończonym czasie i przetworzony do postaci dyskretnej. W szeregu (6), okres podstawowy fali jest równy czasowi pobrania: $T = NT_e$, i współrzędna niezależna − czas: $t = kT_e$. Bezwymiarowa dziedzina częstotliwości dopuszczalnych jest oznaczona indeksem $n = 0,1,2,...,N/2-1$, symbol φ_n oznacza kąt fazowy $n-$ tej fali dyskretnego widma zastępczego.

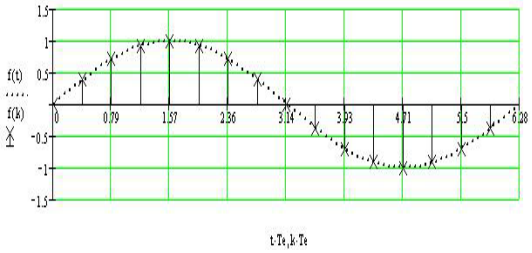
Falę harmoniczną można zapisać w postaci funkcji: $f(t) = A\sin 2\pi\nu t$. Jeśli badana fala, reprezentująca sygnał, będzie pobrana w skończonym czasie $T = const.$, to zbiór zadanych częstotliwości dopuszczalnych, przeznaczonych dla jej rozwinięcia w szereg Fouriera, będzie stały. Ponieważ każda wartość $1/T$, pomnożona przez liczbę całkowitą n, większą od zera, wyznaczy częstotliwość dopuszczalną, to ani szereg Fouriera, ani procedura DFT, nie wygeneruje widma zastępczego. Aby uzyskać informacje, które mogą potwierdzić (lub obalić) przyjętą hipotezą, należy zapewnić możliwość modyfikacji wartości częstotliwości badanej fali, bez zmiany ustalonego czasu pobrania.

Niech częstotliwość badanej fali będzie $\nu = (1+\alpha)/T$. Wtedy dla $\alpha = 0$, jeden okres fali harmonicznej jest równy T, a jej częstotliwość $\nu = 1/T$. Natomiast dla każdej wartości $\alpha \in (0,1)$, $\nu \neq 1/T$, i częstotliwość fali nie będzie należała do zbioru dopuszczalnych, przy zachowaniu czasu pobrania $T = const.$

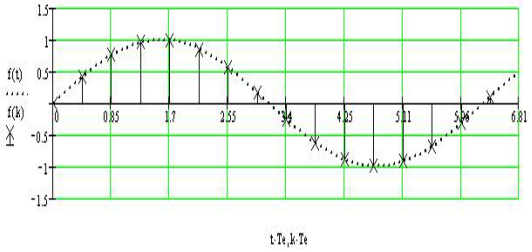
Po podstawieniu: $\nu = (1+\alpha)/T$, $T = NT_e$ oraz $t = kT_e$, argument funkcji sinus przyjmie postać $2\pi(1+\alpha)k/N$. Badana fala zapisana, w dziedzinie indeksu, k - reprezentującego czas, będzie:

$$f(t) = A\sin\frac{2\pi(1+\alpha)k}{N} \qquad (7)$$

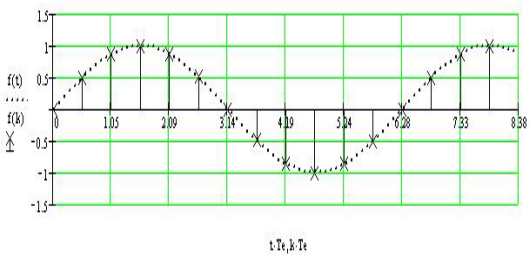
Dyskretna postać fali została określona dla: $N = 16$ próbek, ponumerowanych indeksem: $k = 0,1,2,...15$. Dla $A = 1$, falę (7) wygenerowano kolejno dla: $\alpha = 0$, $\alpha = 1/6$ i $\alpha = 2/3$. Przebiegi tych fal zostały przedstawione na rysunkach 4, 5 i 6.



Rys. 4. Sygnał, $\alpha = 0$



Rys. 5. Sygnał, $\alpha = 1/6$

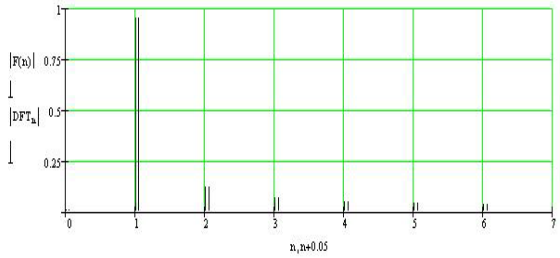


Rys. 6. Sygnał, $\alpha = 2/3$

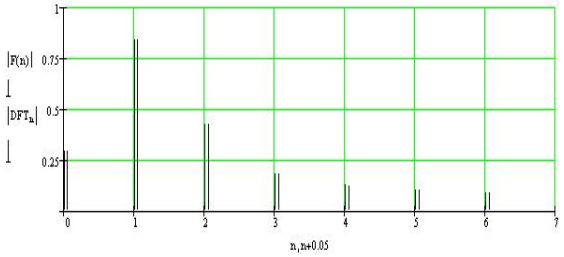
Uwzględniając kryterium Shannona-Nyquista, widmo zastępcze fali zostało wyznaczone w postaci składowej stałej, dla $n=0$ oraz prążków, dla $n=1,2,...,7$.

Przebiegi zastępczych widm modułu zostały przedstawione na rysunkach 7 i 8. Prążki naniesione na siatce wyznaczającej wartości częstotliwości dopuszczalnych oznaczonych indeksami $n=1,2,...,7$, przedstawiają widmo zastępcze uzyskane za pomocą szeregu Fouriera, a prążki obok - metodą DFT.

Na wykresach, wysokość prążków uzyskanych tymi dwoma metodami jest identyczna, co może być dowodem, że widmo zastępcze jest rezultatem rozwinięcia w szereg Fouriera składowej sygnału o częstotliwości, która nie należy do zbioru dopuszczalnych.

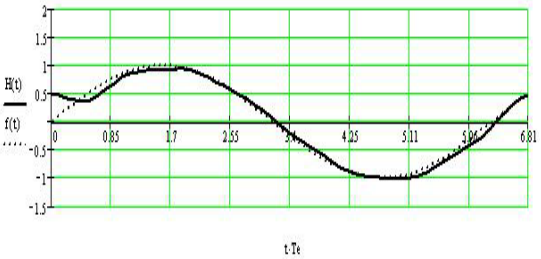


Rys. 7. Widmo zastępcze fali dla $\alpha=1/6$

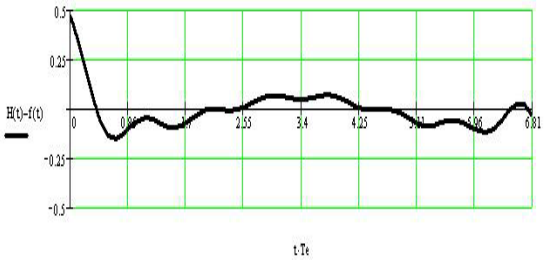


Rys. 8. Widmo zastępcze fali dla $\alpha=2/3$

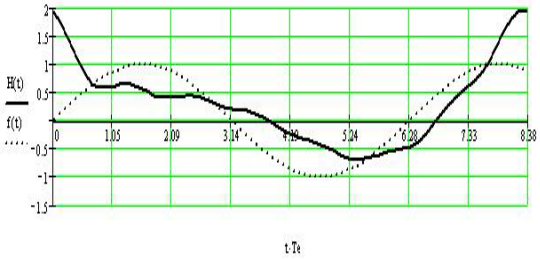
Na rysunku 9 przedstawiono porównanie przebiegu oryginalnej fali wytworzonej dla $\alpha=1/6$ i przebiegu fali, która jest rezultatem superpozycji fal harmonicznych, odtworzonych z prążków widma zastępczego, wyznaczonego dla tej fali (uwzględnieniem kąta fazowego), za pomocą szeregu Fouriera. Na rysunku 10 pokazano residuum, wyznaczone przez różnicę, która jest rezultatem odjęcia fali odtworzonej od oryginalnej. Na rysunkach 11 i 12 przedstawiono takie same przebiegi, dla fali wytworzonej dla $\alpha=2/3$.



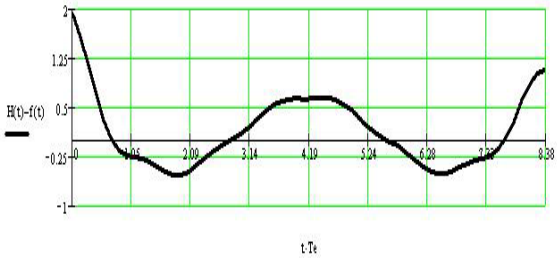
Rys. 9. Fala oryginalna i fala odtworzona dla $\alpha=1/6$



Rys. 10. Residuum fal oryginalnej i odtworzonej dla $\alpha=1/6$



Rys. 11. Fala oryginalna i fala odtworzona dla $\alpha=2/3$



Rys. 12. Residuum fal oryginalnej i odtworzonej dla $\alpha=2/3$

5. PODSUMOWANIE

Wykonany eksperyment numeryczny potwierdza prawdziwość przyjętej hipotezy.

Czas pobrania, wybrany przez badacza dla celów eksperymentu diagnostycznego, określa długość pobranego fragmentu sygnału i jego okres, a w konsekwencji jego częstotliwość podstawową. W dyskretnym widmie takiego sygnału, wyznaczonym metodą DFT, całkowita krotność odwrotności czasu pobrania sygnału określa zbiór częstotliwości dopuszczalnych. Tylko dla tych częstotliwości może być przekazywana informacja widmowa reprezentowana przez składowe fale harmoniczne zawarte w sygnale.

Każda fala harmoniczna o częstotliwości, która nie należy do zbioru dopuszczalnych, jest przedstawiana w postaci dyskretnego widma zastępczego. Takie widmo wytwarza procedura DFT niezależnie od woli badacza, rozkładając falę o częstotliwości, która nie należy do zbioru dopuszczalnych, na składowe harmoniczne o częstotliwościach, które do tego zbioru należą, według szeregu Fouriera.

Składowe tego widma przekazują informacje, których nigdy nie było w oryginalnym sygnale diagnostycznym, zakłócając widmo dyskretne.

Fale sygnału diagnostycznego odtworzone z rezultacie superpozycji tych składowych wykazują, że informacja zawarta w widmie zastępczym jest zafałszowana w dziedzinie czasu i częstotliwości. Przebiegi residuum wykazują, że efekt okna pomiarowego w widmie dyskretnym zniekształca rozkład energii reprezentowanej przez sygnał diagnostyczny w czasie pobrania.

Nie udało się wyjaśnić znaczenia i sposobu powstawania składowej stałej widma zastępczego, która ujawnia się dla $n=0$. Z przebiegów residuum widać, że gdyby tą wartość, w sposób arbitralny, przyjąć równą zero, to fala odtworzona ze składowych tego widma byłaby dokładniejsza, w stosunku do fali oryginalnej.

Uzyskane rezultaty potwierdzają wnioski uzyskane z innych badań, że sposób wytwarzania widm dyskretnych obliczonych metodą DFT dla sygnałów diagnostycznych pobranych w czasie skończonym powoduje zakłócenia, które są nieuniknione (przy dzisiejszym poziomie wiedzy), i nie dadzą się ani usunąć ani zmniejszyć za pomocą obecnie stosowanych okien korekcyjnych.

LITERATURA

[1] Kurowski W.: *Influence of a measurement time window on the FFT frequency spectrum.* Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 4, 31, 1993, s. 845-856.

[2] Kurowski W.: *Informatical Properties of Discrete Spectrum.* Archiwum Informatyki Teoretycznej i Stosowanej, Tom 7 (1995), z. 1-4, s. 95-104.

[3] Kurowski W.: *O szkodliwości stosowania okien korekcyjnych przy wyznaczaniu dyskretnych widm Fouriera sygnałów wibroakustycznych.* Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, Zeszyt 4(120), 1999, s. 733-750.

[4] Pankowski A.: *Badanie zakłóceń widm częstotliwościowych sygnału wibroakustycznego.* Mat. Konferencyjne: XXXI Ogólnopolskie Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka 2004, Politechnika Śląska, Wyd. Politechnika Śląska, Wydz. Transportu, Katowice 2004,

[5] Kurowski W.: *Podstawy diagnostyki systemów technicznych. Metodologia i metodyka.* Wyd. ITE-PIB w Radomiu, Warszawa-Płock 2008.

Waldemar KUROWSKI, ukończył wydział MEiL na Politechnice Warszawskiej 1961 roku, uzyskując stopień magistra inżyniera lotnictwa, dr hab. nauk technicznych w dyscyplinie: mechanika, specjalność: wibroakustyka, profesor nadzwyczajny Politechniki Warszawskiej na Wydziale Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii w Płocku. Zajmuje się metodologią i metodyką badań, problemami diagnostyki maszyn i urządzeń technicznych, wibroakustyką oraz numeryczną obróbką sygnałów. Jest autorem lub współautorem ponad 100 publikacji, referatów i opracowań zastosowanych w praktyce oraz 5 publikacji zwartych. Jest członkiem Polskiego Towarzystwa Diagnostyki technicznej. Hobby: muzyka operowa, narciarstwo alpejskie, jazda konna.

Andrzej PANKOWSKI urodził się w 1970 roku w Płocku. W 1995 roku ukończył Uniwersytet Łódzki, Sekcja Zastosowań Matematyki. Od 1995 roku pracownik Politechniki Warszawskiej na Wydziale Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii w Płocku. W 1995 roku uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie: Budowa i eksploatacja maszyn. Interesuje się zastosowaniami algorytmiki, programowania i metod numerycznych, w diagnostyce urządzeń technicznych.

WŁASNOŚCI DIAGNOSTYCZNE STRUKTUR BĘDĄCYCH NIEPEŁNYMI HIPERSZEŚCIANAMI

Jan CHUDZIKIEWICZ

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Cybernetyki, Instytut Teleinformatyki i Automatyki, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa; fax: 022-683-71-44; e-mail: j.chudzikiewicz@ita.wat.edu.pl

Streszczenie

Struktury typu hipersześcianu H^n zapewniają odpowiednią wnikliwość diagnostyczną oraz dużą niezawodność w sensie spójności sieci. Struktury H^n charakteryzują się silnym ograniczeniem na liczbę węzłów równą - 2^n. Struktury niepełnych hipersześcianów, nie mają takiego ograniczenia, ale podobnie jak struktury H^n znajdują szerokie zastosowania w systemach przetwarzania danych, szczególnie do budowy systemów tolerujących uszkodzenia ze względu na ich naturalne cechy redundancji. W referacie przedstawiono własności diagnostyczne struktur będących niepełnymi hipersześcianami. Własności te zostały określone dla metody opiniowania diagnostycznego.

Słowa kluczowe: diagnozowalność, niepełny hipersześcian, metoda opiniowanie diagnostyczne, tolerancja uszkodzeń.

DIAGNOSTIC PROPERTIES OF ON INCOMPLETE HYPERCUBES STRUCTURES

Summary

The hypercube structures have large reliability and large diagnostic deepness and are used in self-diagnostic systems. Structures H^n are characterized by a strong limitation on the number of nodes equal 2^n. The structures of incomplete hypercubes do not have such limitations, but similarly as H^n structures find wide application in data processing systems, especially for building fault tolerant systems, because such structures have natural features of redundancy. In the paper the diagnostic properties of incomplete hypercube structures are presented. These properties were defined for the method of diagnostic opinion.

Keywords: diagnosability, incomplete hypercubes, a method of diagnostic opinion, fault tolerance.

1. WPROWADZENIE

n-wymiarowym hipersześcianem binarnym nazywamy graf zwykły G $(G =< E, U >, |E| = 2^n, |U| = n \cdot 2^{n-1})$ o 2^n węzłach, z których każdy opisany jest odpowiednim wektorem binarnym z $(z = (z_1,\ldots,z_n),\ z_i \in \{0,\ 1\},\ 1 \le i \le n,\ z \in Z^n, |Z^n| = 2^n)$ oraz o $n \cdot 2^{n-1}$ krawędziach, łączących te węzły, których opisujące je wektory odległe są o 1 według miary Hamminga [1].

Strukturę *n*-wymiarowego hipersześcianu binarnego będziemy dalej oznaczać przez H^n.

Każdy węzeł może obejmować jeden lub więcej procesorów z własną pamięcią lokalną. Węzły łączone są liniami transmisji danych. Zależnie od charakteru tych połączeń, możemy mieć do czynienia z systemem wielokomputerowym, budowanym najczęściej w oparciu o specjalizowane płyty (na przykład, *nCube*), wyposażone w połączenia magistralowe lub z systemami rozproszonymi (sieciowymi), budowanymi na bazie komputerów i połączeń sieciowych typu punkt-punkt. Niezależnie od fizycznej realizacji systemy tego typu charakteryzują się nadmiarowością linii komunikacyjnych (transmisji danych), regularnością struktury oraz stosunkowo niewielką maksymalną odległością Hamminga między węzłami [1, 2, 3].

Systemy a architekturze hipersześcianu mogą być wykorzystane do budowy systemów tolerujących uszkodzenia ze względu na posiadane naturalne cechy redundancji [5, 7]. Warunkiem koniecznym tolerowania uszkodzeń jest ich poprawna diagnostyka. Jej jakość ma decydujące znaczenie dla przywrócenia zdatności systemu poprzez wymianę uszkodzonych jednostek, bądź też izolację niezdatnych jednostek i przeprowadzenie rekonfiguracji zadań (łagodna degradacja systemu). Biorąc jednak po uwagę fakt, że struktury H^n charakteryzują się silnym ograniczeniem na liczbę węzłów równą - 2^n, ich zastosowanie jest ograniczone. Alternatywą jest zastosowanie struktur *niepełnych hipersześcianów* [8].

Strukturą będącą niepełnym hipersześcianem binarnym nazywamy graf zwykły G' $(G' =< E',\ U' >, 2^{n-1} < |E| < 2^n, n \cdot 2^{n-2} < |U| < n \cdot 2^{n-1},$

$(n \geq 3))$, w której każdy węzeł opisany jest odpowiednim wektorem binarnym z $(z = (z_1,\ldots,z_n),$ $z_i \in \{0,\ 1\}, 1 \leq i \leq n, z \in Z^n, |\ Z^n\ | < 2^n)$, natomiast krawędzie łączą te węzły, których opisujące je wektory odległe są o 1 według miary Hamminga.

Struktury niepełnych hipersześcianów, znajdują szerokie zastosowania w systemach przetwarzania danych, szczególnie do budowy systemów tolerujących uszkodzenia ze względu na posiadane naturalne cechy redundancji [11, 13].

W niniejszym referacie przedstawiono (dla strategii jednokrokowej) własności diagnostyczne dla metody opiniowania diagnostycznego i modeli PMC (Preparata, Metze and Chien) [12] oraz BGM (Barsi, Grandoni and Maestrini) [6], struktur będących niepełnymi hipersześcianami.

2. POJĘCIA PODSTAWOWE

Niech $E(e')$ $(e' \in E)$ oznacza zbiór węzłów przyległych do węzła e' $(e' \notin E(e'))$. Zauważmy, że w odniesieniu do struktur H^n, które są odwzorowane przez opisany graf zwykły, zbiór $E(e)$ komputerów przyległych można określić w następujący sposób:

$$E(e) = \{e' \in E \setminus e : \delta(\Theta(e),\ \Theta(e')) = 1\} \quad (e \in E),$$

natomiast zbiór $E(E')$ komputerów przyległych do komputerów ze zbioru E' można określić jako:

$$E(E') = \{e \in E \setminus E' : \delta(\Theta(e),\ \Theta(e')) = 1\} \quad (e' \in E'),$$

przy czym: $\delta(\Theta(e'),\ \Theta(e''))$ - odległość Hamminga między etykietami węzłów e' i e''.

Graf opiniowania diagnostycznego G $(G =< E,\ U >)$ opisujący strukturę testowania się komputerów sieci jest nazywany *m*-diagnozowalnym, jeżeli umożliwia zidentyfikowanie wszystkich niezdatnych komputerów sieci komputerowej pod warunkiem, że jest ich nie więcej niż *m*. Wśród struktur *m*-diagnozowalnych wyróżniamy struktury *m*-optymalne, to jest takie, które mają minimalną liczbę łuków, co odpowiada minimalnej liczbie testowań wykonanych przez komputery sieci komputerowej.

Graf opiniowania diagnostycznego jest grafem *m*-diagnozowalnym, wtedy i tylko wtedy gdy (dla modelu PMC) [10]:

1) $|\ E\ | \geq 2 \cdot m + 1;$
2) $\mu^-(e) \geq m,\ e \in E;$
3) $(\forall\, 0 \leq p \leq m\text{-}1\ \forall\, E' \subset E : |\ E'\ | = |\ E\ | - 2 \cdot m + p)$
$: |\ E(E')\ | > p.$

Graf opiniowania diagnostycznego jest grafem *m*-diagnozowalnym, wtedy i tylko wtedy gdy (dla modelu BGM) [10]:

1) $|\ E\ | \geq m + 2;$
2) $\mu^-(e) \geq m,\ e \in E;$
3) $\forall\, e',\ e'' \in E : \mu^-(e') = \mu^-(e'') =$
$m \wedge [(\exists e^* \in E(e') \setminus E(e') \bigcap E(e'') : E(e^*) \neq E(e'')) \vee$
$\vee (\exists e^{**} \in E(e'') \setminus E(e') \bigcap E(e'') : E(e^{**}) \neq E(e'))].$

Oznaczmy [10]:

$|\ E^0(n',\ n'')\ |$ - zbiór tych komputerów sieci komputerowej, które są zdatne zarówno w stanie n' jak i w stanie n'';

$|\ E^1(n',\ n'')\ |$ - zbiór tych komputerów sieci komputerowej, które są niezdatne zarówno w stanie n' jak i w stanie n'';

$|\ \tilde{E}(n',\ n'')\ |$ - zbiór tych komputerów sieci komputerowej, które jeśli w stanie n' są zdatne to w stanie n'' są niezdatne.

Jeżeli $m \leq \left\lfloor \frac{1}{2} |\ E\ | \right\rfloor$, to [10]:

$$1 \leq |\ \tilde{E}(n',\ n'')\ | \leq 2 \cdot m, \tag{2-1}$$

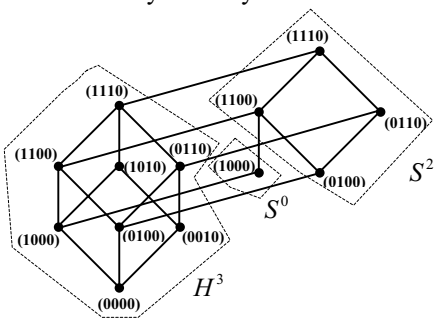
$$0 \leq |\ E^1(n',\ n'')\ | \leq m - \left\lfloor \frac{1}{2}(|\ \tilde{E}(n',\ n'')\ | + 1) \right\rfloor, \tag{2-2}$$

$$|\ E\ | - 2 \cdot m \leq |\ E^0(n',\ n'')\ | \leq |\ E\ | - 1. \tag{2-3}$$

Definicja 2-1

Strukturę będącą niepełnym hipersześcianem binarnym opisaną grafem G'' $(G'' =< E, U >,$ $|\ E\ | = 2^r + \sum_{m \in M} 2^m, |\ U\ | = r \cdot 2^{r-1} + \sum_{m \in M} m \cdot 2^m)$ zaliczamy do klasy H^r_M, przy czym M – zbiór wymiarów sześcianów M={r-1, r-2,…,1,0}.

Na rysunku 1 przedstawiono przykład struktury $H^3_{2,0}$ będącej niepełnym hipersześcianem klasy H^r_M. Przy czym S^2, S^0 oznaczają sześciany binarne odpowiednio: 2-wymiarowy oraz 0-wymiarowy, natomiast H^3 oznacza hipersześcian 3-wymiarowy.

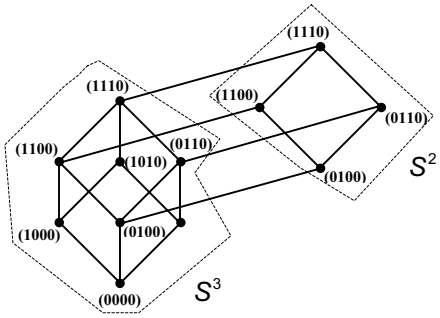


Rys. 1. Przykład struktury $H^3_{2,0}$.

Definicja 2-2

Strukturę będącą niepełnym hipersześcianem binarnym opisaną grafem G''' $(G''' =< E, U >,$ $|\ E\ | = 2^r + 2^m, |\ U\ | = r \cdot 2^{r-1} + m \cdot 2^m)$ zaliczamy do klasy h^r_m, przy czym $(2 \leq m < r) \wedge (r \geq 3).$

Na rysunku 2 przedstawiono przykład struktury h^3_2 będącej niepełnym hipersześcianem klasy h^r_m.



Rys. 2. Przykład struktury h_2^3.

3. WYBRANE WŁASNOŚCI DIAGNOSTYCZNE STRUKTUR H^n DLA METODY OPINIOWANIA DIAGNOSTYCZNEGO MODELU PMC ORAZ BGM

W punkcie tym przedstawiono wybrane własności struktur typu H^n dla metody opiniowania diagnostycznego i modelu PMC oraz BGM. Przedstawione własności pozwolą na opisanie, zawartych w punkcie 4, własności struktur będących niepełnymi hipersześcianami. Dokładniejszy opis własności struktur H^n wraz z dowodami można znaleźć w pracach [1, 4, 10].

Własność 3-1

Graf opiniowania diagnostycznego G jest grafem m-diagnozowalnym dla modelu PMC wtedy i tylko wtedy, gdy spełniona jest następująca zależność:

$$\forall n', n'' \in N^m \; \exists e' \in E^0(n',\ n''): \quad E(e') \cap \tilde{E}(n',\ n'') \neq \varnothing \tag{3-1}$$

gdzie: N^m – zbiór takich stanów niezawodnościowych węzłów sieci komputerowej, w których liczba niezdatnych komputerów nie jest większa niż m.

Własność 3-2 Jeżeli graf opiniowania diagnostycznego G jest grafem m-diagnozowalnym, to spełnione są następujące warunki: $|E| \geq 2 \cdot m + 1$ i $\mu^-(e) \geq m, (e \in E)$ dla modelu PMC.

Własność 3-3 Silnie spójny graf opiniowania diagnostycznego G $(|E| \geq 3)$ jest grafem 1-diagnozowalnym dla modelu PMC.

Własność 3-4 Graf opiniowania diagnostycznego jest grafem 1-diagnozowalnym dla modelu BGM wtedy i tylko wtedy, gdy jest grafem 1-diagnozowalnym dla modelu PMC.

Własność 3-5 Jeżeli graf opiniowania diagnostycznego G jest grafem m-optymalnym dla modelu PMC, to $\mu^-(e) = m \;\; (e \in E)$ oraz $|U| = m \cdot |E|$.

Własność 3-6 Jeżeli graf opiniowania diagnostycznego jest grafem m-diagnozowalnym dla modelu PMC, to jest grafem m-diagnozowalnym dla modelu BGM.

4. WYBRANE WŁASNOŚCI DIAGNOSTYCZNE STRUKTUR BĘDĄCYCH NIEPEŁNYMI HIPERSZEŚCIANAMI

Własność 4-1 Struktura będąca podgrafem częściowym struktury H^n $(n > 2)$ taka, że $\mu(e) \geq 2 \;\; (e \in E)$, jest co najmniej 1-diagnozowalną dla modelu PMC oraz BGM.

Dowód

Z zależności (1-1) ÷ (1-3) wynika następująca zależność:

$$\forall n', n'' \in N^1 : (E^1(n',\ n'') = \varnothing) \wedge (1 \leq |\tilde{E}(n',\ n'')| \leq 2) \wedge \wedge (2^{n-1} \leq |E^0(n',\ n'')| \leq 2^n - 1),$$

a ponieważ (z założenia) struktura jest grafem spójnym, to zachodzi:

$$[e \in \tilde{E}(n',\ n'')] \Rightarrow [E(e) \cap E^0(n',\ n'') \neq \varnothing]$$

a więc spełniona jest zależność (3-1) czyli, że struktura jest strukturą 1-diagnozowalną metodą opiniowania diagnostycznego dla modelu PMC, a tym samym (zgodnie z własnością 3-4) i dla modelu BGM. Potwierdza to również własność 3-3, bowiem struktura będąca podgrafem częściowym struktury H^n jest silnie spójnym grafem opiniowania diagnostycznego, a więc jest strukturą 1-diagnozowalną metodą opiniowania diagnostycznego dla modelu PMC, natomiast zgodnie z własnością 3-3 jest również strukturą 1-diagnozowalną dla modelu BGM.

Własność 4-2 Struktura klasy h_m^r $(r \geq 3)$ taka, że $\mu(e) = m \;\; (e \in E, 2 \leq m < r)$ jest strukturą m-optymalną dla modelu PMC i modelu BGM.

Dowód

Z zależności (1) ÷ (3) wynika, że:

$$\forall n', n'' \in N^m : (\left|E^1(n',\ n'')\right| \leq m-1) \wedge (E^0(n',\ n'') \neq \varnothing)$$

oraz

$$(\left|E^1(n',\ n'')\right| = m-1) \Rightarrow (1 \leq \left|\tilde{E}(n',\ n'')\right| \leq 2)$$

Zauważmy, że jeżeli:

$$\left|\tilde{E}(n',\ n'')\right| = 2 \text{ i } \delta(\Theta(e'), \Theta(e'')) = 1 \; (e', e'' \in \tilde{E}(n',\ n''))$$

to wówczas

$$\{E(e') \setminus e''\} \cap \{E(e'') \setminus e'\} = \varnothing \;\; (n',\ n'' \in N^r)$$

a więc otrzymujemy:

$$(\{E(e') \setminus e''\} \cap E^0(n',\ n'')) \vee (\{E(e'') \setminus e'\} \cap E^0(n',\ n'')) \neq \varnothing$$

a więc spełniona jest zależność (3-1). Tak więc zgodnie z własnością 3-1 struktura jest m-diagnozowalną metodą opiniowania diagnostycznego dla modelu PMC, a ponieważ $\mu^-(e) = m \;\; (e \in E)$ to zgodnie z własnością 3-5 jest strukturą m-optymalną, a tym samym (zgodnie z własnością 3-6) i dla modelu BGM.

Przedstawione w tym punkcie własności diagnostyczne struktur, będących podgrafami częściowymi struktury H^n, ukazują że struktury te

charakteryzują się podobnymi do struktur H^n własnościami diagnostycznymi. Istotną różnicą jest to, że nie mają one tak silnego jak struktury H^n ograniczenia na liczność zbioru E, grafu opisującego daną strukturę. Ma to istotne znaczenie w przypadku, gdy w wyniku uszkodzenia zachodzi konieczność eliminacji elementu, co powoduje, że liczba węzłów struktury opisującej dany system nie spełnia warunku na liczbę węzłów będącą potęgą dwójki.

5. PODSUMOWANIE

W literaturze przedmiotu własności struktur będących niepełnymi hipersześcianami są szeroko analizowane [11, 13], jednak badania te nie obejmują własności diagnostycznych tychże struktur.

Zbadanie tych własności ma istotne znaczenie w przypadku środowisk, gdzie panujące warunki techniczne uniemożliwiają renowację sieci (komputerowej, wieloprocesorowej) powodując, że podlega ona procesowi „*łagodnej degradacji*". Zachodzi wówczas konieczność dokonania rekonfiguracji istniejącej struktury do takiej, która będzie charakteryzowała się najlepszymi właściwościami diagnostycznymi [1, 9].

Zaprezentowane w artykule własności diagnostyczne struktur będących niepełnymi hipersześcianami stanowią częściowe wyniki prac prowadzonych w Instytucie Teleinformatyki i Automatyki WAT, dotyczących struktur typu hipersześcianu.

LITERATURA

[1] Chudzikiewicz J.: *Sieci komputerowe o strukturze logicznej typu hipersześcianu.* Instytut Automatyki i Robotyki, Wydziału Cybernetyki WAT, Warszawa 2002.

[2] Chudzikiewicz J.: *Metoda wyznaczania m-optymalnych struktur opiniowania diagnostycznego dla sieci komputerowych typu hipersześcianu*, V Krajowa Konferencja Diagnostyka Urządzeń i Systemów, Ustroń 2003.

[3] Chudzikiewicz J.: *Wyznaczanie m-diagnozowalnych struktur typu PMC w systemach o zwiększonej odporności na uszkodzenia*, X Konferencja Systemów Czasu Rzeczywistego, Ustroń 2003.

[4] Chudzikiewicz J., Zieliński Z.: *Własności diagnostyczne systemów komputerowych o strukturze hipersześcianu*, Systemy Czasu Rzeczywistego. Kierunki badań i rozwoju, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Rozdział XVII, 2005.

[5] Chudzikiewicz J., Murawski K.: *Wyznaczanie bezkolizyjnych dróg przesyłania danych w sieci teleinformatycznej o strukturze typu hipersześcianu*, VI Krajowa Konferencja Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów, Ustroń 2006.

[6] Barsi F., Grandoni F., Maestrini P.: *A Theory of Diagnosability of Digital Systems*, IEEE Transactions on Computers, vol. 6, pp. 585-593, 1976.

[7] Horng M. S., Chen D. J.: *Parallel Routing Algorithms for Incomplete Hypercube Interconnection Networks*, IEEE transactions on computers, 1992.

[8] Katseff H. P.: *Incomplete hypercubes*, IEEE transactions on computers, vol. 31, no.*5,* 1988.

[9] Kulesza R., Zieliński Z., Chudzikiewicz J.: *Reconfiguration of a ring structure in a hypercube computer network with faulty links,* International Conference on Technical Diagnostics 9th IMECO TC-10, Wroclaw 1999.

[10] Kulesza R.: *Podstawy diagnostyki sieci logicznych i komputerowych*, Instytut Automatyki i Robotyki, Wydział Cybernetyki WAT, Wydanie II, Warszawa 2000.

[11] Nian-Feng Tzeng: *Structural properties of incomplete hypercube computers*, International Conference on Distributed Computing Systems, May 1990.

[12] Preparata F. P., Metze G., Chien R. T.: *On the Connection Assignment Problem of Diagnosable Systems*, IEEE Transactions on Computers, pp. 848-854, 1967.

[13] Sen A., Sengupta A., Bandyopadhyay S.: *On some topological properties of Hypercube, Incomplete Hypercube and Supercube,* IEEE transactions on computers, 1993.

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 pracę doktorską uzyskując tytuł doktora 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.

MODEL SYSTEMU „ZESPÓŁ POMPOWY – PRZEWÓD" ZE STEROWANYM UKŁADEM NAPĘDOWYM NA POTRZEBY DIAGNOSTYCZNE

Jacek BARTMAN, Anna KOZIOROWSKA

Instytut Techniki, Uniwersytet Rzeszowski
ul. Rejtana 16a, 35-959 Rzeszów
jbartman@univ.rzeszow.pl, akozioro@univ.rzeszow.pl

Streszczenie

Przedmiotem pracy jest konstrukcja modelu systemu „zespół pompowy – przewód" składającego się z przemiennika częstotliwości, silnika napędowego, pompy oraz rurociągu. Idea pracy systemu opiera się na stabilizacji ciśnienia tłoczenia wody w rurociągu poprzez częstotliwościową regulację prędkości silnika napędzającego pompę tłoczącą. W pracy przedstawiono topologię systemu oraz jego opis analityczny, który zostanie wykorzystany jako model diagnostyczny w dalszych badaniach. Układ opisano wykorzystując modelowanie matematyczne, modelowanie neuronowe oraz charakterystyki statyczne. Szczególną uwagę zwrócono na dobór modelu neuronowego - porównując uzyskane z niego wyniki z danymi pomiarowymi.

Słowa kluczowe: układ napędowy, sztuczne sieci neuronowe, modelowanie.

MODEL OF "PUMP AGGREGATE – PIPELINE" SYSTEM WITH CONTROLED DRIVING MATCH ON DIAGNOSTIC REQUIREMENTS

Summary

The aim of the paper is construction of "pump aggregate – pipeline" system model consists of frequency converter, driving motor, pumps and pipeline. Idea of system's work is based on pressure stabilization in pipeline through frequency control of speed of motor which drives the pump. The paper presents the topology of analysed system and its analytical description which will be taken advantage as diagnostic model in farthest research. The system is described through using mathematical modeling, neuron modeling and static characteristics. There was payed the special attention on selection of neuron model comparing received results to measuring data.

Keywords: drive system, artificial neural network, modeling.

1. WSTĘP

Postęp techniczny jaki dokonał się w ostatnich latach daje możliwość obserwacji pracy systemu w celu wczesnego wykrycia symptomów awarii poszczególnych jego elementów. Ostatnio w diagnostyce technicznej układów napędowych badania doświadczalne na rzeczywistych układach często zastępuje się badaniami symulacyjnymi. Prowadzenie badań symulacyjnych wymaga opisu modelowanego obiektu w formie możliwej do algorytmizacji – charakterystyki, modele matematyczne, modele neuronowe itp. Istotną zaletą badań symulacyjnych – oprócz zdecydowanie niższych kosztów – jest możliwość rozważania nawet ekstremalnych stanów pracy układu, niedopuszczalnych w trakcie normalnej eksploatacji.

Nowoczesne systemy wodociągowe wymagają dużej elastyczności w dostosowywaniu się do wymogów odbiorców wody. Utrzymanie właściwych parametrów tłoczenia wody wymusza zastosowanie do napędu pomp silników z regulowana prędkością obrotową (rys. 1).

Rys. 1. Układ napędowy pomp [18]

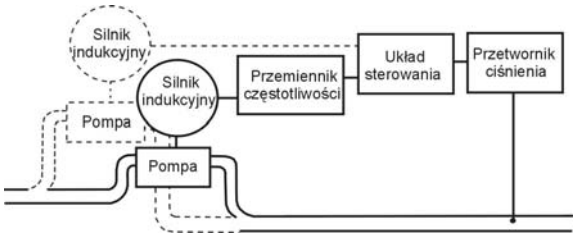
Dzięki postępowi jaki dokonał się w energoelektronice możliwe jest wykorzystanie w tym celu silników indukcyjnych zasilanych poprzez przemienniki częstotliwości [15] i takie rozwiązanie jest aktualnie najczęściej stosowane.

Celem pracy jest przedstawienie kompleksowego modelu układu „zespół pompowy – przewód" wraz z zastosowaniem jednokierunkowej sztucznej sieci neuronowej do opisu rurociągu. Poprawnie opracowany model może zostać wykorzystany do diagnozowania potencjalnych stanów awaryjnych systemu. Modelowanie neuronowe bazuje na danych pomiarowych uzyskanych w przepompowni wody Rzeszów-Pobitno wyposażonej w przemiennik częstotliwości ACS 503-100-3 firmy ABB oraz silniki SLg 280M2 firmy Celma o mocy znamionowej 90 kW. Pomiary parametrów elektrycznych - wykorzystanych w modelowaniu neuronowym - przeprowadzone zostały za pomocą miernika Skylab firmy Amprobe Instrument, model 9030.

2. OPIS UKŁADU

W analizowanym systemie „zespół pompowy - przewód" można wyodrębnić następujące elementy:
- silniki indukcyjne,
- przemiennik częstotliwości z falownikiem PWM,
- pompy,
- rurociąg

i każdy z nich opisać niezależnie przy pomocy określonych metod z zadaną dokładnością.



Rys. 2. Schemat ideowy układu

Przynajmniej jeden z zespołów silnik-pompa musi mieć regulowaną prędkość obrotową.

3. MODEL UKŁADU

Model systemu wykorzystywany do analizy jego pracy, stanowi odzwierciedlenie aktualnego stanu wiedzy o procesach w nim zachodzących. Jego dokładność (precyzja odwzorowania zachodzących zjawisk) zależy od celu badań, do realizacji których został on opracowany. Adekwatny model to taki model, który odwzorowuje z wystarczającą dokładnością pracę analizowanego układu [7]. Jednocześnie należy brać pod uwagę fakt, iż uwzględnienie zbyt wielu czynników w opisie może prowadzić do dużego wzrostu złożoności obliczeniowej modelu. Najczęściej powoduje to również poprawę uzyskiwanych rezultatów, jednak nie zawsze ta poprawa jest znacząca, a często bywa tak, iż z punktu widzenia analizy układu jest ona nieistotna.

Poszczególne elementy składowe analizowanego systemu najwygodniej jest modelować stosując różne (przystosowane do specyfiki obiektu) metody ich opisu.

3.1. Model matematyczny silnika napędowego

W literaturze [5, 8, 14] opisanych jest wiele różnych postaci modeli silników asynchronicznych. Modele te w różnym stopniu uwzględniają zjawiska występujące w czasie pracy maszyny lub też odtwarzają je różnymi metodami. Model może uwzględniać zjawiska nasycenia, strat w rdzeniu lub też może je pomijać. Ponadto przy tworzeniu modelu mogą być przyjęte inne uproszczenia, jak np.: założenie symetryczności zasilania, zastąpienie parametrów rozłożonych skupionymi itd.

W niniejszej pracy wykorzystane zostały modele obwodowe, zapisane w postaci znanej jako modele typu A [4, 5]. Końcowe równania opisujące zależność prądów stojana i wirnika silnika indukcyjnego klatkowego w funkcji napięcia zasilania oraz parametrów silnika i obciążenia można przedstawić w następującej postaci:

$$\frac{d\mathbf{I}}{dt} = \frac{1}{K}\mathbf{A}(\mathbf{U} - \mathbf{RI} + \mathbf{\Omega\Psi}) \tag{1}$$

Poszczególne składniki równania (1) opisane są następującymi zaleznościami:

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} i_{sa} & i_{sb} & i_{ra} & i_{rb} \end{bmatrix}^T$$

$$K = \alpha_r + \alpha_s + \alpha_m$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha_s(\alpha_r + \alpha_m) & 0 & -\alpha_s\alpha_r & 0 \\ 0 & \alpha_s(\alpha_r + \alpha_m) & 0 & -\alpha_s\alpha_r \\ -\alpha_s\alpha_r & 0 & \alpha_r(\alpha_s + \alpha_m) & 0 \\ 0 & -\alpha_s\alpha_r & 0 & \alpha_r(\alpha_s + \alpha_m) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{\Psi} = \begin{bmatrix} \frac{i_{sa} + i_{ra}}{\alpha_m} + \frac{i_{ra}}{\alpha_r} \\ \frac{i_{sb} + i_{rb}}{\alpha_m} + \frac{i_{rb}}{\alpha_r} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_{sa} & u_{sb} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$u_{sa} = U_m \sin(2\pi f t + \varphi),$$

$$u_{sb} = U_m \sin(2\pi f t + \varphi + 120^o)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}(2r_{sa} + r_{sb}) & \frac{1}{3}(r_{sc} - r_{sb}) & 0 & 0 \\ \frac{1}{3}(r_{sc} - r_{sa}) & \frac{1}{3}(2r_{sb} + r_{sc}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{\Omega}=\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{\omega}{\sqrt{3}} & -\frac{2\omega}{\sqrt{3}} \\ \frac{\omega}{\sqrt{3}} & \frac{2\omega}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}$$

Równanie ruchu ma postać:

$$\frac{d\omega}{dt}=\frac{p}{J}\left(T_e-T(\omega)\right) \qquad (2)$$

gdzie:

$$T_e=\frac{\sqrt{3}p\left(i_{ra}i_{sb}-i_{rb}i_{sa}\right)}{\tau},$$

i_{sa}, i_{sb}, i_{ra}, i_{rb} – wartości prądów stojana i wirnika;
r_{sa}, r_{sb}, r_{sc} – wartości rezystanncji faz stojana;
r_r – wartość rezystancji wirnika;
α_m – odwrotność indukcyjności magnesującej;
α_s – odwrotność indukcyjności stojana;
α_r – odwrotność indukcyjności wirnika,
t – czas;
f – częstotliwość zasilania;
ω – prędkość obrotowa silnika;
T_e – moment elektromagetyczy;
$T(\omega)$ – moment mechaniczny;
p – liczba par biegunów;
J – moment bezwładości.

3.2. Model matematyczny przemiennika częstotliwości

Najczęściej stosowaną obecnie metodą sterowania prędkością silników prądu przemiennego jest zmiana częstotliwości zasilania [6]. W tym celu stosuje się pośrednie przemienniki częstotliwości, w skład których wchodzą: prostownik sieciowy, obwód pośredniczący napięcia/prądu stałego i falownik napięcia/prądu. Najczęściej w układach napędowych pomp wodociągowych stosuje się falowniki napięcia o modulowanej szerokości impulsów PWM (ang. Pulse Width Modulation) [1]. Charakteryzują się one zbliżonym do sinusoidalnego kształtem prądu oraz małymi stratami - jest to efekt wysokiej częstotliwości łączeń.

Porównując wzorcowy sygnał sinusoidalny (u_{Sk}) z przebiegiem trójkątnym (u_{ST}) uzyskuje się przebieg napięcia zasilającego silnik z regulowana prędkością obrotową (rys. 3):

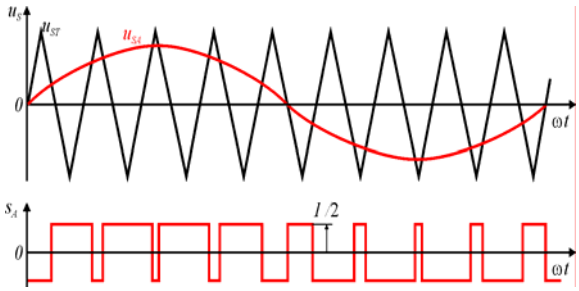
$$s_k=sign(u_{Sk}-u_{ST}), \quad k\in\{A,B,C\}$$

oraz

$$u_{Sk}=\sin\left(2\pi f t\pm\frac{2\pi}{3}\right), \quad k\in\{A,B,C\}$$

$$u_{ST}=\frac{2\arcsin\left(\sin\left(m_f f\pi t\right)\right)}{\pi}$$

gdzie: t – czas;
f –częstotliwość;
m_f – współczynnik modulacji częstotliwości.



Rys. 3. Uzyskiwanie przebiegu napięcia w falowniku PWM

Uzyskany przebieg ma charakter dwuwartościowej funkcji przełączającej:

$$s_k(t)=\begin{cases} 1 & dla \quad u_{ST}(t)\le u_{Sk}(t) \\ -1 & dla \quad u_{ST}(t)>u_{Sk}(t) \end{cases}, \; k\in\{A,B,C\} \qquad (3)$$

Napięcia międzyfazowe oraz fazowe odbiornika mają amplitudy proporcjonalne do amplitudy napięcia zasilającego i wyrażone są za pomocą funkcji przełączających (3). Równania opisujące je mają postać:

$$\begin{bmatrix} u_{AB}(t) \\ u_{BC}(t) \\ u_{CA}(t) \end{bmatrix}=\sqrt{2}U_{ac}\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} s_A(t) \\ s_B(t) \\ s_C(t) \end{bmatrix}$$

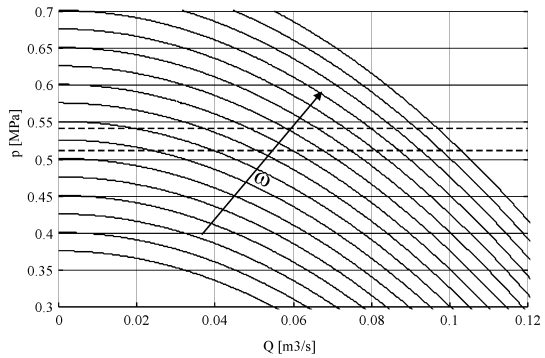
$$\begin{bmatrix} u_A(t) \\ u_B(t) \\ u_C(t) \end{bmatrix}=\frac{\sqrt{2}}{3}U_{ac}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} s_A(t) \\ s_B(t) \\ s_C(t) \end{bmatrix}$$

Główne korzyści z zastosowania układów z regulacją prędkości kątowej to możliwość realizacji łagodnych rozruchów i wyłączeń zespołów pompowych lub fragmentów układu wodociągowego oraz możliwość płynnego dostosowania wydajności pomp lub ich zespołów do aktualnego zapotrzebowania odbiorców w wodę. Ponadto płynna regulacja prędkości pozwala unikać uderzeń hydraulicznych w sieci wodociągowej.

3.3. Matematyczny opis pompy

Na potrzeby modelowania układów wodociągowych wystarczającą dokładność uzyskuje się traktując pompy jako elementy statyczne [3, 10]. Wówczas ich funkcjonowanie można opisać za pomocą zbioru charakterystyk, określających zależność ciśnienia tłoczenia od przepływu przy różnych prędkościach obrotowych (rys. 4).

Podczas pracy pompy wzrost zapotrzebowania na wodę (wzrost przepływu Q) powoduje spadek ciśnienia wody w rurociągu (p). Poprzez wzrost prędkości obrotowej pompy następuje przejście na kolejną charakterystykę i przywrócenie ciśnienia do wartości pożądanej. Analogicznie przy zmniejszaniu się zapotrzebowania na wodę prędkość obrotowa pompy malej i ciśnienie wody może być utrzymane na właściwym poziomie.



Rys. 4. Zbiór charakterystyk pompy

Analitycznie charakterystyki przepływu w modelach przedstawione są w postaci wzoru aproksymującego przyjmującego przy zmieniającej się prędkości pompy formę [11]:

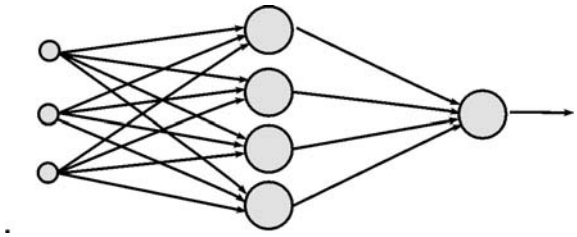
$$p = \left(\frac{\omega}{\omega_N}\right)^2 p_m - aQ^2 \qquad (4)$$

gdzie p – ciśnienie;
p_m – max ciśnienie wytwarzane przez pompę;
ω– prędkość obrotowa pompy;
ω_n – nominalna prędkość obrotowa pompy;
Q – przepływ;
a – stała pompy.

3.4. Sieć neuronowa jako model rurociągu

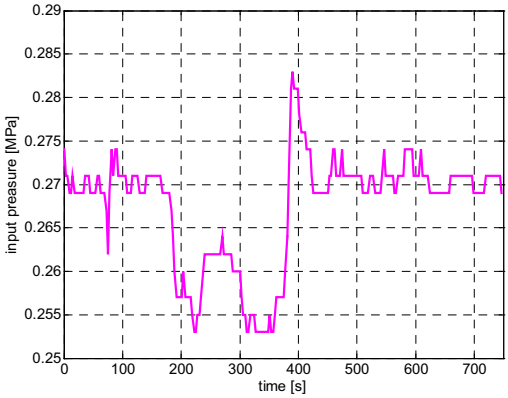
Rurociąg został opisany w oparciu o modelowanie neuronowe [9, 17]. Zaletą tej metody jest możliwość zastosowania jej do opisu obiektów nieliniowych oraz obiektów o nieznanych parametrach. Metoda nie wymaga jawnego określenia parametrów modelowanego obiektu co zwykle stanowi poważna trudność i ograniczenie przy stosowaniu metod analitycznych.

Do modelowania rurociągu wybrano sieć neuronową jednokierunkową wielowarstwową uczoną metodą nadzorowaną. Wektor wejściowy oraz oczekiwane odpowiedzi do uczenia sieci uzyskano z pomiarów w stacji przepompowni wody. Wybór odpowiedniej architektury sieci neuronowej dla danego zadania jest problemem, który nie jest jednoznacznie zdefiniowany analitycznie. Według literatury [17] do rozwiązania każdego problemu wystarcza sieć złożona z trzech warstw (wejściowej, ukrytej i wyjściowej). Architektura sieci wpływa na szybkość jej uczenia oraz na jakość pracy sieci nauczonej. Sieci o zbyt małej liczbie neuronów nie potrafią z wystarczającą dokładnością identyfikować obiektu. Przewymiarowanie sieci neuronowej prowadzi natomiast najczęściej do wystąpienia efektu tzw. przeuczenia – sieć bardzo dobrze identyfikuje wzorce uczące, natomiast jej efektywność gwałtownie spada w przypadku prezentacji wzorców spoza zbioru uczącego.

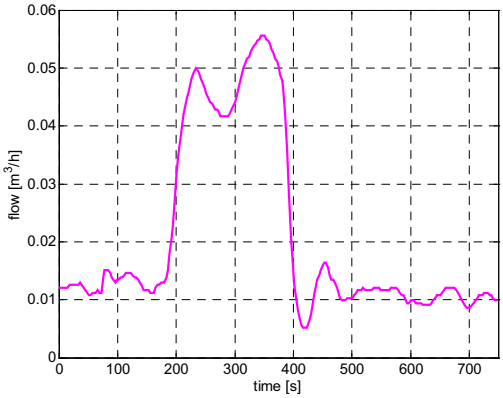


Rys. 5. Schemat sieci neuronowej wykorzystanej jako model rurociągu

Na potrzeby identyfikacji rurociągu wykorzystano sieć złożoną z 3 neuronów w warstwie wejściowej, 4 w warstwie ukrytej oraz 1 neuronu w warstwie wyjściowej (rys. 5). Ilość neuronów w warstwie zerowej wynika z długości wektora wejściowego, w skład którego wchodzą: ciśnienie wejściowe (rys. 6), przepływ (rys. 7) oraz prędkość kątowa pompy (rys. 8).

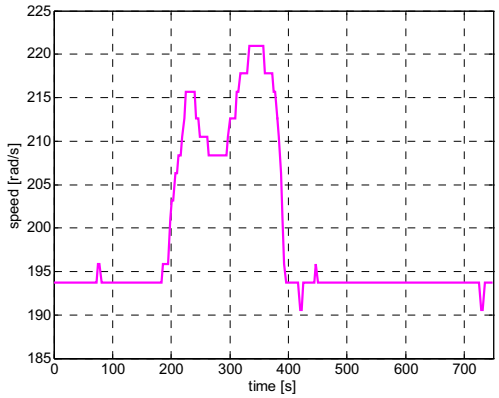


Rys.6. Przebieg ciśnienia wejściowego



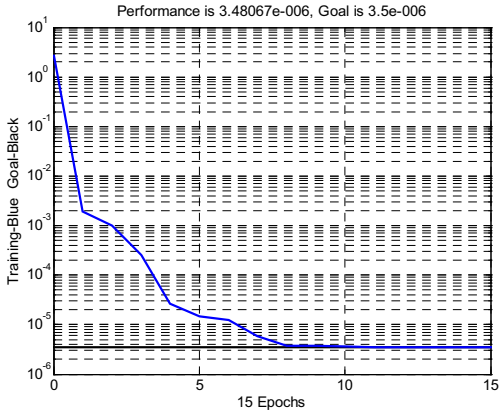
Rys. 7. Przebieg przepływu (zapotrzebowania na wodę)

Liczba neuronów w warstwie wyjściowej jest równa ilości wyznaczanych sygnałów – w przypadku rurociągu jest to tylko ciśnienie wyjściowe. Długość warstwy ukrytej wyznaczono heurystycznie gdyż brak metod, które umożliwiały by wyznaczenie jej w sposób analityczny.

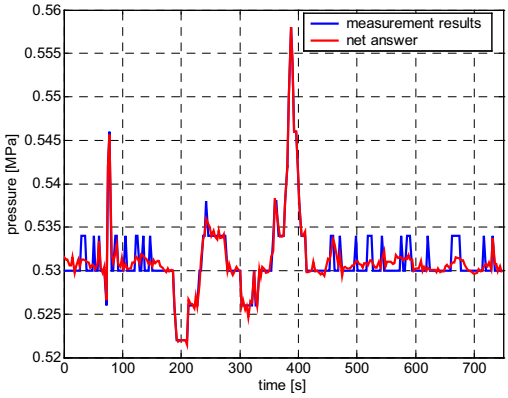


Rys. 8. Przebieg prędkości obrotowej pompy

Sieć uczono metodą Levenberga-Marquardta, zastosowanie tej metody było możliwe poprzez wykorzystanie danych pomiarowych z przepompowni. Przebieg procesu uczenia pokazano na rys. 9.



Rys. 9 Przebieg procesu uczenia sieci

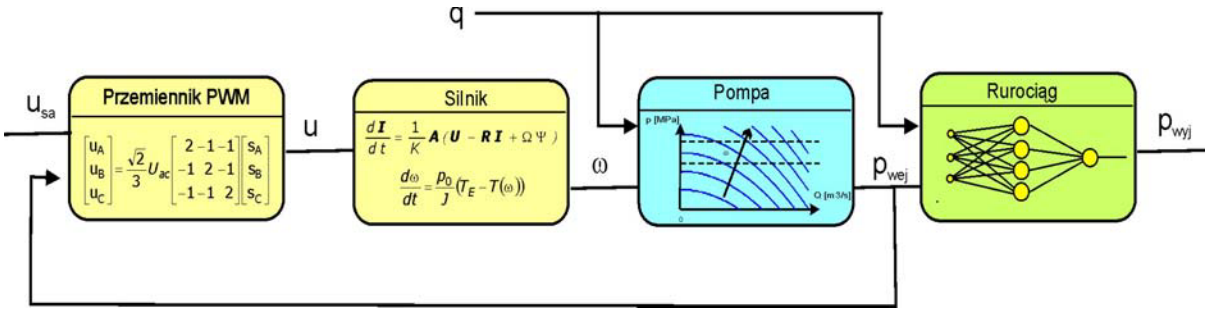


Rys. 10 Przebieg ciśnienia tłoczenia uzyskany z pomiarów (k. niebieski) oraz z modelu neuronowego (k. czerwony)

4. PODSUMOWANIE

Idea wykorzystania modelowania w procesach diagnostycznych jest powszechnie stosowana. Jej bezinwazyjny charakter wpływa na obniżenie kosztów badań, a bardzo często skraca również czas ich trwania. W pracy podjęto próbę opracowania modelu systemu „zespół pompowy – przewód", wydzielając z niego główne elementy składowe, z których każdy opisano niezależnie wykorzystując różne metody. Schemat modelu analizowanego systemu uwzględniający specyfikę modeli poszczególnych jego elementów przedstawiono na rys. 11.

Jednym z najistotniejszych problemów przy opracowywaniu opisu analitycznego układu jest konieczność znajomości jego parametrów. Dlatego też jeden z elementów opisano wykorzystując modelowanie neuronowe, a inny bazując na charakterystykach statycznych. Oceniając uzyskany model układu nie można pominąć problemu jego adekwatności z układem rzeczywistym. Adekwatność przedstawionego w artykule modelu rurociągu określono porównując wyniki symulacyjne z rezultatami uzyskanymi z pomiarów.



Rys. 11. Schemat modelu systemu „zespół pompowy – przewód" uwzględniający specyfikę modeli poszczególnych jego elementów. Kolorem żółtym oznaczono elementy opisane poprzez równania matematyczne, niebieskim opisane przez charakterystyki a zielonym modelowane neuronowo

Porównanie to (rys. 10) pokazało, iż praca rurociągu dla przypadku charakteryzującego się relatywnie niewielkimi dużymi zmianami zapotrzebowania na wodę (rys. 7) jest modelowana w sposób zadawalający. Jednak dla pełnej oceny modelu należy wykonać dodatkowe badania obejmujące jak najszerszy zakres pracy rurociągu. Wówczas możliwe będzie wykorzystanie modelu w celu monitorowania jego pracy i diagnozowania stanów awaryjnych.

PIŚMIENNICTWO

[1] Bagieński J. Ptaszyński L: *Zastosowanie przetwornic częstotliwości do regulacji pracy pomp wirowych,* Pompy Pompowanie, (2001), nr 1, str. 36-38.
[2] Bamberski J.: *Ważniejsze aspekty techniczne regulowanego napędu elektrycznego pomp,* Pompy Pompowanie, (2003), nr 2, str. 43-45.
[3] Bartman J, Koziorowska A, Kwater T.: *Badania symulacyjne układu wodociągowego podczas pracy ciągłej,* IV Krajowa konferencja „Modelowanie i symulacja". Referaty. Tom II, str 341-348.
[4] Buczek K, Bartman J., Koziorowska A.: *Model pracy systemu wodociągowego z pompą napędzaną silnikiem indukcyjnym z regulowaną prędkością,* Przegląd Elektrotechniczny, 83 (2007), nr 1, str. 9-14.
[5] Czaban W.: *Modelowanie matematyczne procesów elektromechanicznych*, Lwów 1997 (w języku ukraińskim).
[6] Kaźmierkowski M., Tunia H.: *Automatic Control of Converter-fed Drives.* Elsevier, Amsterdam-Warsow 1994.
[7] Kołodziński E.: *Symulacyjne metody badania systemów* – WAT Warszawa 2001.
[8] Koralewski B.: *Problemy związane z modelowaniem silników indukcyjnych,* Przegląd Elektrotechniczny, 78 (2002), nr 9, str. 283-287.
[9] Korbicz J., Obuchowicz A., Uciński D.: *Sztuczne sieci neuronowe: podstawy i zastosowania.* PLJ, Warszawa 1994.
[10] Korczak A.: *Dynamika układów pompowych.* Warszawa 1996.
[11] Kulbik M.: *Komputerowa symulacja i badania terenowe miejskich systemów wodociągowych*, Wyd. Politechniki Gdańskiej, 2004.
[12] Kulesza A.: Kołodziej H.: *Układy automatycznej regulacji pomp,* Pompy Pompowanie, (2001), nr 1, str. 48-51.
[13] Ławrowski Z.: *Eksploatacja silników elektrycznych napędzających pompy,* Pompy Pompownie (2002), nr 1, str. 23 – 25.
[14] Moulahoum S., Touhami O., *Induction machine models in presence of saturation and iron loss: a comparative study,* Archives of Electrical Engineering, LV, (2006), no. 2 pp. 129-146.
[15] Orłowska-Kowalska T.: *Stan obecny i tendencje rozwojowe napędu elektrycznego*, Przegląd Elektrotechniczny 80, (2004), nr 3, str. 185-197.
[16] Skowroński M.: *Współpraca pomp z napędami elektrycznymi* Pompy Pompownie (2001), nr 5, str. 26 – 29.
[17] Tadeusiewicz R.: *Sieci neuronowe.* Akademicka Oficyna Wydawnicza RM Warszawa 1993.
[18] www.hydro-vacuum.com.pl, kwiecień 2008

Dr inż. **Jacek BARTMAN** jest adiunktem w Zakładzie Elektrotechniki i Informatyki Instytutu Techniki Uniwersytetu Rzeszowskiego. Jego zainteresowania naukowe obejmują: zastosowania matematyki i informatyki w naukach technicznych i biologicznych, modelowanie matematyczne, sztuczne sieci neuronowe.

Dr inż. **Anna KOZIOROWSKA** jest adiunktem w Zakładzie Elektrotechniki i Informatyki Instytutu Techniki Uniwersytetu Rzeszowskiego. Jej zainteresowania naukowe obejmują: zastosowania matematyki i informatyki w naukach technicznych i biologicznych, modelowanie matematyczne

WPŁYW DEGRADACJI URZĄDZEŃ POMIAROWYCH NA POZYSKIWANIE SYMPTOMÓW NIESPRAWNEJ PRACY ZŁOŻONYCH OBIEKTÓW ENERGETYCZNYCH

Jerzy GŁUCH

Politechnika Gdańska Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa
Katedra Automatyki Okrętowej i Napędów Turbinowych
ul. Narutowicza 11/12, fax. 058 341 47 12, e-mail: jgluch@pg.gda.pl

Streszczenie

Opisywana jest możliwość budowania relacji cieplno-przepływowych diagnostycznych z zastosowaniem metody sztucznych sieci neuronowych. Są one zastosowane do detekcji zdegradowanych urządzeń pomiarowych w złożonych systemach pomiarowych. Przedstawiono to na przykładzie bloku energetycznego dużej mocy. Wykorzystano obliczenia symulacyjne degradacji. Rozważano zarówno degradacje samego systemu pomiarowego jak i degradacje geometrii urządzeń składowych. Pokazano dobrą jakość określania symptomów degradacji. Wykorzystano przykłady z praktyki eksploatacyjnej.

Słowa kluczowe: symulacje neuronowe, diagnostyka cieplno-przepływowa, turbiny parowe, systemy pomiarowe.

INFLUENCE OF MEASURING EQUIPMENT DEGRADATION ON GAINING OF SYMPTOMS OF LARGE POWER UNITS INEFFICIENT OPERATION

Summary

Possibility of building of diagnostic relations with usage of artificial neural networks ANN is described in the paper. The relations are applied for detection of the degraded measuring devices in steam power cycles of complex electricity generation systems. The example of the large steam turbine power plant is shown in the paper. Neuronal diagnostic relations are created on the basis of simulation calculations. There are taking into account both degradations of that of measuring equipment as well as simultaneously occurring degradations of measuring equipment and components of thermal cycle. Good quality of neuronal calculations is stated. Application of these relations is shown on some examples from exploitation practice.

Keywords: neural simulation, thermal and flow diagnostics, steam power plants, measuring systems.

1. WPROWADZENIE

Rozwój metod diagnostycznych pozwala na podejmowanie coraz trudniejszych zadań diagnostycznych. Należy do nich potrzeba diagnozowania obiektów i urządzeń technicznych w przypadku niepełnej informacji pomiarowej i przy uszkodzeniach czujników pomiarowych. Pomiary cieplno-przepływowe złożonych obiektów energetycznych należą do jednych z najtrudniejszych. Są one zawsze pomiarami niestacjonarnymi. Wyniki pomiaru zależą też od wielu niezależnych parametrów pracy obiektu, jego rozmiarów, a także rozmieszczenia i posadowienia czujników pomiarowych.

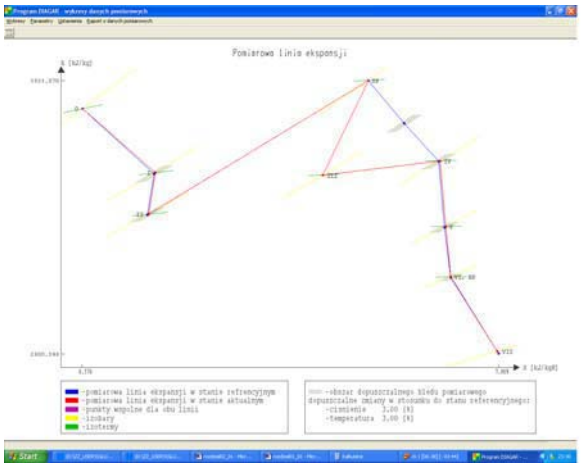
Problem jakości wyników pomiarów w energetyce od dawna stanowi przedmiot zainteresowania badaczy i praktyków z dziedziny eksploatacji złożonych systemów [1]. Przykład z praktyki rzeczywistych pomiarów bloków energetycznych elektrowni zaprezentowano na rys. 1.

Kolejny przykład z praktyki obrazujący trudności interpretacyjne rzeczywistych pomiarowych charakterystyk bloków energetycznych elektrowni zaprezentowano na rys. 2, [2]. Budzące wątpliwości liczby reprezentujące na tym rysunku sprawności ujęto w ramki. Wątpliwości dotyczą zarówno wyników pomiarów pozyskanych z sytemu DCS jak wartości referencyjnych. Takie przypadki motywują do badań zarówno nad wyznaczaniem wartości referencyjnych jak i nad sposobami weryfikacji wyników pomiarów.

Napotyka się również przypadki niepełnej informacji pomiarowej, gdy

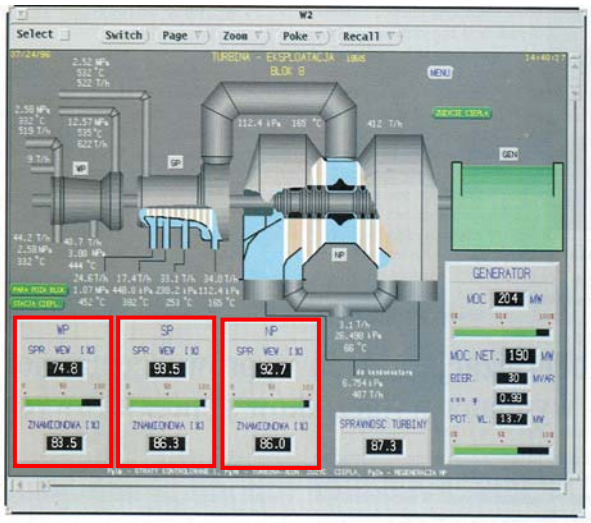
– rozmieszczenie aparatury pomiarowej nie jest spójne z potrzebami diagnostyki cieplnej, lecz podyktowane jest innymi kryteriami, np. pozyskiwaniem globalnej informacji o ruchu maszyny lub względami zapewnienia jej bezpieczeństwa, albo

– gdy warunki konstrukcyjne czynią pomiar trudny lub niemożliwy.



Rys. 1. Degradacja czujnika temperatury w III upuście bloku 200 MW [2]

Dlatego często informacja pomiarowa dotyczy sumy wpływu kilku urządzeń jednocześnie. W przypadku pojedynczego urządzenia jego diagnostyka byłaby w tej sytuacji niemożliwa. Jak to pokazano w [3], dla złożonego obiektu energetycznego, dla którego zakłócenia w pracy jednego urządzenia propagują się na inne urządzenia możliwa jest separacja składowych sygnałów pomiarowych. Istnienie takiej propagacji stwarza szansę na rozpoznawanie błędów czujników pomiarowych. Niesprawności czujników pomiarowych nie propagują się na wskazania innych czujników.



Rys. 1.5. Monitoring pracy turbiny parowej z elementami diagnozy, wg. [3]

Zbadanie szans odróżnienia uszkodzenia czujnika od degradacji eksploatacyjnej urządzeń składowych obiegu to jedno z ważniejszych zadań diagnostyki cieplno-przepływowej bloków energetycznych. Przytoczone w dalszej części wyniki obliczeń symulacyjnych mają odpowiedzieć na pytania:

– jak szczegółowa może być diagnostyka rozważanego podsystemu urządzeń,
– czy można odróżnić uszkodzenie czujnika od degradacji urządzenia.

Odpowiedź na te pytania ma wielkie znaczenie dla projektantów systemów pomiarowych i dla użytkowników systemów diagnostyki. Przedstawione są w dalszej części badania wykorzystują metodę sztucznych sieci neuronowych.

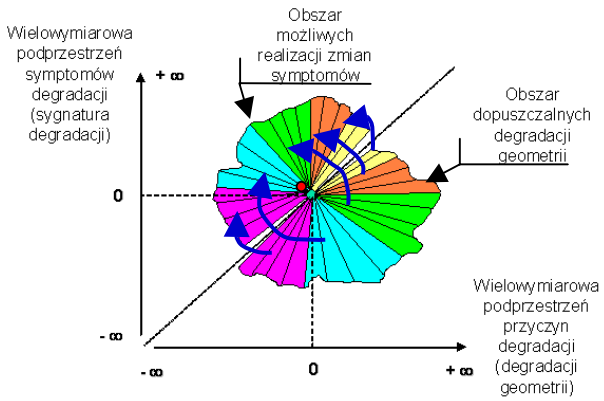
2. OKREŚLANIE SYMPTOMÓW NIESPRAWNEJ PRACY

Blok energetyczny może pracować w stanie pogorszonej sprawności, o ile tylko nie zagraża to jego bezpieczeństwu. Znajduje się on wtedy w stanie tzw. zdatności zadaniowej [1]. Przyczyną pogorszenia sprawności są degradacje geometrii jego urządzeń składowych [4]. Degradacja geometrii może być tylko na tyle głęboka dopóki nie zagraża bezpieczeństwu, rys. 3. Pogorszona sprawność objawia się symptomami, wyrażanymi najlepiej poprzez względne odchyłki wartości aktualnie mierzonych od wartości referencyjnych:

$$SY_{j\,k} = \frac{Wart_{j\,k\,akt} - Wart_{j\,k\,ref}}{Wart_{j\,k\,ref}} \qquad (1)$$

Wartości referencyjne odpowiadają pracy obiektu przy poprawnej geometrii. Wartości mierzone są reprezentowane przez rozkłady ciśnień, temperatur
i strumieni masy i charakterystyki sprawnościowe obliczone na ich podstawie. Zwykle są zbierane w sygnatury niesprawnej pracy:

$$S_k = S_k[SY_{1\,k}, SY_{2\,k}, \ldots., \ldots., SY_{j\,k}] \qquad (2)$$

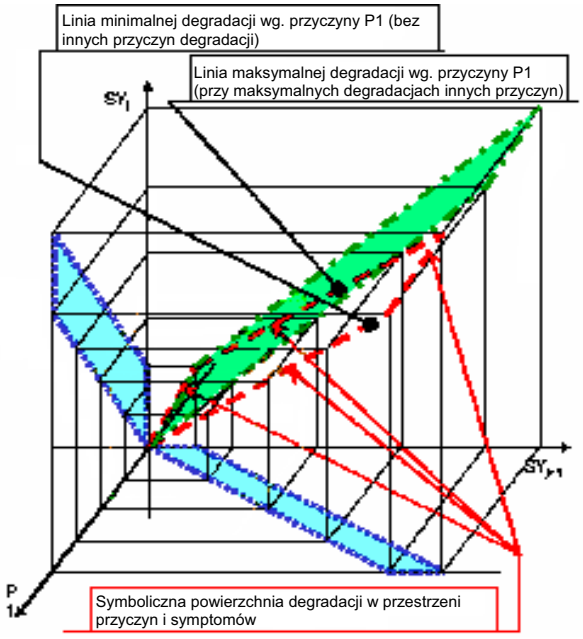


Rys. 3. Symboliczny obraz wpływu degradacji geometrii i mierników na wartości symptomów

Dla tej samej degradacji geometrii symptomy są funkcjami parametrów obciążenia bloku, więc zarówno wartości referencyjne jak i aktualne muszą być brane dla tego obciążenia. Dobrze sprawdza się dostrojony model obiegu bloku jako estymator wartości referencyjnych [2]:

$$S_k = f\left(ZN_{1\,k}, ZN_{2\,k}, ZN_{3\,k}, \ldots ZN_{nzn\,k}\right) \qquad (3)$$

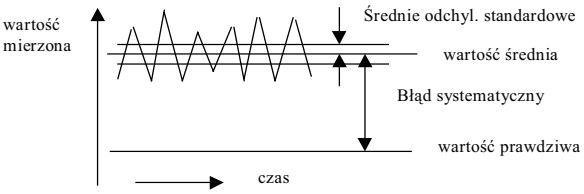
Zakładając wstępnie bezbłędny pomiar można przedstawić symbolicznie położenia obszarów zmienności symptomów w podprzestrzeni symptomów i podprzestrzeni przyczyn, rys. 4. Stosując odpowiednio przygotowane relacje diagnostyczne oparte o metody sztucznych sieci neuronowych można w tych przestrzeniach zlokalizować degradacje i określić ich rozmiar [2].



Rys. 4. Symbolicznie obrazy położenia obszarów zmienności symptomów w podprzestrzeni symptomów i podprzestrzeni przyczyn przy poprawnym pomiarze

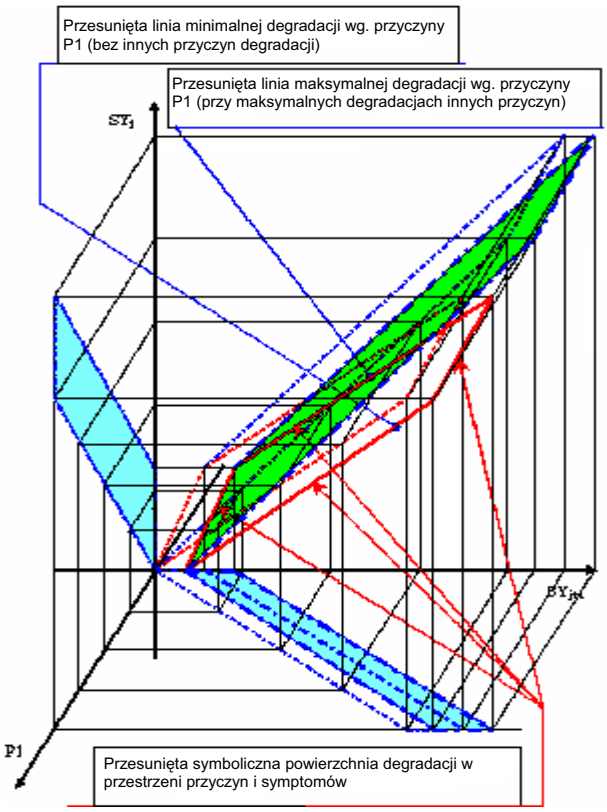
3. OCENA JAKOŚCI POMIARU ZŁOŻONEGO OBIEKTU

Błędy i niepewności pomiarowe pogarszają jakość relacji diagnostycznych. Pierwszym krokiem do sprostania wyzwaniu uwzględnienia jakości pomiaru jest lokalizacja zdegradowanych mierników. Nie przywołując całej skomplikowanej teorii błędów pomiarowych, na rys. 5 przedstawiono koncepcję ich badania w rozważanym przypadku [5]. Przyjęto istnienie prawdziwej wartości pomiarowej, która w realnych warunkach nie może być zmierzona. Pod uwagę brana jest część losowa błędu miernika i jego błąd systematyczny. Część losowa zależy od samego miernika oraz od fluktuacji innych parametrów w obiegu niż mierzony. O degradacjach mierników decyduje głównie powiększanie błędu systematycznego.



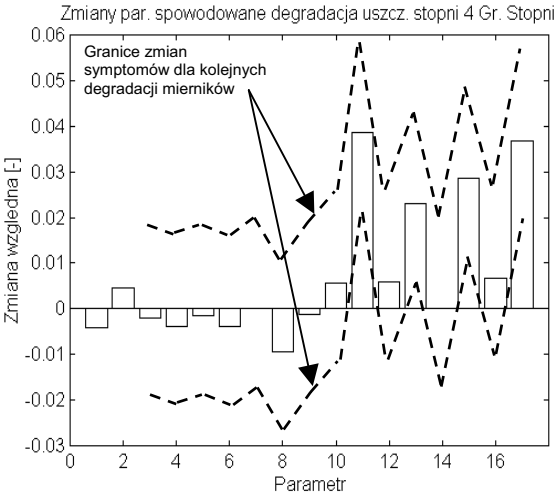
Rys. 5. Koncepcja rozważania błędów mierników

Tak rozumiany błąd pomiarowy zależy od degradacji miernika (jego wymiany), natomiast nie wpływa na wskazania innych przyrządów. Powoduje on więc zniekształcenie jednego tylko symptomu w sygnaturze degradacji. Wymaga stąd znajomości sygnatur uwzględniających również degradacje geometryczne. Wtedy może służyć do budowania relacji diagnostycznych zarówno do rozpoznawania degradacji geometrycznych jak i degradacji mierników. Zmiany położenia obszarów zmienności symptomów przy opisanym potraktowaniu błędu pomiarowego pokazano symbolicznie na rys. 6.



Rys. 6. Symbolicznie obrazy zmiany położenia obszarów zmienności symptomów w podprzestrzeni symptomów i podprzestrzeni przyczyn przy degradacji czujnika pomiarowego

Opisaną powyżej koncepcję traktowania błędu pomiarowego zastosowano do rozszerzonej relacji diagnostycznej przewidzianej do rozpoznawania zarówno degradacji urządzeń składowych bloku energetycznego jak i degradacji mierników. Rozważano pomiędzy nimi degradacje pojedyncze, dwukrotne i trzykrotne. Zastosowano metodę obliczeń symulacyjnych degradacji urządzeń i degradacji mierników. Fragment sygnatury, na którym zaznaczono granice kolejno rozważanych degradacji mierników przy jednej z degradacji geometrycznych przedstawiono na rys. 7, [5].



Rys. 7. Granice zniekształcania symptomów degradacji geometrycznej przez kolejno następujące degradacje mierników

Zastosowanie opisanych sygnatur w relacji diagnostycznej prowadzi do rozpoznawania wielokrotnych degradacji geometrii i czujników przedstawionej w Tabeli 1, [5].

Tabela 1.
Wyniki zastosowania sztucznych sieci neuronowych do rozpoznawania degradacji i czujników i urządzeń składowych obiegów cieplnych [5]

% udział błędnie rozpoznanych wzorców degradacji	Dla testu z wykorzystaniem Bazy Danych użytej do trenowania	Dla testu z wykorzystaniem Bazy Danych nie używanej do trenowania
jednokrotnych	$\Delta_{3.1} = \frac{0}{4 \cdot 37} \cdot 100\% = 0\%$	$\overline{\Delta_{3.1}} = \frac{0}{2 \cdot 37} \cdot 100\% = 0\%$
dwukrotnych	$\Delta_{3.2} = \frac{0}{666} \cdot 100\% = 0\%$	$\overline{\Delta_{3.2}} = \frac{4}{3 \cdot 666} \cdot 100\% = 0.202\%$
trzykrotnych	$\Delta_{3.3} = \frac{5}{7770} \cdot 100\% = 0.064\%$	$\overline{\Delta_{3.3}} = \frac{39}{2 \cdot 7770} \cdot 100\% = 0.2509\%$

Widać wyraźnie, że rozpoznawanie degradacji jednokrotnych jest bezbłędne, degradacji dwu-trzykrotnych obarczone niewielkim błędem.

4. PODSUMOWANIE

Traktowanie degradacji mierników złożonych systemów pomiarowych w podobny sposób jak degradacji geometrii pozwala na:
- Wyznaczenie sygnatury degradacji urządzeń składowych i mierników,
- Zastosowanie tych sygnatur do tworzenia relacji diagnostycznych opartych o metody sztucznych sieci neuronowych
- Uzyskanie dobrej dokładności lokalizacji degradacji przy zastosowaniu powyższych relacji. Patrz Tab. 1.

LITERATURA

[1] Żółtowski B., Ćwik Z.: *Leksykon Diagnostyki Technicznej,* Bydgoszcz: Wyd. Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej 1996, s. 486
[2] Głuch J.: *Metoda diagnostyki cieplno-przepływowej umożliwiająca rozpoznawanie miejsca i stopnia degradacji turbozespołów energetycznych*, Seria Monografie Nr 81, Gdańsk: Wyd. Politechniki Gdańskiej 2007, s. 174
[3] Boczek F., Dyrda B., *Obliczenia eksploatacyjne PERFORMANCE CALCULATION,* Energetyka, nr 12/1996, Grudzień, 1996, s. 703-707.
[4] Krzyżanowski J., Głuch J.: *Diagnostyka cieplno-przepływowa obiektów energetycznych,* Gdańsk: Wyd. Inst. Masz. Przepł. PAN 2004, s. 302
[5] Praca zbiorowa pod red. Głucha J.: *Cieplno-przepływowe relacje diagnostyczne w ruchowych warunkach przemysłowych*, Gdańsk: Wyd. Wydz. Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej 2007, s.174

Dr inż. **Jerzy GŁUCH** jest adiunktem w Katedrze Automatyki Okrętowej i Napędów Turbinowych Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej. Jego głównym polem zainteresowania jest diagnostyka cieplno - przepływowa bloków energetycznych. Jest autorem licznych publikacji.

GENEZOWANIE STANU TECHNICZNEGO MASZYN

Henryk TYLICKI

Katedra Inżynierii Pojazdów i Transportu, Wydział Mechaniczny,
Uniwersytet Technologiczno – Przyrodniczy, ul. S.Kaliskiego 7, 85-763 Bydgoszcz,
tylicki@utp.edu.pl

Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono problematykę genezowania stanu maszyn w procesie rozpoznawania stanu maszyn. Zaprezentowano także algorytmy wyznaczania optymalnych procedur genezowania wartości parametru diagnostycznego i określenie przyczyn stanu niezdatności maszyn.

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

THE GENESIS OF MACHINES TECHNICAL STATE

Summary

The problems in study was introduced the genesis of machine engines state in process the dagnostics of machine engines state. The algorithms of marking the optimum procedures were presented the genesis of diagnostic value parameter and qualification of state causes unfitness machine engines also.

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

WPROWADZENIE

Zastosowanie w procesie eksploatacji optymalnych metod oceny stanu technicznego maszyn jest podstawą automatyzacji procesu rozpoznawania stanu. Wymaga to wielu przedsięwzięć, do których za jedno z ważniejszych, obok oceny stanu i prognozowania stanu, uważa się genezowanie stanu technicznego maszyn.

Problematyka genezowania stanu technicznego wymaga przeprowadzenia analizy ewolucji stanu technicznego maszyn, identyfikacji problemów rozpoznawania stanu maszyny i sposobów ich rozwiązania, oraz określenie możliwości wykorzystania metod optymalizacyjnych do rozwiązania zidentyfikowanych i sformułowanych powyżej problemów.

Przeprowadzone analiza wyników badań w tym zakresie [1, 2, 3, 4, 5, 6] pozwala stwierdzić, że:

1. W wielu opracowaniach krajowych i zagranicznych ośrodkach badawczych przedstawia się nowoczesne systemy rozpoznawania stanu maszyn, których analiza pozwala generować informacje o stanie technicznym jak i o stanie procesów zachodzących w zespołach i układach maszyn. Przykładem są liczne opracowania w kraju (np. system DIADYN, system AMandD, system RSTM – System Rozpoznania Stanu Maszyn) i na świecie (HUMS – Health and Usagy Monitoring System, Diagnostic System Metro of Medelin).
2. Projektowane i wprowadzane obecnie w krajach Unii Europejskiej przepisy ISO dotyczące wymagań, jakie mają spełniać maszyny, gdzie przewiduje się pokładowe systemy diagnostyczne, które rozpoznają, zapamiętują, sygnalizują, prognozują i genezują stany zespołów i układów maszyn. Stwierdza się także, że proste procedury wyznaczania genezy stanu stanowią podstawę oprogramowania systemów doradczych, np. przy analizie wypadków drogowych (pakiet CRASCH i inne), w pokładowym systemie sterująco – diagnostycznym EOBD silników spalinowych samochodów lub w systemach pokładowych statków powietrznych typu fly-by-wire i fly-by-light.
3. W chwili obecnej nie ma użytkowych metod genezowania stanu maszyn, które można wykorzystać w praktyce (szczególnie w aspekcie opisu przebiegu i przyczyny zaistniałego stanu niezdatności maszyny), stąd rozpatrzono możliwość wykorzystania genezowania sytuacyjnego, genezowania eksperckiego i genezowania symptomowego. Za najbardziej przydatną metodę przyjęto genezowanie symptomowe, wykorzystujące

rejestrowane w trakcie eksploatacji maszyny zmienne wartości parametrów diagnostycznych;

4. W celu poprawnego funkcjonowania nowoczesnych systemów obsługiwania maszyn istnieje potrzeba opracowania metodyki, która w przypadku niepełnej lub niepewnej historii wartości parametrów diagnostycznych maszyny umożliwi szacowanie stanu maszyny w czasie przeszłym eksploatacji (genezowanie stanu maszyny);
5. W celu optymalizacji procesu genezowania stanu proponuje się wykorzystać narzędzia optymalizacji wielokryterialnej w zakresie:
   a) wyznaczenia optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych;
   b) optymalnej metody genezowania stanu maszyny do wyznaczenia wartości genezowanej parametru diagnostycznego;
   c) szacowania stanu maszyny w przeszłości.

Reasumując zawarte powyżej rozważania stwierdza się, że istnieje potrzeba oraz istnieje możliwość opracowania procedur genezowania stanu maszyny. Wynika to z przeprowadzonej analizy procesu rozpoznawania stanu maszyn oraz wyróżnienia metody genezowania symptomowego jako najbardziej odpowiedniej do szacowania stanu maszyny w przeszłości. Ponadto możliwość wykorzystania narzędzi optymalizacji wielokryterialnej w obszarze wyznaczenia optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych i w obszarze wyznaczenia optymalnej metody genezowania wartości parametru diagnostycznego w przeszłości umożliwia opracowanie procedur metodyki genezowania stanu maszyny, możliwej do wykorzystania, w wspomaganym komputerowo, systemie rozpoznawania stanu maszyn.

1. SYNTEZA GENEZY STANU MASZYNY

Na podstawie wniosków i ustaleń poczynionych w trakcie analizy procesu genezowania stanu maszyn [5] można stwierdzić, że genezowanie stanu technicznego maszyny powinno polegać na:

a) określeniu (przy niepełnych lub niepewnych danych wartości parametrów diagnostycznych) trendu zmian wartości parametrów diagnostycznych, charakteryzującego proces pogarszania się stanu maszyny w przeszłości;
b) przyrównaniu chwilowych wartości parametrów diagnostycznych do wartości granicznych;
c) szacowaniu stanu technicznego maszyny w interesującym użytkownika czasie przeszłym eksploatacji maszyny, np. w celu określenia przyczyny zlokalizowanego w chwili badania uszkodzenia maszyny.

Rozwiązanie przedstawionego postulatu można przedstawić w postaci następującego algorytmu:

1. Niech zjawisko pogarszania się stanu technicznego maszyny będzie reprezentowane szeregiem czasowym $y_\Theta = \langle y_1, y_2, ..., y_b \rangle$, to jest zbiorem dyskretnych obserwacji $\{y_\Theta = \zeta(\Theta); \Theta = \Theta_1, \Theta_2, ..., \Theta_b\}$ pewnego procesu stochastycznego $\zeta(\Theta)$.
2. Przy założeniu, że mechanizm zmian wartości procesu stochastycznego w czasie $\Theta \in (\Theta_1, \Theta_b)$ kształtuje trend $\mu(\Theta)$ zakłócony różnymi oddziaływaniami losowymi $\eta(\Theta)$:

$$y_\Theta = \mu(\Theta) + \eta(\Theta) \tag{1}$$

gdzie: $\mu(\Theta)$ - charakteryzuje zdeterminowany składnik szeregu czasowego y_Θ i opisuje tendencję rozwojową obserwowanego parametru diagnostycznego $y(\Theta)$,

$\eta(\Theta)$ - charakteryzuje odchylenia od trendu i wyraża działanie czynników przypadkowych (obciążenie, warunki terenowe, warunki klimatyczne, jakość obsług, inne)

konstruuje się takie oszacowanie $\{\mu_G(\Theta)\}$ dla nieznanej postaci trendu $\mu(\Theta)$, które zapewniałoby odpowiednią dokładność genezy $y_G(\Theta)$ dla czasu pracy maszyny Θ_G, gdzie $\Theta_G = \Theta_b - \tau_2$.

3. Oszacowanie $\mu_G(\Theta)$ wyznacza wówczas wartości obserwowanych parametrów diagnostycznych w chwili Θ_G, a tym samym możliwość genezowania stanu technicznego maszyny $S(\Theta_G)$ na podstawie badania dopuszczalnego stanu eksploatacji maszyny S_{dop} w chwili Θ_G.
4. Dopuszczalny stan techniczny maszyny S_{dop} w przedziale czasu (Θ_1, Θ_b) wyznaczany jest przez wartość czasu, dla którego poszczególne genezy $\{y_{j,G}\}$ określone na podzbiorze $\Omega^y \in \Omega$ dostępnych realizacji obserwowanych parametrów $\{y_j(\Theta)\}$ i odpowiadające im promienie przedziału błędu genezowania $\{r_{jG}\}$ według przyjętej metody genezowania nie przekraczają wartości granicznych $\{y_{j,g}\}$

$$r_G = q_{\gamma,K} \cdot \sigma_G \tag{2}$$

gdzie:

$q_{\gamma,K}$ - parametr stały wyznaczany z tablicy rozkładu Studenta do wymaganego poziomu ufności γ i K-2 liczby stopni swobody,

σ_G - odchylenie standardowe składnika losowego błędu genezy e_G;

5. W przypadku systemu obsługiwania maszyny wymaganą postacią genezy stanu maszyny jest informacja, czy w czasie (Θ_1, Θ_b) stan techniczny był stanem dopuszczalnym S_{dop}, co umożliwia szacowanie stanu maszyny w przeszłości i ewentualne określenie przyczyny stanu niezdatności stwierdzonego w chwili badania maszyny Θ_b.

Przedział czasu (Θ_1, Θ_b) będzie wówczas okresem estymacji wartości oczekiwanej błędu genezy e_G i promienia granicy błędu genezy $r_{\sigma G}$, zaś

okres czasu Θ_b - τ_2 będzie okresem aktywnej genezy stanu, tzn. wyznaczenia:

a) wartości genezowanej parametru diagnostycznego dla horyzontu genezy τ_2, $y_{jG}(\Theta_b-\tau_2)$;
b) określenie wartości promienia przedziału błędu genezy $r_G(\Theta_b - \tau_2)$;
c) wyznaczenie ewentualnych czasów $\{\Theta_{Gi}\}$ przejścia zespołu lub układu maszyny w stan niezdatności;
d) wnioskowanie o przyczynie i okolicznościach ewentualnego stanu niezdatności stwierdzonego podczas realizacji testu lokalizacji uszkodzeń maszyny $s_i(T_{LU})$.

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

a) wyznaczyć wartości genezowane parametru diagnostycznego;
b) określić wartości błędu genezy;
c) określić relację pomiędzy zmianami wartości genezowanej parametru diagnostycznego z błędem genezy i wartością graniczną parametru diagnostycznego;
d) wykorzystać genezę stanu technicznego do analizy przyczyny zaistnienia stanu niezdatności maszyny w chwili jej badania Θ_b.

2. ALGORYTM GENEZY STANU TECHNICZNEGO MASZYNY

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

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.

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

1. Genezowanie wartości zbioru parametrów diagnostycznych $\{y_j^*\}$:

a) za pomocą metody aproksymacji wartości parametru diagnostycznego y_j^* w przedziale czasu (Θ_1, Θ_b) wraz z promieniem błędu aproksymacji „kanału błędowego" r_a metodami (metoda średniokwadratowa, metoda trygonemetryczna),
b) za pomocą interpolacji wartości parametru diagnostycznego y_j^* w przedziale czasu (Θ_1, Θ_b) wraz z promieniem błędu interpolacji „kanału błędowego" r_i 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 $\{s_i(\Theta_k)$, i=1,…, 1; k=1, …, K$\}$.
b) określenia punktu wspólnego „kanału błędowego" wyznaczonego przez promień błędu $r_j^*=\max(r_{ja},r_{ji})$ i wartość graniczną parametru diagnostycznego y_j^* w chwili $\Theta_S\in(\Theta_1, \Theta_b)$, co oznacza że przyczyną wystąpienia zlokalizowanego stanu $s_i(\Theta_b)$ było „chwilowe pojawienie" się tego stanu w czasie (Θ_1, Θ_b);
c) określenia większej liczby punktów wspólnych „kanału błędowego" wyznaczonego przez promień błędu $r_j^*= \max(r_{ja}, r_{ji})$ i wartości granicznej parametru diagnostycznego y_j^* w chwilach $\Theta_S\in(\Theta_1, \Theta_b)$ oznacza, że przyczyną wystąpienia zlokalizowanego stanu $s_i(\Theta_b)$ był „narastający rozwój" stanu s_i w czasie (Θ_1, Θ_b);
d) w przypadku braku punktów wspólnych określenie minimalnej odległości d_{min} „kanału błędowego" od wartości granicznej w chwili $\Theta_S\in(\Theta_1,\Theta_b)$, co oznacza że prawdopodobną przyczyną wystąpienia zlokalizowanego stanu $s_i(\Theta_b)$ było „chwilowe niepełne pojawienie się " się tego stanu w czasie (Θ_1,Θ_b);
e) analiza podobieństwa zbioru stanów $\{s_i(\Theta_S)\}$ i zlokalizowanego przez T_{LU} stanu $s_i(\Theta_b)$ w celu określenia przyczyny jego wystąpienia w kontekście otrzymanych ewentualnych „punktów wspólnych", minimalnej odległości „zbliżeń" oraz znajomości okoliczności i warunków wystąpienia stanów $s_i\in\{s_i(\Theta_S)\}$.

3. IMPLEMENTACJA ALGORYTMU GENEZOWANIA STANU

Zakres implementacji procedur metodyki genezowania stanu został sformułowany na podstawie opracowanego algorytmu metodyki genezowania stanu maszyn, to jest:

a) badanie zbioru parametrów diagnostycznych w aspekcie wyznaczenia optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych do genezowania wartości parametrów diagnostycznych;
b) Badanie jakości genezowania w aspekcie:

- wyznaczenia metody genezowania według funkcji błędu genezy,
- badanie wpływu liczebności zbioru parametrów diagnostycznych na błąd genezy.

Opierając się na powyższych ustaleniach oraz wykorzystując wyniki analizy komputerowej

w diagnostyce maszyn [1, 2, 3, 4, 6] sformułowano zadania do zaimplementowania, to jest:

1. Pozyskanie danych pomiarowych:
   a) wprowadzanie danych;
   b) import danych z innych systemów bazodanowych lub z plików tekstowych;
   c) edycja danych;
   d) zapis wprowadzonych danych do bazy danych;
2. Optymalizacja zbioru parametrów diagnostycznych;
3. Genezowanie stanu maszyny:

a) określenie zbioru metod genezowania;
b) obliczenie wartości genezowanej parametrów diagnostycznych,
c) wyznaczenie błędu genezy,
d) wyznaczenie wartości minimalnych odległości przedziału błędu od wartości granicznej parametru diagnostycznego;
e) zapisanie wyników genezy do bazy danych, celem przeprowadzenia analiz porównawczych;

4. Raportowanie i wizualizacja danych:

a) wizualizacja wybranych szeregów w formie wykresów liniowych i punktowych;
b) możliwość powiększenia wybranego obszaru wykresu;
c) możliwość przesuwania zawartości wykresu;
d) wyświetlanie w formie tabelarycznej wyników przeprowadzanych symulacji.

W wyniku analizy powyższych ustaleń zostały wyznaczone następujące moduły programu komputerowego „Genezowanie Stanu":

a) **Akwizycja Danych** (wprowadzanie, edycja i zapis danych wejściowych),
b) **Optymalizacja Parametrów Diagnostycznych** (macierz obserwacji, relacje parametr – stan, redukcja zbioru parametrów diagnostycznych według metody „punktu idealnego");
c) **Genezowanie Stanu** (wartość genezowana, błąd genezy, wyznaczenie i badanie wartości minimalnych odległości przedziału błędu od wartości granicznej parametru, badanie przyczyny zlokalizowanych stanów maszyn);
d) **Raportowanie** (grupowanie poszczególnych symulacji celem porównania wyników).

Opracowany program komputerowy pracuje w systemie Windows [5]. Został on napisany w języku Java z wykorzystaniem Firebird 1.5 jako silnika bazodanowego. Ponadto w programie wykorzystano zaawansowane komponenty pakietu Swing dla pakietu Java (TM) SE Runtime Environment 6.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawione powyżej rozważania, sformułowane w postaci algorytmów genezowania stanu maszyn odnoszą się do przedstawionego w opracowaniu schematu rozpoznawania stanu maszyn. Ze względu na zaproponowany niezbyt liczny zbiór rozwiązań dopuszczalnych (zbiór metod genezowania) nie można stwierdzić, że jest to rozwiazanie ostateczne i może stanowić gotowy element projektu systemu rozpoznawania maszyn. Może stanowić podstawę do dalszych prac w obszarze softwaru pokładowego systemu rozpoznawania stanu technicznego 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] Tylicki H. i inni: *Sprawozdanie z projektu badawczego KBN nr 4 T07B 033 26*. UTP, Bydgoszcz 2007.
[6] Żółtowski B.: *Podstawy diagnostyki maszyn*. Wydawnictwa Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1997

Dr hab. inż. **Henryk TYLICKI**, prof. nadzw. UTP w działalności naukowej zajmuje się problemami diagnostyki technicznej, eksploatacji maszyn i optymalizacją systemów transportowych. Ma w swoim dorobku ponad 150 publikacji, w tym 8 pozycji książkowych (własne i współautorskie), 90 publikacji naukowych, 65 publikacji naukowo-technicznych i konferencyjnych. Wypromował kilkudziesięciu absolwentów studiów magisterskich i inżynierskich oraz recenzuje prace naukowo-badawcze, promocyjne, a także dorobek naukowy.

TRANSFORMACJA FALKOWA W DIAGNOSTYCE URZĄDZEŃ MECHANICZNYCH

Waldemar KUROWSKI*, Izabela JÓZEFCZYK**

*Instytut Inżynierii Mechanicznej
Wydział Budownictwa Mechaniki i Petrochemii, Politechnika Warszawska,
Płock, ul. Jachowicza 17, e-mail: qurovski@wp.pl
**Zakład Matematyki i Fizyki
Wydział Budownictwa Mechaniki i Petrochemii, Politechnika Warszawska

Streszczenie

Przekształcenie falkowe polega na dekompozycji sygnału na aproksymację i detal. Zakłada się, że aproksymacja reprezentuje składową niosącą widmowe informacje diagnostyczne, i dokonuje się jej transformacji do dziedziny częstotliwości. Takie wykorzystanie przekształcenia falkowego powinno być uwarunkowane posiadaniem wiedzy o tym, jakie informacje diagnostyczne, i w jaki sposób, są wytwarzane i prezentowane, w rezultacie obróbki sygnału oraz jak są one zakłócane.

Podczas przekształcenia falkowego iloczyn pod całką „szuka" uśrednionego po czasie, podobieństwa między sygnałem i funkcją, reprezentującą falkę. Wraz ze wzrostem poziomu dekompozycji, przebieg aproksymacji staje się coraz bardziej podobny do przebiegu falki Jest to równoznaczne z niekontrolowaną modyfikacją sygnału, która może spowodować zakłócenie lub utratę prawdziwych informacji widmowych o stanie urządzenia; może również wytworzyć nieprawdziwe informacje, których nie ma w sygnale.

Słowa kluczowe: informacja diagnostyczna, numeryczna obróbka sygnałów, transformacja falkowa.

WAVELET TRANSORM IN MECHANICAL DEVICES DIAGNOSTICS

Summary

The wavelet transform consists in decomposition of the signal in approximation and detail. The assumption was made that the approximation represents the determined component, which contains spectral diagnostics information and it is transformed into a frequency domain. This kind of usage of wavelet transform should be determined by what diagnostic information is presented in the signal and in what way it is produced and represented during transformation. It is also important how it is disturbed. In the wavelet transform procedure, the product under the integral "looks for" the similarity between the signal function and the function which represents the wavelet average in time, treated as a pattern. In effect, together with the increase of the decomposition level, the approximation pattern is more and more similar to the pattern of the origin wavelet. It is equivalent to not controlled modification of the diagnostic signal and can cause disturbance or losing true frequency information about the state of the mechanical device. It could also produce false information, which is not in the collected signal.

Keywords: diagnostic information, digital signal processing, wavelet transform.

1. WPROWADZENIE

Realizacje czasowe wielkości fizycznych, wybranych jako sygnały diagnostyczne, można postrzegać jako sumę dwóch składowych: zdeterminowanej i losowej. Zakłada się, że ta pierwsza - niesie zakodowane informacje o zużyciu powierzchniowym i objętościowym oraz o niedokładnościach wykonania i montażu, badanego urządzenia. Składowa losowa niesie informacje o szumach i zakłóceniach występujących podczas funkcjonowania. Ponieważ postępowanie diagnostyczne ma przeważnie na celu pozyskanie informacji, które są zawarte w składowej zdeterminowanej, to separacja składowych może ułatwić zdekodowanie tych informacji.

Dla separacji składowych wykorzystuje się przekształcenie falkowe, które polega wydzieleniu z sygnału diagnostycznego $f(t)$, części, która jest podobna do wybranego wzorca, i z założenia, odzwierciedla składową zdeterminowaną. Jako wzorzec służy falka podstawowa $\Psi(t)$, zwana macierzystą, która spełnia dwa warunki:

$$1)\ \int_{-\infty}^{\infty}\Psi(t)dt = 0\,, \qquad 2)\ \int_{-\infty}^{\infty}\left|\Psi(t)\right|^2\ dt < \infty\,.$$

Aby spełnić pierwszy warunek, funkcja $\Psi(t)$ musi mieć kilka oscylacji. To oznacza, że jest falą, niewielką w porównaniu z sygnałem, i stąd jej

nazwa - mała fala, czyli falka (ang.: *wavelet*). Drugi warunek oznacza, że energia reprezentowana przez funkcję falkową jest ograniczona [1, 2, 3, 4].

W badaniach diagnostycznych urządzeń mechanicznych, zakłada się bez dowodu, że sygnały i funkcje falkowe są elementami przestrzeni metrycznej i unormowanej, z iloczynem skalarnym. Liczba nieujemna, która jest metryką, określa odległość między porównywanymi elementami, w sensie ich podobieństwa. Miarą intensywności sygnału lub falki jest liczba nieujemna, zwana normą. Iloczyn skalarny, dwóch sygnałów lub sygnału i funkcji falkowej, zdefiniowany w takiej przestrzeni, określa ich zależność. Jeżeli iloczyn skalarny jest równy zero, to mnożone wielkości są ortogonalne, co oznacza, że są od siebie niezależne [3, 4].

Dla wykonania przekształcenia falkowego, funkcję $\Psi(t)$ wyraża się w postaci falki wzorcowej $\Psi_{m,n}(t)$, która jest zbiorem funkcji, indeksowanych podwójnie, wartościami: $m,n = 0,1,2,...$:

$$\Psi_{m,n}(t) = 2^{m/2}\Psi(2^m t - n) \qquad (1)$$

Podstawiając: $s = 2^{-m}$ i $\tau = 2^{-m}n$, falkę wzorcową można wyrazić za pomocą wzoru Morleta-Grosmanna (2). W tej zależności, różne wartości *m*, decydują o skalowaniu (intensywności) falki wzorcowej, natomiast różne wartości *n*, pozwalają na przesuwanie tej falki wzdłuż osi czasu *t*. W konsekwencji, $s > 0$ – można uznać jako parametr skali, a τ - jako parametr przesunięcia:

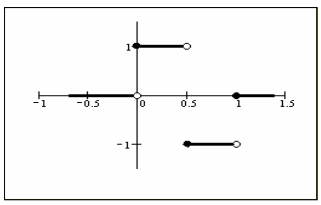
$$\Psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}}\Psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \qquad (2)$$

Dla stosowanych przekształceń, korzysta się z falek podstawowych, dobrze określonych, jak np.:

1. Falka Haara, pokazana na rysunku 1, którą można zapisać w postaci:

$$\Psi(t) = \begin{cases} 1 & dla \quad 0 \le t < \frac{1}{2} \\ -1 & dla \quad \frac{1}{2} \le t < 1 \\ 0 & dla \quad innych \end{cases}$$

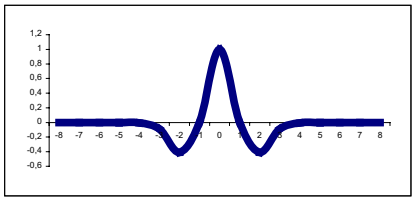
Dla: $n = 0,1,2,....$, falka Haara generuje falkę wzorcową: $\Psi_{m,n}(t) = 2^{-m/2}\Psi\left(2^{-m}t - n\right)$.



Rys. 1. Przebieg falki Haara

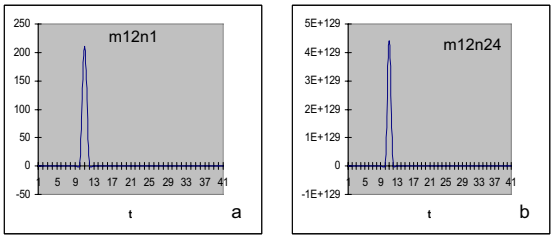
2. Falka „mexican hat", pokazana na rysunku 2, ma postać zależności:

$$\Psi(t) = (1-t^2)e^{\frac{t^2}{2}}.$$

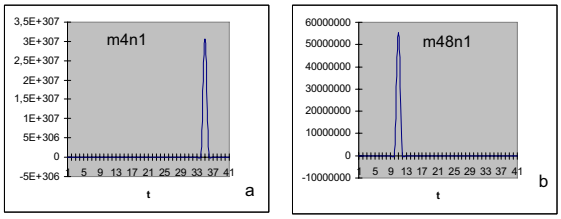


Rys. 2. Wykres falki „mexican hat"

Na rysunkach 3a i 3b oraz 4a i 4b, pokazano w sposób uproszczony jak zmiany wartości *m* i *n* wpływają na skalowanie i przesunięcie czasowe falki wzorcowej, w stosunku do falki macierzystej z rysunku 2

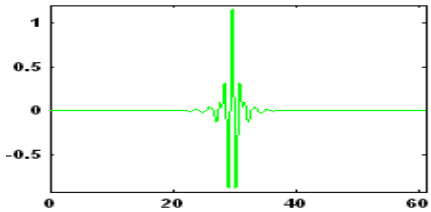


Rys. 3. Zależność falki wzorcowej „mexican hat" od wartości n



Rys. 4. Zależność falki wzorcowej „mexican hat" od wartości m

3. Dla obróbki sygnałów diagnostycznych często stosuje się dyskretną falkę Meyera (tzw. dmey), która została przedstawiona na rysunku 5.



Rys. 5. Falka Meyera, dmey

Zbiór falek podstawowych wykorzystywanych obecnie do analizy sygnałów jest dość liczny, i ciągle otwarty. Przekształcenie falkowe daje możliwość wykorzystania dowolnej, dobrze opisanej i matematycznie określonej falki, która

lepiej niż już znane, pozwoli dokonać separacji składowych sygnału diagnostycznego.

2. PRZEKSZTAŁCENIE FALKOWE

Wg Morleta-Grossmanna, ciągłe przekształcenie falkowe dla sygnałów jednej zmiennej, zapisanych w postaci funkcji: $f(t) \in L^2(R)$, ma postać [1, 2, 3, 4, 7]:

$$\Psi_f(s,\tau) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\Psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right)dt \qquad (4)$$

gdzie: $\Psi^*(t)$ - falka sprzężona z falką macierzystą $\Psi(t)$.

Podobnie jak korelacja oraz transformacja Fouriera, przekształcenie falkowe jest operacją mnożenia i całkowania. Iloczyn pod całką „szuka" uśrednionego po czasie, podobieństwa między funkcją sygnału $f(t)$ i falką wzorcową $\Psi_{s,\tau}(t)$, która jest skalowana dla różnych wartości *s*, przesuwana na osi czasu zgodnie z wartością τ, tak jak to pokazano na rysunkach 3a i b oraz 4a i b, dla falki „mexican hat".

Obrazem sygnału $f(t)$ jest funkcja dwóch zmiennych, czasu i skali. W rezultacie przekształcenia falkowego uzyskuje się bowiem macierz o wymiarach $m \times n$. Elementami macierzy są współczynniki, mające postać iloczynów skalarnych sygnału $f(t)$ i ciągu funkcji $\Psi_{m,n}$, które charakteryzują ich podobieństwo:

$$a_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\Psi_{m,n}(t)dt \qquad (5)$$

W praktyce, współczynniki $a_{m,n}$ oblicza się przy wykorzystaniu procedury Dyskretnej Transformacji Falkowej, stosując metody wielorozdzielczej analizy sygnałów. Korzysta się przy tym z dyskretnej postaci sygnału $f(t)$ oraz falki $\Psi_{m,n}(t)$, określonej dla dyskretnej skali s, która zmienia się z krotnością dwa, oraz dyskretnego przesunięcia τ. Jeżeli przesunięcie elementarne, od pewnej chwili do następnej jest τ_0, to zmiana skali pociąga za sobą skokową zmianę przesunięcia: $\tau_n = 2^{-m} n \tau_0$. Kolejne chwile czasu wyznaczają krok kwantowania 2^{-m}, który zmienia się wraz z wartością *m*. Falkową transformatą sygnału $f(t)$ są dwie funkcje ortogonalne - aproksymacja i detal. Poziom dekompozycji sygnału określa indeks m. Wartości: $m+1$, $m+2$, …, $m+\kappa$, określają – dwukrotnie, trzykrotnie, aż do κ-krotnie, większą rozdzielczość, w stosunku do m.

3. INFORMACJE DIAGNOSTYCZNE W PRZEKSZTAŁCENIU FALKOWYM

3.1. Obróbka sygnałów diagnostycznych

Informacja zakodowana w sygnale diagnostycznym ma przeważnie charakter widmowy i dotyczy energii generowanej przez źródła zaburzeń, które są rezultatem zużycia powierzchniowego i objętościowego oraz niedokładności wykonania i montażu, badanego urządzenia.

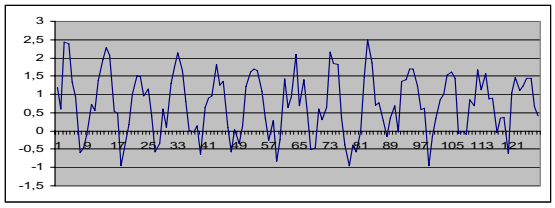
Obróbka sygnału mająca na celu zdekodowanie tych informacji bywa wykonywana w dwóch etapach. Pierwszy, to obróbka wstępna (*preprocessing*) – za pomocą przekształcenia falkowego, mająca na celu uwolnienie bogatej w informacje zdeterminowanej składowej sygnału, od składowej losowej. Następnym etapem jest zazwyczaj „przeniesienie" transformaty falkowej, a ściślej biorąc jej aproksymacji, do dziedziny częstotliwości. W przypadku sygnałów stacjonarnych wykorzystuje się w tym celu transformację Fouriera, a dla obróbki sygnałów niestacjonarnych – transformację czasowo-częstotliwościową Wigner-Ville'a.

Zgromadzona dotychczas wiedza wskazuje, że każda procedura przekształcania sygnału diagnostycznego, niezależnie od woli badacza, wprowadza pewne - z góry nieznane, zakłócenia, zniekształcające zawarte w nim informacje, lub wytwarza nowe, których w sygnale nie ma. Dlatego rozpoznanie sposobu wytwarzania, zakłócania i prezentacji informacji uzyskanych w rezultacie wykonywanej obróbki, ma fundamentalne znaczenie dla oceny ich wiarygodności [5, 6, 7].

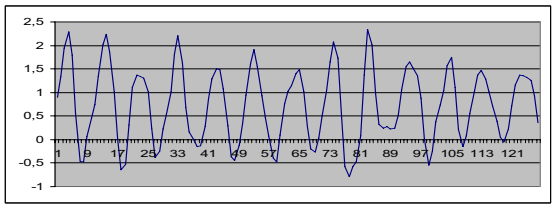
Aby ocenić wiarygodność informacji pozyskiwanych w rezultacie obróbki sygnału diagnostycznego, przy wykorzystaniu przekształcenia falkowego, zbadano charakterystyki widmowe dwóch sygnałów diagnostycznych. Badania przeprowadzono na zasymulowanych na komputerze modelach sygnałów – stacjonarnego i niestacjonarnego; w każdym z nich zakodowano z góry znane informacje widmowe. Dokonano również analizy przebiegów charakterystyk falkowych, wyznaczonych dla sygnału diagnostycznego pobranego z funkcjonującego urządzenia mechanicznego.

3.2. Sygnał stacjonarny

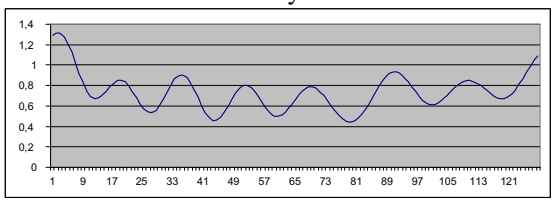
Model sygnału stacjonarnego składa się ze zdeterminowanej składowej harmonicznej o stałej częstotliwości i szumu losowego. Obie składowe zostały wygenerowane na komputerze, i poddane superpozycji. Przebieg sygnału pokazano na rysunku 6. Wykorzystując, najczęściej stosowaną w diagnostyce urządzeń mechanicznych, dyskretną falkę Meyera (dmey), wykonano falkowe przekształcenie tego sygnału. Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono przebiegi aproksymacji, na pierwszym i trzecim poziomie dekompozycji.



Rys. 6. Badany sygnał stacjonarny

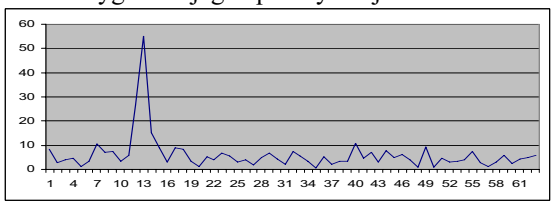


Rys. 7. Aproksymacja sygnału stacjonarnego, dmey1

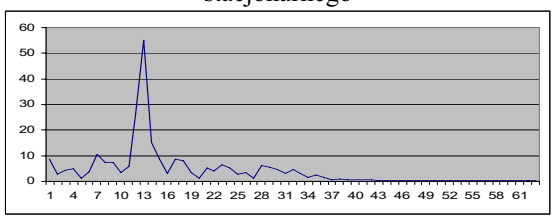


Rys. 8. Aproksymacja sygnału stacjonarnego, dmey3

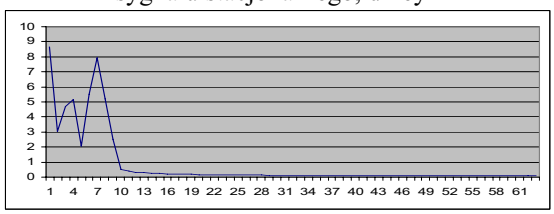
Założono, że przeprowadzona dekompozycja jest obróbką wstępną, mającą na celu oczyszczenie sygnału z szumu losowego. Dalszą obróbkę wykonano za pomocą dyskretnej transformacji Fouriera. Na rys. 9, 10 i 11, przedstawiono uzyskane w ten sposób widma częstotliwościowe modułu sygnału i jego aproksymacji.



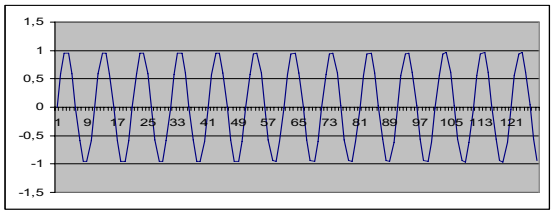
Rys. 9. Widmo częstotliwościowe sygnału stacjonarnego



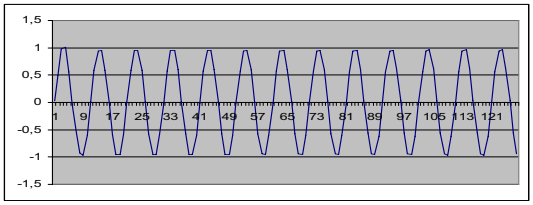
Rys. 10. Widmo częstotliwościowe aproksymacji sygnału stacjonarnego, dmey1



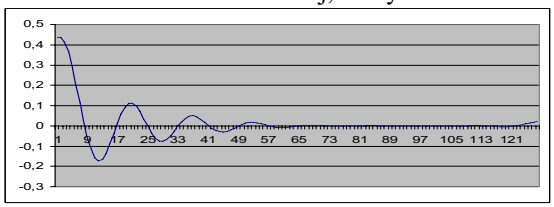
Rys. 11. Widmo częstotliwościowe aproksymacji sygnału stacjonarnego, dmey3



Rys.12. Składowa zdeterminowana sygnału stacjonarnego



Rys. 13. Aproksymacja składowej zdeterminowanej, dmey1



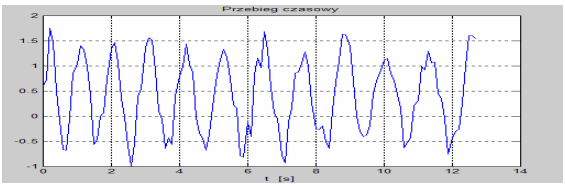
Rys. 14. Aproksymacja składowej zdeterminowanej, dmey 3

Zgodnie z przyjętym założeniem, składowa zdeterminowana sygnału, której przebieg został przedstawiony na rys. 12, niesie oczekiwaną informację diagnostyczną, i powinna być przedmiotem szczególnego zainteresowania badacza. Dlatego tę składową poddano takim samym przekształceniom jak badany sygnał.

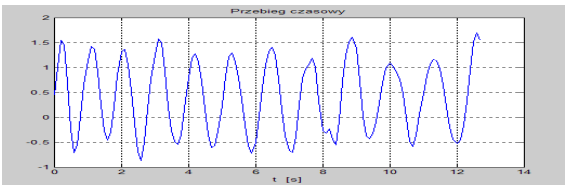
Obserwacja jej aproksymacji pozwoli w przybliżeniu, ustalić jak przekształcenia zastosowane do obróbki sygnału zakłócają zawartą w niej informację. Aproksymacje, uzyskane z przekształcenia dyskretną falką Meyera, na pierwszym i trzecim poziomie dekompozycji, przedstawiono na rysunkach 13 i 14.

3.3. Sygnał niestacjonarny

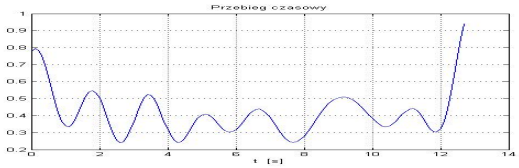
Model sygnału niestacjonarnego został utworzony w ten sam sposób, co model sygnału stacjonarnego. Sygnał utworzony z superpozycji składowej zbliżonej do harmonicznej, ale o malejącej częstotliwości, i składowej losowej, jest niestacjonarny, ponieważ przesunięcie punktu zerowego na osi czasu zmienia jego charakterystykę częstotliwościową. Na rys. 15, 16 i 17 pokazano przebiegi sygnału i jego aproksymacji, uzyskane po jego przekształceniu falkę Meyera (dmey), na pierwszym i trzecim poziomie dekompozycji..



Rys. 15. Badany sygnał niestacjonarny

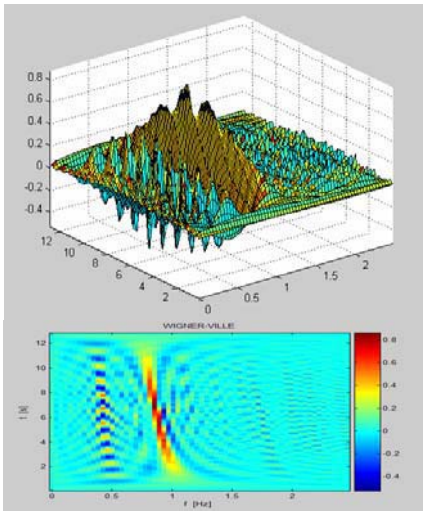


Rys. 16. Aproksymacja sygnału niestacjonarnego, dmey1

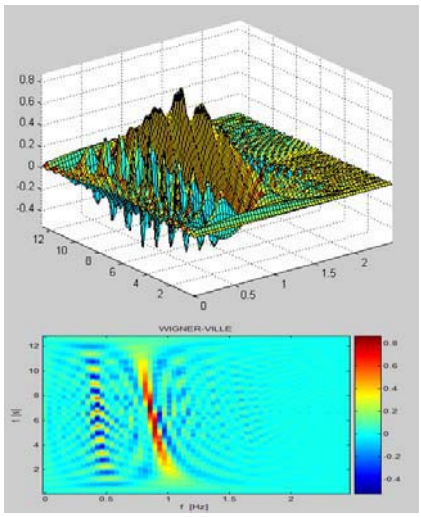


Rys. 17. Aproksymacja sygnału niestacjonarnego, dmey3

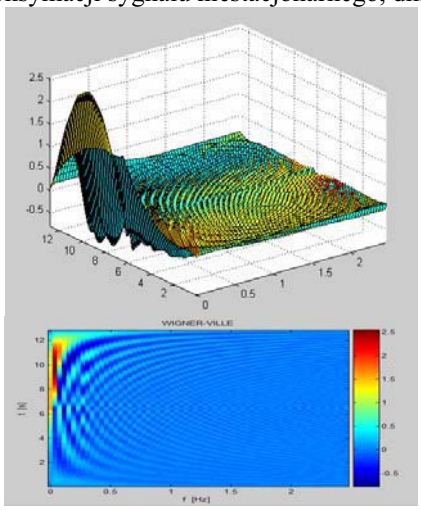
Dalszą obróbkę wykonano za pomocą dyskretnej transformacji Wigner-Ville'a. Na rysunkach 18, 19 i 20, przedstawiono uzyskane w ten sposób widma czasowo-częstotliwościowe sygnału i jego aproksymacji.



Rys. 18. Widmo czasowo-częstotliwościowe sygnału niestacjonarnego

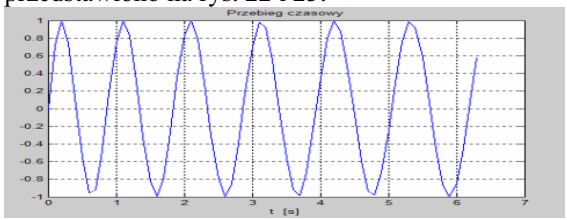


Rys. 19. Widmo czasowo-częstotliwościowe aproksymacji sygnału niestacjonarnego, dmey1

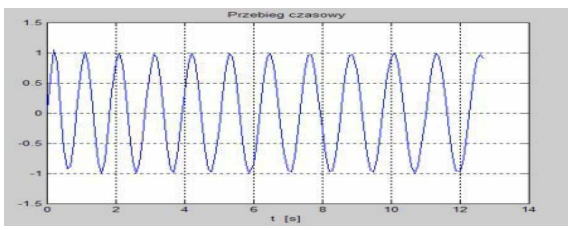


Rys. 20. Widmo czasowo-częstotliwościowe aproksymacji sygnału niestacjonarnego, dmey3

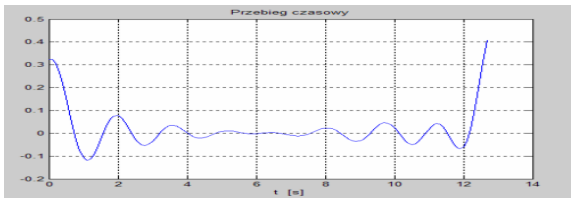
Przebieg składowej zdeterminowanej został przedstawiony na rys. 21. Aproksymacje, uzyskane z przekształcenia dyskretną falką Meyera, przedstawiono na rys. 22 i 23.



Rys. 21. Składowa zdeterminowana sygnału

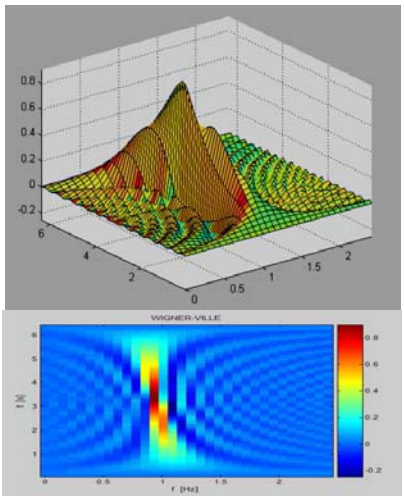


Rys. 22. Aproksymacja składowej zdeterminowanej, dmey1

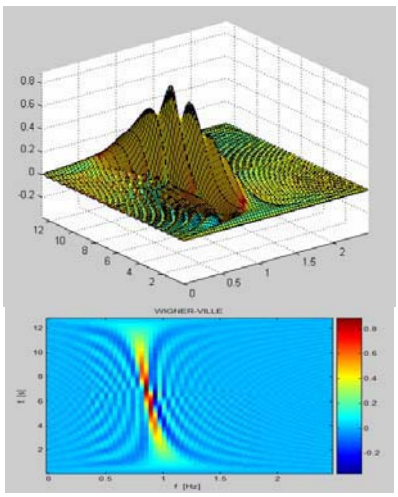


Rys. 23. Aproksymacja składowej zdeterminowanej, dmey3

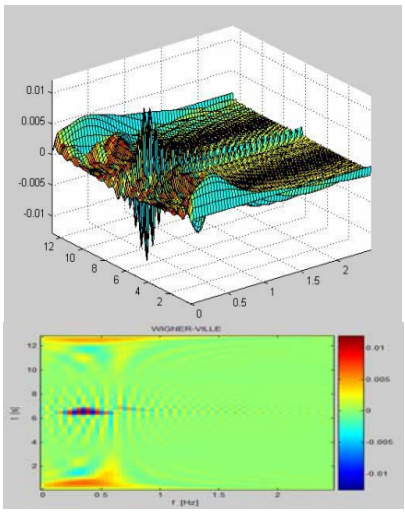
Na rys. 24, 25 i 26, przedstawiono odpowiednio, dyskretne widma czasowo-częstotliwościowe składowej zdeterminowanej i jej aproksymacji.



Rys. 24. Widmo czasowo-częstotliwościowe, składowej zdeterminowanej



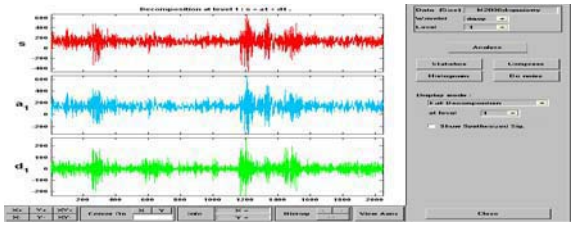
Rys. 25. Widmo czasowo-częstotliwościowe aproksymacji składowej zdeterminowanej, dmey1



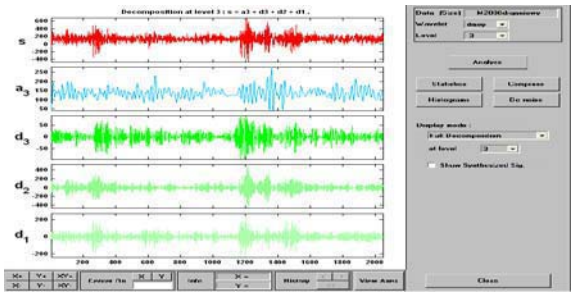
Rys. 26. Widmo czasowo-częstotliwościowe aproksymacji składowej zdeterminowanej, dmey3

3.3. Sygnał wibroakustyczny

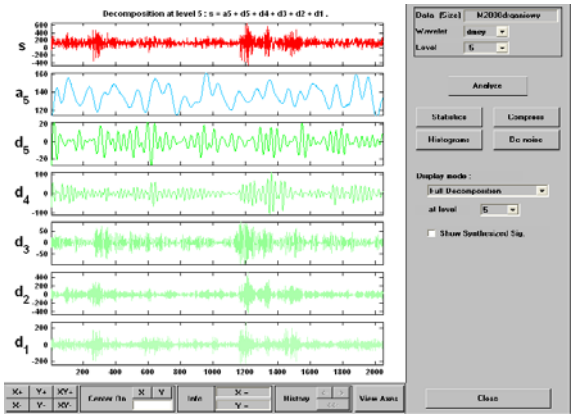
Na rys. 27, 28 i 29, przedstawiono przebiegi aproksymacji i detali uzyskanych w rezultacie przekształcenia falkowego, sygnału diagnostycznego, emitowanego przez silnik motocykla turystycznego. Jako sygnał wybrano realizację czasową przyspieszenia drgań, korpusu silnika, pobraną przez akcelerometr piezoelektryczny. Przebieg sygnału napięciowego, odzwierciedlający tą realizację, został przetworzony do postaci numerycznej i stanowił bazę danych dla procedury DWT. Rysunki przedstawiają dekompozycję sygnału na pierwszym, trzecim i piątym poziomie, przy wykorzystaniu dyskretnej falki Meyera. Na każdym poziomie dekompozycji badany sygnał jest sumą aproksymacji i detalu z tego poziomu oraz detali ze wszystkich poprzednich poziomów.



Rys. 27. Transformacja sygnału diagnostycznego falką dmey 1



Rys. 28. Transformacja sygnału diagnostycznego falką dmey 3



Rys. 29. Transformacja sygnału diagnostycznego falką dmey 5

4. PODSUMOWANIE

Aby aproksymacje i detale, uzyskane w rezultacie przekształcenia falkowego na kolejnych poziomach dekompozycji, można było wykorzystać dla celów diagnostyki urządzeń mechanicznych, muszą one dobrze odzwierciedlać składową zdeterminowaną i losową pobranego sygnału. Ten warunek dotyczy to zarówno sygnału stacjonarnego jak i niestacjonarnego.

Rezultaty uzyskane z badań modeli sygnałów diagnostycznych, niosących znane, zaprogramowane podczas symulacji informacje widmowe, a także przebiegi charakterystyk falkowych, wibroakustycznego sygnału diagnostycznego, pobranego z funkcjonującego urządzenia mechanicznego wykazują, że:

1) procedura DWT, dzieli zarówno sygnał stacjonarny, jak i niestacjonarny, na dwie składowe, według kryterium podobieństwa do wybranej falki, z uwzględnieniem skalowania i przesunięcia w czasie,
2) wraz ze wzrostem poziomu dekompozycji, przebieg aproksymacji staje się coraz bardziej podobny do przebiegu wybranej falki, niezależnie od tego czy odzwierciedla on poszukiwaną składową zdeterminowaną, czy nie; reszta sygnału jest przenoszona do detali.

Konsekwencją tak rozumianego filtrowania falkowego jest niekontrolowana modyfikacja badanego sygnału. Postępujące wraz ze wzrostem poziomu dekompozycji upodobnienie przebiegu aproksymacji do przebiegu falki wzorcowej, powoduje zakłócenie i utratę informacji widmowych, które mogą być w niej zakodowane i wytworzenie informacji, wynikających z przebiegu falki, których nie ma w sygnale.

Na pierwszym, i niekiedy na drugim poziomie, kształt, skalowanie i przesuwanie w czasie, dobrze dobranej falki, sprzyja odfiltrowaniu do detali, składowych harmonicznych sygnału o wysokich częstotliwościach. Ponieważ informacje widmowe są zazwyczaj „ulokowane" w pasmach o niskiej częstotliwości, zniekształcenia aproksymacji, w stosunku do oczekiwanej składowej zdeterminowanej są niewielkie. Aproksymacja może być uznana za dobre odzwierciedlenie tej składowej, a część sygnału przeniesiona do detali może być traktowana jak szum. Przekształcenie falkowe stosowane jako obróbka wstępna, działa wtedy jak dolnoprzepustowe filtrowanie szumów, i może ułatwić zdekodowanie informacji diagnostycznych.

Badania przytoczone w tej pracy, a także w pracach wymienionych w bibliografii wykazują, że granica filtrowania przesuwa się w kierunku niskich częstotliwości, wraz ze wzrostem poziomu dekompozycji. W konsekwencji coraz więcej wartościowych informacji jest przenoszonych do kolejnych detali. Równocześnie, w pasmach niskich częstotliwości ujawniają się niekiedy maksima lokalne, wytworzone przez procedurę DWT, niosące informacje, których nie ma w sygnale. To oznacza, że poziom dekompozycji sygnału, określony przez kryterium stopu przekształcenia falkowego, decyduje o jakości i ilości wartościowych informacji widmowych zachowanych w aproksymacjach, i ma istotne znaczenie dla wykorzystania charakterystyk falkowych dla celów diagnostyki urządzeń mechanicznych.

Ważną rolę odgrywa dobór kształtu falki, który powinien być podobny do przebiegu zdeterminowanej składowej, badanego sygnału; spełnienie tego warunku wymaga posiadania informacji a priori o tym przebiegu. Ponieważ pozyskanie tych informacji jest na ogół celem badań, to dobór falki zasadza się na doświadczeniu i intuicji badacza oraz jego wiedzy o sposobie funkcjonowania badanego urządzenia. Dotychczasowe badania wykazują, że spośród znanych, zdefiniowanych i dobrze opisanych, do dekompozycji wibroakustycznych sygnałów diagnostycznych, najlepsze są falki pozbawione nieciągłości i ostrych maksimów.

LITERATURA

[1] Batko W., Ziółko M.: *Zastosowanie teorii falek w diagnostyce technicznej.* WIMiR, Kraków 2002.
[2] Batko W., Dąbrowski Z., Engel Z., Kiciński J., Weyna S.: *Nowoczesne metody badania*

procesów wibroakustycznych, cz. I. Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2005.
[3] Białasiewicz J. T.: *Falki i aproksymacje.* WNT, Warszawa 2000.
[4] Józefczyk I.: Transformacja falkowa w wibroakustycznej diagnostyce technicznej. Problemy eksploatacji 1/2006(60), s.7-13.
[5] Kurowski W., Józefczyk I., Pankowski A.: *Zastosowanie transformacji falkowej w diagnostyce urządzenia mechanicznego.* Materiały: XXXIV Ogólnopolskie Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka 2007.
[6] Kurowski W., Józefczyk I., Walczak R.: *Zastosowanie transformacji falkowej do obróbki niestacjonarnych sygnałów diagnostycznych.* Materiały: XXXV Ogólnopolskie Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka 2008.
[7] Kurowski W.: *Podstawy diagnostyki systemów technicznych. Metodologia i metodyka.* Wyd. ITE-PIB w Radomiu, Warszawa-Płock 2008.

Waldemar KUROWSKI, ukończył Wydział MEiL na Politechnice Warszawskiej 1961 roku, uzyskując stopień magistra inżyniera lotnictwa, dr hab. nauk technicznych w dyscyplinie: mechanika, specjalność: wibroakustyka, profesor nadzwyczajny Politechniki Warszawskiej na Wydziale Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii w Płocku. Zajmuje się metodologią i metodyką badań, problemami diagnostyki maszyn i urządzeń technicznych, wibroakustyką oraz numeryczną obróbką sygnałów. Jest autorem lub współautorem ponad 100 publikacji, referatów i opracowań zastosowanych w praktyce oraz 5 publikacji zwartych. Jest członkiem Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej. Hobby: muzyka operowa, narciarstwo alpejskie, jazda konna.

Izabela JÓZEFCZYK ukończyła Wydział Matematyki na Uniwersytecie Łódzkim, doktor nauk technicznych w dziedzinie budowa i eksploatacja maszyn, obecnie adiunkt Politechniki Warszawskiej w Płocku. Zajmuje się zastosowaniem transformacji falkowej do diagnostyki urządzeń technicznych.

IDENTYFIKACJA DIAGNOSTYCZNYCH MODELI LOKALNYCH W UKŁADACH ROZPROSZONYCH*

Sebastian RZYDZIK
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Śląska
ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice, fax (32) 237 13 60, sebastian.rzydzik@polsl.pl

Streszczenie

W celu przeprowadzenia zadania diagnostycznego buduje się modele diagnostyczne badanych obiektów technicznych. Modele diagnostyczne dzieli się na dwie klasy: modele globalne i modele lokalne. Model globalny opisuje dane uczące pochodzące z obiektu w pełnej przestrzeni ich wartości.

W artykule pokazano, że można zrezygnować z poszukiwania modelu globalnego i zastąpić go zbiorem modeli lokalnych. Modele lokalne związane są z wybranymi fragmentami obiektu i reprezentują dane uczące tylko w wybranym obszarze przestrzeni wartości. Fragmenty obiektu, dzięki wzajemnym oddziaływaniom, tworzą układ rozproszony. Zaproponowana struktura modelu lokalnego zawiera cztery współdziałające ze sobą moduły.

Słowa kluczowe: układy rozproszone, diagnostyka maszyn, modele diagnostyczne.

IDENTYFICATION OF THE DIAGNOSTIC LOCAL MODEL IN DISTRIBUTED SYSTEMS

Summary

The need for execution of diagnostic tasks causes that diagnostic models of investigated objects are necessary to be built. Among these models two classes can be distinguished. They include global and local models. A global model describes learning data that are acquired on the basis of an object.

In the article an idea of identification of a diagnostic model was presented. It was suggested that a global model can be replaced with a set of local models. These models are related to selected fragments of an object and represent learning data in a limited area of the parameter values. Due to interactions between the fragments, they are considered to be a distributed set. A suggested structure of the local model contains three interacting types of modules.

Keywords: distributed systems, diagnostics of machinery, diagnostic models.

1. WSTĘP

Zakłada się, że obiekt jest obserwowany za pośrednictwem sygnałów, których cechy określają oddziaływania pomiędzy obiektem i otoczeniem oraz oddziaływania pomiędzy elementami obiektu. Stan techniczny jest opisywany zbiorem cech stanu [1]. Każda cecha stanu przyjmuje wartości ilościowe lub jakościowe. Dla potrzeb wnioskowania diagnostycznego niezbędne są sygnały diagnostyczne, tzn. cechy sygnałów obserwowanych, cechy związane ze zmianami obserwowanych sygnałów oraz residua wyznaczane przez porównanie cech obserwowanych sygnałów z wartościami cech uzyskanych z eksperymentów numerycznych przeprowadzonych na odpowiednich modelach [5, 6].

Zazwyczaj buduje się globalne modele diagnostyczne, w których identyfikuje się relacje diagnostyczne zachodzące pomiędzy cechami sygnałów diagnostycznych oraz cechami stanów [5]. Następnie, uzyskane relacje diagnostyczne poddaje się optymalizacji, których wynikiem jest optymalny zbiór cech sygnałów diagnostycznych oraz optymalna struktura modelu. Identyfikacja modelu globalnego może być zadaniem złożonym. W wyniku poszukiwań optymalnej struktury modelu można uzyskać zbiór modeli prostych. Każdy model prosty obejmuje wyłącznie wybrane relacje diagnostyczne, czyli wybrane cechy sygnałów diagnostycznych i wybrane cechy stanu.

Alternatywnym sposobem jest rezygnacja z poszukiwania globalnego modelu diagnostycznego i zastąpienie go zbiorem modeli lokalnych, z których każdy pozwala na wyznaczenie (uwzględnienie) cech diagnostycznych dotyczących wyłącznie wybranego funkcjonalnego lub strukturalnego fragmentu obiektu [4]. Identyfikacja modeli

* Fragmenty zamieszczonych opisów zostały opracowane na podstawie [10]

lokalnych może odbywać się za pomocą metod stosowanych w identyfikacji modeli globalnych, przy założeniu, że na wejściu modelu będą dostępne wszystkie cechy sygnałów diagnostycznych całego obiektu.

Model lokalny może być modelem lokalnym strukturalnie (przestrzennie, terytorialnie), jak np. model łożyska tocznego, lub modelem lokalnym funkcjonalnie (lecz o możliwym znacznym rozproszeniu terytorialnym), jak np. model układu chłodzenia. Zaproponowano, że każdy model lokalny jest zbudowany z trzech współdziałających ze sobą modułów (rys. 1):

- Modułu A, który wyznacza wartości cech sygnałów pozyskiwanych z fragmentu obiektu związanego z modelem lokalnym,
- Modułu B, który rozpoznaje (klasyfikuje) warunki działania fragmentu obiektu związanego z modelem lokalnym,
- Modułu C, który identyfikuje (klasyfikuje) stan (techniczny) fragmentu obiektu związanego z modelem lokalnym.

2. BUDOWA MODELI LOKALNYCH

Zadaniem Modułu A jest wyznaczanie wartości cech sygnałów diagnostycznych *sg* pozyskanych z fragmentu obiektu o_i związanego z modelem lokalnym m_i^L. W związku z tym Moduł A zawiera zbiór funkcji i procedur wyznaczających wartości cech sygnałów diagnostycznych [7, 5]. Moduł A ma dostęp wyłącznie do cech sygnałów pozyskanych z fragmentu obiektu związanego z tym modelem. Nie są dla niego dostępne (bezpośrednio) cechy sygnałów pochodzących z innych fragmentów obiektu.

Zadaniem Modułu B jest rozpoznawanie warunków działania W fragmentu obiektu o_i związanego z modelem lokalnym m_i^L oraz uzgadnianie z innymi Modułami B warunków działania całego obiektu. Zakłada się, że Moduł B ma dostęp do wyników działania Modułu A. Każdy Moduł B ma przypisany pewien zbiór warunków działania fragmentu obiektu związanego z modelem lokalnym oraz zbiór warunków działania całego obiektu. Działanie Modułu B polega na wykonaniu trzech kroków:

Krok 1. Rozpoznawanie warunków działania fragmentu obiektu W.

Krok 2. Rozpoznawanie warunków działania całego obiektu W^O.

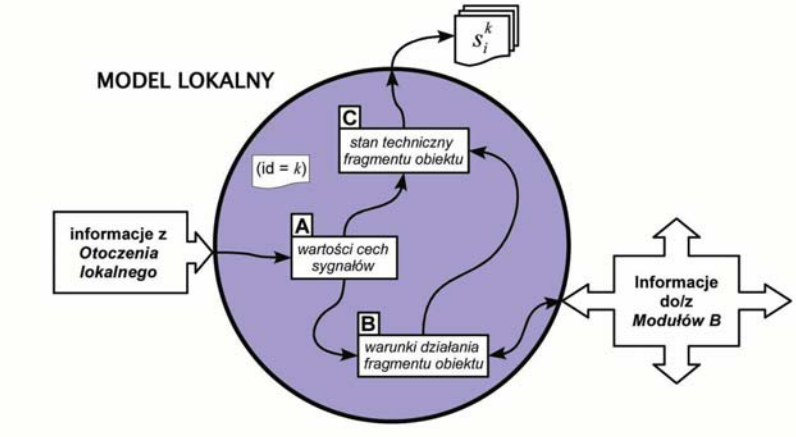
Krok 3. Uzgadnianie z innymi Modułami B warunków działania całego obiektu W^O

W pierwszym kroku są rozpoznawane warunki działania dla fragmentu obiektu. Następnie stanowią one dane wejściowe do drugiego etapu – wyznaczania propozycji warunków działania całego obiektu. Ostatecznie, w procesie agregacji lub uzgadniania opinii, Moduły B wypracowują wspólną opinię wskazując ostatecznie warunki działania fragmentów obiektu i całego obiektu.

Moduł C jest klasyfikatorem stanu. Jego zadaniem jest klasyfikacja (identyfikacja) stanu fragmentu obiektu o_i związanego z modelem lokalnym m_i^L. W celu przeprowadzenia procesu klasyfikacji stanu niezbędna jest znajomość wartości cech relewantnych oraz warunków działania w jakich znajduje się obiekt.

Zatem, działanie modułów skupia się na realizacji następujących zadań:

- obserwacji lokalnego nośnika informacji o stanie fragmentu obiektu (sygnału diagnostycznego); w proponowanej metodzie jest to realizowane przez Moduł A,
- wnioskowania o warunkach działania fragmentu obiektu i całego obiektu; w proponowanej metodzie jest to realizowane przez Moduł B,
- wnioskowania o stanie technicznym obiektu na podstawie wyników obserwacji lokalnych nośników informacji oraz wyników identyfikacji i uzgadniania warunków działania całego obiektu; w proponowanej metodzie jest to realizowane przez Moduł C.



Rys. 1. Postać diagnostycznego modelu lokalnego [10]. A, B, C - moduły *k*-tego modelu lokalnego; s_i^k - *i*-ty stan *k*-tego fragmentu obiektu

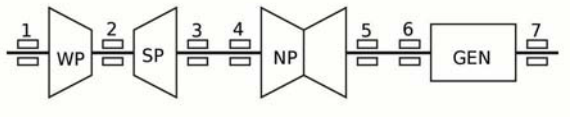
3. BADANIA WERYFIKACYJNE

Badania przeprowadzono na udostępnionych danych pochodzących z numerycznego symulatora turbogeneratora. Symulator został opracowany w Instytucie Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk (IMP PAN) w Gdańsku. Otrzymane dane zawierają m. in. wyniki eksperymentów, w których turbogenerator działał w następujących stanach technicznych [4]:

- przemieszczenia pojedynczych podpór łożyskowych,
- przemieszczenia równoczesne dwóch podpór (różne kombinacje przemieszczeń podpór łożysk 5 i 6).

Wszystkie stany techniczne były symulowane dla stałej prędkości wirowania wału.

3.1. Charakterystyka obiektu



Rys. 2. Szkic poglądowy turbogeneratora z turbiną *13K215* [4]. Oznaczenia: WP - część wysokoprężna, SP - część średnioprężna, NP - część niskoprężna, GEN - generator, 1÷7 - nr podpory łożyskowej

Obiektem badań był turbogenerator o mocy *215[MW]* zbudowany z turbiny *13K215* i generatora (rys. 2). Badanymi niezdatnościami były przemieszczenia podpór łożyskowych względem kinetostatycznej linii wału.

W maszynach wirnikowych istotnym problemem jest wyosiowanie wirnika. Nieprawidłowe wykonanie tej operacji powoduje, że pojawiają się niesprawności, takie jak: przycieranie wirnika o korpus lub nieprawidłowe działanie łożysk hydrodynamicznych. Skutkiem tego jest nadmierny wzrost drgań obiektu i w jego następstwie przejście obiektu w stan niezdatności. Prawidłowe ustalenie łożysk, a tym samym kinetostatycznej linii wału pozwala na wyeliminowanie niektórych niesprawności i poprawia stabilność działania turbogeneratora. W pokazanym układzie turbogeneratora najwięcej kłopotów sprawiają węzły łożyskowe nr 5 i 6. Jest to związane z tym, że są one położone blisko siebie i jednocześnie są to najbardziej obciążone łożyska [9]. Postanowiono, że do identyfikacji modeli lokalnych będą użyte przede wszystkim dane symulacyjne związane z tymi węzłami łożyskowymi.

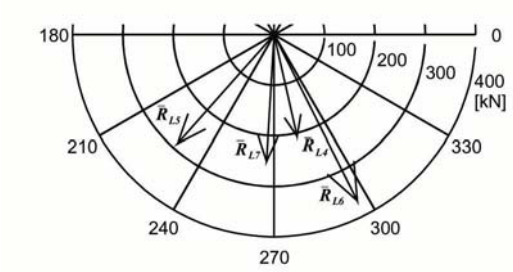
3.2. Dane symulacyjne

Dane symulacyjne zawierały m. in. sygnały składowych *x* i *y* przemieszczeń promieniowych w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach każdej podpory łożyskowej. Łącznie wybrano *117* przykładów.

Wszystkie opracowywane klasyfikatory były testowane metodą *leave-one-out*. W każdym przykładzie uwzględniano *316* punktowych cech sygnałów *x* i *y* oraz trajektorii *r* mierzonych dla trzech przypadków przemieszczeń względnych i bezwzględnych podpór łożyskowych.

3.3. Warunki działania i stany obiektu

Zbiór danych uczących był wyznaczany dla stałej prędkości wirowania wału. W związku z tym cały obiekt posiadał tylko jeden warunek działania w_1^O : praca ustalona (n_{obr}=3000[*obr /min*]).



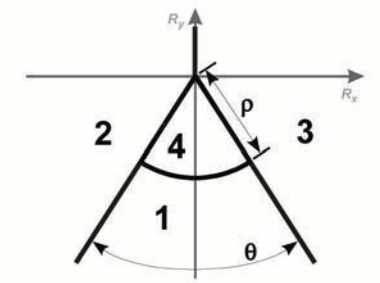
Rys. 3. Reakcje wału w węzłach łożyskowych nr 4, 5, 6 i 7 w przypadku przemieszczenia podpory łożyska nr 5 w prawo [10]

W [11] przyjęto, że lokalne warunki działania są opisywane przez wartości reakcji podporowych. W ten sposób wyróżniono pięć klas warunków działania dla każdej podpory, które odpowiadają pięciu klasom reakcji podporowych. Na potrzeby przeprowadzenia badań porównawczych wybranych diagnostycznych modeli lokalnych zrezygnowano z tego podejścia. Z *III zasady dynamiki* (*zasada akcji i reakcji*) wiadomo, że ciała oddziaływają na siebie wzajemnie z siłami równymi co do wartości i kierunku, lecz o przeciwnych zwrotach.

Przykładowe rozkłady reakcji wału w łożyskach nr 4, 5, 6 i 7 w przypadku przemieszczenia podpory łożyska nr 5 w prawo pokazano na rys.3.

Zaproponowano [10], że przestrzeń reakcji podporowych będzie dzielona według wspomnianej zasady. Przyjęto podział tej przestrzeni na *4* klasy (rys. 4). Dana klasa jest opisana w układzie biegunowym przez kąt θ oraz, dla klasy *1* i *4*, wartość graniczną reakcji ρ. Ze względu na różne wartości reakcji i ich odchylenia od pionu, dla każdej podpory przyjęto różne wartości parametrów θ i ρ.

W wyniku podziału przestrzeni reakcji podporowych otrzymano klasy, które pokazano na rys. 5. Spośród *117* analizowanych przykładów zawierających wartości klas reakcji podpór łożyskowych nr 4, 5, 6 i 7, przyjęta *zasada akcji i reakcji* nie została spełniona w *11* przykładach.



Rys. 4. Klasy w przestrzeni reakcji podporowych [10]. θ i ρ - parametry określające granice klas reakcji podporowych

Badanymi niezdatnościami (stanami technicznymi obiektu) były lokalne przemieszczenia podpór łożyskowych. W sumie określono *20* klas stanów - po 5 dla każdej z 4 podpór ($i \in [4, 5,6, 7]$):
$s_{i,1}$: podpora przesunięta w lewo względem położenia nominalnego (L),
$s_{i,2}$: podpora przesunięta w górę (G),
$s_{i,3}$: podpora przesunięta w prawo (P),
$s_{i,4}$: podpora przesunięta w dół (D),
$s_{i,5}$: nominalna wartość przemieszczenia podpory (S).

4. MODEL OBIEKTU

4.1. Dekompozycja obiektu na fragmenty

W przypadku rozpatrywanego turbogeneratora (rys. 2) zdecydowano się zastosować dekompozycję przestrzenną. W związku z tym badany obiekt podzielono na siedem fragmentów: o_1 – węzeł łożyskowy nr *1*, o_2 – węzeł łożyskowy nr *2*, o_3 – węzeł łożyskowy nr *3*, o_4 – węzeł łożyskowy nr *4*, o_5 – węzeł łożyskowy nr *5*, o_6 – węzeł łożyskowy nr *6*, o_7 – węzeł łożyskowy nr *7*.

Każdy fragment o_i ma przyporządkowane sygnały składowych $x_{(.)}$ i $y_{(.)}$ przemieszczeń promieniowych mierzonych w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach. Jak wspomniano wcześniej, w badaniach uwzględniono podpory nr 4, 5, 6 i 7 (fragmenty: o_4, o_5, o_6 i o_7).

4.2. Identyfikacja modeli lokalnych

Dla wybranych fragmentów obiektu zostały identyfikowany modele lokalne:

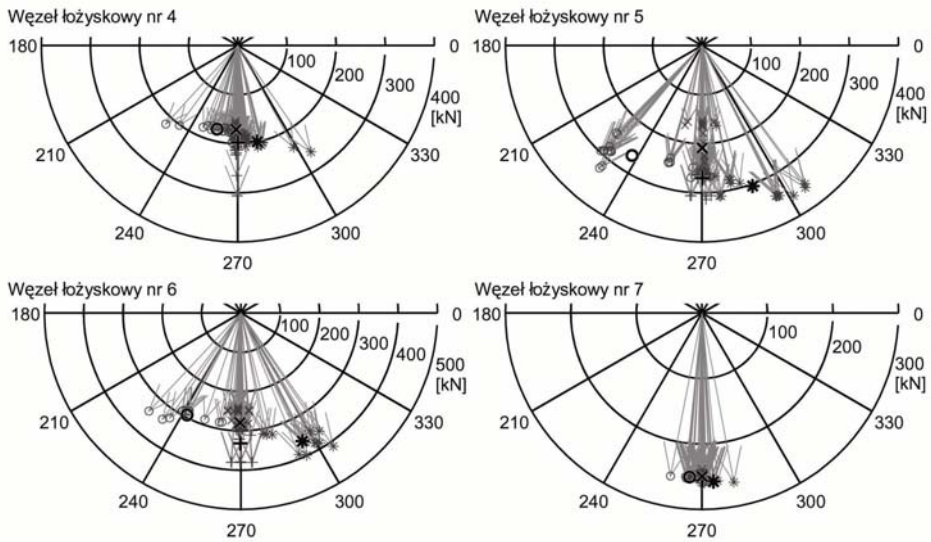
$$\left[o_4 \to m_4^L, o_5 \to m_5^L, o_6 \to m_6^L, o_7 \to m_7^L\right]$$

Modele lokalne m_5^L i m_6^L zostały w pełni zidentyfikowane, tzn. zidentyfikowano Moduł A, Moduł B i Moduł C. Ze względu na to, że na jednym z etapów identyfikacji Modułu B wybranego modelu lokalnego przeprowadzany jest proces uzgadniania opinii o warunkach działania z Modułami B sąsiednich modeli lokalnych, postanowiono, że dla modeli lokalnych m_4^L i m_7^L zostanie przeprowadzona identyfikacja częściowa, która będzie polegała na identyfikacji tylko Modułów A i B.

4.2.1. Moduł A

Identyfikowane Moduły A na wejściu posiadały trzy rodzaje sygnałów przemieszczeń promieniowych mierzonych w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach $x_{(\cdot)}$ i $y_{(\cdot)}$ i związane z rozpatrywanym fragmentem obiektu – łożyskiem. Mierzono przemieszczenia czopa względem panwi, przemieszczenia bezwzględne panwi oraz przemieszczenia bezwzględne czopa. Dla składowych przemieszczeń wyznaczane były cechy punktowe własne w dziedzinie czasu i dziedzinie częstotliwości oraz cechy punktowe wzajemne w dziedzinie czasu.

Dokładny opis wyznaczanych cech z sygnałów zawarto w [10].



Rys. 5. Wyznaczone klasy w przestrzeni reakcji podporowych dla węzłów łożyskowych nr 4, 5, 6 i 7 [10]. Strzałki oznaczają wektory reakcji wału, symbole na końcach wektorów oznaczają przynależność do danej klasy, oznaczenia klas: + - klasa *1*, ○ - klasa *2*, ∗ - klasa *3*, × - klasa *4*, ciemniejszym kolorem wyróżniono przedstawicieli klas.

4.2.2. Moduł B

Identyfikowane modele były klasyfikatorami lokalnych warunków działania. Do budowy klasyfikatorów użyto następujących metod:

- sieć neuronalną typu cascade forward,
- metodę klasyfikacji z użyciem kryterium najbliższego sąsiada (NN) z metryką euclidesową,
- metodę SVM (Support Vector Machine).

Zastosowana sieć nueronalna była siecią zbudowaną z jednej warstwy ukrytej zawierającej 3 neurony z sigmoidalną funkcją przejścia oraz jednej warstwy wyjściowej zwierającej 4 neurony z liniową funkcją przejścia. Sieć neuronalna na wejściu posiadała zbiór cech relewantnych pozyskanych na drodze optymalizacji z użyciem algorytmu ewolucyjnego.

W przypadku metody klasyfikacji z użyciem kryterium najbliższego sąsiada zastosowano miarę odległości euklidesowej. Na wejście klasyfikatora podawano pełny, niezoptymalizowany zbiór cech punktowych wyznaczanych przez dany Moduł A.

Metoda SVM polega na poszukiwaniu pewnej hiperpłaszczyzny rozdzielającej dany zbiór obiektów na 2 klasy, przy czym odległość pomiędzy tymi klasami powinna być jak największa. W badaniach przyjęto podział zbioru reakcji na 4 klasy. W związku z tym zbudowano 4 klasyfikatory. Każdy klasyfikator rozpoznawał wybraną klasę reakcji podporowej, a pozostałe klasy były traktowane jako „inne klasy". Każdy klasyfikator SVM na wejściu posiadał pełny zbiór cech wyznaczanych przez odpowiednie Moduły A.

4.2.3. Agregacja opinii

Agregację opinii o lokalnych warunkach przeprowadzano w czterech krokach:

Krok 1. Wybór sąsiadów, z którymi dany model lokalny będzie uzgadniał opinię.

Krok 2. Przyjęcie sposobu zapisywania wartości stopni przekonania o wystąpieniu danej klasy warunków działania.

Krok 3. Wybór sposobów pozyskiwania informacji o warunkach działania od sąsiadów.

Krok 4. Wybór metody agregacji.

Krok 1

Dla modeli lokalnych m_5^L i m_6^L wyznaczono zbiory sąsiadów Λ. Podstawą do orzeczenia czy dany model należy do zbioru sąsiadów było bezpośrednie sąsiedztwo fragmentów obiektu w rozpatrywanym obiekcie. Zatem dla poszczególnych modeli lokalnych wyróżniono następujące podzbiory sąsiadów: $\Lambda_5 = \{m_4^L, m_6^L\}$, $\Lambda_6 = \{m_5^L, m_7^L\}$

Krok 2

Wartości stopni przekonania o wystąpieniu danej klasy warunków działania w_i były zapisywane w postaci wektora czterech wartości:

$$\langle b(w_1), b(w_2), b(w_3), b(w_4)\rangle$$

Każda wartość $b_{(.)}$ zawierała się w przedziale [0,1]. Wartość $b_{(.)}$=1 oznacza pełne przekonanie o tym, że fragment obiektu działa w danych warunkach.

Krok 3

Informację o warunkach działania pozyskiwano od sąsiadów za pomocą metody SVM i sieci neuronalnej typu cascade forward. Na wejścia podawano wektory wartości stopni przekonania pochodzące od sąsiadów ze zbiorów Λ. Na wyjściu odczytywano wektor stopni przekonania mówiący o tym, że wybrany fragment obiektu, według opinii sąsiadów, pracuje w danych warunkach działania.

Krok 4

Agregację opinii zrealizowano za pomocą operatora średniej quasi-arytmetycznej z parametrem α=−10 :

$$x_1 \oplus x_2 \oplus \cdots \oplus x_n = \sqrt[\alpha]{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i^{\alpha}} \qquad (1)$$

gdzie: $x_{(.)}$ – agregowane opinie, n – liczba opinii, α – parametr.

Operator posiadał na wejściu dwie opinie – opinia pierwsza była własną opinią pierwotną generowaną przez Moduł B danego modelu lokalnego, natomiast opinia druga była opinią sąsiadów wyznaczoną w *kroku 3*.

Ostatecznie, na podstawie uzyskanych wartości stopni przekonania o działaniu fragmentu obiektu w danych warunkach przeprowadzano proces wyostrzenia opinii z użyciem operatora

$$\max\left(\langle b(w_1), b(w_2), b(w_3), b(w_4)\rangle\right) \qquad (2)$$

a następnie sprawdzano poprawność otrzymanych wyników porównując je z klasami reakcji podporowych.

4.2.4. Moduł C

Obiekt działał w jednej klasie warunków działania w_1^O – *praca ustalona*. Zatem należało zbudować jeden klasyfikator stanu dla każdego fragmentu obiektu. Rozpoznawanie stanów technicznych fragmentów obiektu (o_5 i o_6) przeprowadzono z użyciem dwóch metod:

- sieci neuronalnej typu cascade forward,
- metody SVM.

Zastosowana sieć neuronalna była zbudowana z jednej warstwy ukrytej zawierającej 4 neurony z sigmoidalną funkcją przejścia oraz jednej warstwy wyjściowej zwierającej 5 neuronów z liniową funkcją przejścia. Podobnie jak klasyfikator warunków działania, także tutaj zbiór wejściowy był zbiorem cech relewantnych, który otrzymano w wyniku optymalizacji ewolucyjnej przeprowadzonej na potrzeby badań opisanych w [10].

Metoda SVM została użyta w podobny sposób jak przy tworzeniu klasyfikatorów warunków

działania, przy czym w tym przypadku utworzono 5 klasyfikatorów odpowiadającym 5 klasom stanów technicznych każdego fragmentu obiektu. Każdy klasyfikator na wejściu posiadał zbiór wszystkich cech punktowych wyznaczanych przez dany

Moduł A.

Na wejścia budowanych klasyfikatorów stanów podawano dodatkowe informacje o lokalnych warunkach działania, zarówno w postaci wartości stopni przekonania o przynależności warunków działania do wybranych klas, jak i wartości przynależności ostrej. Informacja o warunkach działania była dostarczana przez Moduły B. Na potrzeby identyfikacji Modułu C zrezygnowano z danych wygenerowanych z wykorzystaniem metody klasyfikacji z kryterium najbliższego sąsiada. W związku z tym zostały uwzględnione informacje o warunkach działania fragmentu obiektu otrzymane w wyniku zastosowania metod:

- sieci neuronalnej typu cascade forward,
- metody SVM.

Powyżej wymienione metody identyfikacji warunków działania zostały użyte zarówno do generowania opinii pierwotnej przez Moduły B jak i do agregacji opinii. Razem utworzono 8 zbiorów przykładów: 2 metody rozpoznawania stanów, 2 metody rozpoznawania warunków działania, 2 metody agregacji opinii pochodzącej od sąsiadów.

5. BADANIA

5.1. Przebieg badań

Zastosowana metoda testowania klasyfikatorów *leave-one-out* automatycznie powodowała, że zbiór danych testujących zawierał zawsze jeden przykład, a pozostałe wchodziły w skład zbioru uczącego. Badania weryfikacyjne przeprowadzono w dwóch etapach:

Etap 1. Weryfikacja rozpoznawania warunków działania obiektu (Moduł B).

Etap 2. Weryfikacja rozpoznawania stanu fragmentu obiektu (Moduł C).

Etap pierwszy polegał na tym, że budowano klasyfikator na podstawie danych uczących i danych testujących. Następnie przeprowadzano proces agregacji opinii. Agregację opinii przeprowadzano na dwa sposoby opisane wcześniej. Jako wyniki, tego etapu badań weryfikacyjnych odczytywano, opinię pierwotną o klasie warunków działania fragmentu obiektu wypracowaną przez poszczególne modele lokalne m_4^L, m_5^L, m_6^L i m_7^L oraz uzgodnioną opinię o klasach warunków działania fragmentów obiektu dla modeli m_5^L i m_6^L. Sprawności klasyfikatorów wyznaczano z użyciem zależności:

$$OC = \frac{l}{l_w} \tag{3}$$

gdzie: l – liczba poprawnie rozpoznanych przykładów, l_w – liczba wszystkich przykładów.

Etap drugi polegał na zbudowaniu klasyfikatorów stanów Modułu C. Jako wyniki odczytywano klasę stanu i porównywano ją z klasami wzorcowymi. Również w tym etapie badań przyjęto ocenę zadaną wzorem (3):

m_4^L, m_5^L, m_6^L i m_7^L

5.2. Wyniki eksperymentu

5.2.1. Weryfikacja metod rozpoznawania warunków działania obiektu

W tabeli 1 zestawiono sprawności klasyfikatorów poszczególnych modeli lokalnych (kolumny: m_4^L, m_5^L, m_6^L i m_7^L) oraz wyniki skuteczności metod uzgadniania opinii modeli lokalnych o warunkach działania fragmentów obiektu.

Tab. 1. Sprawności klasyfikatorów warunków działania fragmentów obiektu [10]

	m_4^L	m_5^L	m_6^L	m_7^L
ssn_cf	0.650	0.756	0.882	0.817
klas_euc	0.573	0.607	0.709	0.684
svm	0.624	0.761	0.803	0.633
po uzgodnieniu opinii (agregacja metodą średniej quasi-arytmetycznej dla α=−10 *)*				
ssn_cf+svm	n/d	0.803	0.889	n/d
klas_euc+svm	n/d	0.607	0.709	n/d
svm+svm	n/d	0.803	0.821	n/d
ssn_cf+ssn_cf	n/d	0.921	0.938	n/d
klas_euc+ssn_cf	n/d	0.693	0.757	n/d
svm+ssn_cf	n/d	0.904	0.956	n/d

Przyjęte oznaczenia wierszy opisują zastosowaną metodę generowania opinii pierwotnej oraz metodę uzgadniania opinii:

- **ssn_cf** – generowanie opinii pierwotnej z użyciem sieci neuronalnej typu cascade forward,
- **klas_euc** – generowanie opinii pierwotnej z użyciem metody klasyfikacji wg strategii NN z metryką euclidesową,
- **svm** – generowanie opinii pierwotnej z użyciem metody SVM,
- **(.)+svm** – przekształcanie opinii sąsiadów z użyciem metody SVM,
- **(.)+ssn_cf** – przekształcanie opinii sąsiadów z użyciem sieci neuronalnej.

Dla modeli lokalnych m_4^L i m_5^L uzgadnianie opinii nie było przeprowadzane.

5.2.2. Weryfikacja metod rozpoznawania stanu obiektu

W tabeli 2 przedstawiono sprawności klasyfikatorów modeli lokalnych.

Tab. 2. Sprawności klasyfikatorów stanów [10]

	m_5^L	m_6^L
z uwzględnieniem klas warunków działania		
[ssn_cf+svm]+ssn_cf	0.644	0.698
[ssn_cf+ssn_cf]+ssn_cf	0.628	0.695
[svm+svm]+ssn_cf	0.629	0.690
[svm+ssn_cf]+ssn_cf	0.627	0.676
[ssn_cf+svm]+svm	0.667	0.615
[ssn_cf+ssn_cf]+svm	0.709	0.590
[svm+svm]+svm	0.654	0.641
[svm+ssn_cf]+svm	0.667	0.564
bez uwzględniania klas warunków działania		
ssn_cf	0.627	0.674
svm	0.641	0.539

W tabeli ujęto sprawności zarówno dla klasyfikatorów uwzględniających na wejściu informacje o warunkach działania, jak i dla klasyfikatorów które nie uwzględniały takiej informacji. Przyjęte oznaczenia wierszy opisują zastosowaną metodę generowania opinii pierwotnej i metodę uzgadniania opinii (ujęte w nawiasach kwadratowych [.]) oraz metodę klasyfikacji stanów technicznych:

- **[ssn_cf+svm]** – generowanie opinii pierwotnej z użyciem sieci neuronalnej typu cascade forward i przekształcanie opinii sąsiadów z użyciem metody SVM,
- **[ssn_cf+ssn_cf]** – generowanie opinii pierwotnej z użyciem sieci neuronalnej typu cascade forward i przekształcanie opinii sąsiadów z użyciem sieci neuronalnej cf,
- **[svm+svm]** – generowanie opinii pierwotnej z użyciem metody SVM i przekształcanie opinii sąsiadów z użyciem metody SVM,
- **[svm+ssn_cf]** – generowanie opinii pierwotnej z użyciem metody SVM i przekształcanie opinii sąsiadów z użyciem sieci neuronalnej cf,
- **[.]+ssn_cf** – klasyfikacja stanu z użyciem sieci neuronalnej cf,
- **[.]+svm** – klasyfikacja stanu z użyciem metody SVM.

6. UWAGI I WNIOSKI Z BADAŃ

Przyjęty podział przestrzeni reakcji podporowych (rys. 4) pozwolił na bardziej naturalne odwzorowanie charakteru reakcji łożysk turbogeneratora, niż przy zastosowaniu podziału wg [11].

Analiza wyników zawartych w tab. 1 i tab. 2 pozwala wyciągnąć następujące wnioski:

1. Zastosowanie metod uzgadniania opinii zwykle polepsza działanie klasyfikatorów rozpoznających lokalne warunki działania.
2. Uwzględnienie informacji o lokalnych warunkach działania obiektu zazwyczaj polepsza sprawność klasyfikatora stanu.

7. SYNTEZA MODELU GLOBALNEGO

Modele lokalne mogą tworzyć struktury sieciowe (rozproszone) z lokalnymi strukturami hierarchicznymi. W przypadku struktur hierarchicznych pojawia się problem ustalenia relacji nadrzędności i podrzędności modeli lokalnych. Związane jest to z tym, że inne relacje pojawią w przypadku dekompozycji przestrzennej obiektu, a inne w przypadku dekompozycji funkcjonalnej. Wynikiem działania każdego modelu lokalnego m_k^L jest rozpoznany stan s_i fragmentu obiektu s_i^k (rys. 1). Zakłada się, że dany stan s_i^k jest reprezentowany przez stwierdzenie $z_{k,i}$. Struktury hierarchiczne pozwalają na określanie stanu obiektu w różnych stopniach szczegółowości z zachowaniem porządku od ogółu do szczegółu. Powoduje to, że zbiory stwierdzeń tworzące strukturę hierarchiczną mogą zostać zastąpione jednym stwierdzeniem, za którym ukryty jest fragment drzewa stwierdzeń. Takie podejście nie ogranicza dokładności stawianych diagnoz [2].

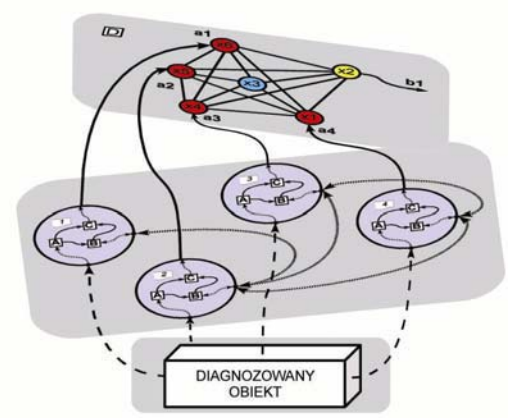
Struktury sieciowe pozwalają na równorzędną syntezę stwierdzeń $z_{k,i}$ o stanie technicznym s_i^k obiektu generowanych przez modele lokalne. Do tego celu można użyć, tzw. sieci stwierdzeń [3].

Sieć stwierdzeń (inaczej przekonań) jest to acykliczny graf skierowany, którego węzłom przypisane są zestawy stwierdzeń i wektory ich wartości, a gałęziom skierowanym przyporządkowane są tablice zawierające wartości prawdopodobieństw warunkowych dla wszystkich elementów iloczynu kartezjańskiego zestawów stwierdzeń przypisanych do węzłów.

Węzłom i gałęziom mogą być przypisane wagi określające np. stopnie przekonania o słuszności tych stwierdzeń [3]. Duże trudności w stosowaniu sieci stwierdzeń napotka się w momencie ustalania wartości prawdopodobieństw warunkowych [8]. Trudności biorą się stąd, że dla ich ustalenia potrzebne są dobrej jakości przykłady uczące lub „dobra" wiedza eksperta (dopuszcza się również taki przypadek). Szczególnie, gdy wartość węzła zależy od wartości dużej liczby innych węzłów. Działanie sieci polega na poszukiwaniu stanu jej równowagi. W efekcie ustalane są prawdopodobieństwa wszystkich węzłów w sieci. Należy zaznaczyć, że prawdopodobieństwa w sieciach stwierdzeń są interpretowane jako prawdopodobieństwa subiektywne lub miary stopni przekonania.

Syntezę całego układu wnioskującego pokazano na rys. 6. Z diagnozowanego obiektu pozyskiwane są sygnały, które trafiają na wejścia modeli lokalnych związanych z fragmentami obiektu. Mierzone sygnały są przetwarzane na sygnały diagnostyczne w Modułach A. Zbiory sygnałów diagnostycznych są udostępniane Modułom B i C. Moduły B określają klasę lokalnych warunków działania obiektu, a następnie uzgadniają między

sobą klasę warunków działania całego obiektu. Wynik agregacji opinii jest udostępniany Modułom C. Moduły C, na podstawie sygnałów diagnostycznych i wspólnej opinii o klasie warunków działania całego obiektu, określają klasę stanu technicznego fragmentów obiektu. Wyniki identyfikacji klas stanów, traktowane jak stopnie przekonania, stanowią wejście do sieci stwierdzeń (Moduł D). Na podstawie obliczeń, uwzględniających m. in. wiedzę subiektywną zawartą w tablicach prawdopodobieństw warunkowych, wyznaczana jest wartość stopnia przekonania o klasie stanu technicznego całego obiektu.



Rys. 6. Synteza układu wnioskującego [10]

8. WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań wynika, że jest możliwe zbudowanie modelu globalnego występującego w postaci sieci modeli lokalnych, gdzie każdy model lokalny ma ograniczony dostęp do danych związanych z fragmentem obiektu oraz dysponuje własnym zbiorem klas warunków działania i własnym zbiorem klas stanów. Ponadto, pokazano, że można przeprowadzić indywidualną identyfikację modeli lokalnych, bez potrzeby wyznaczania w tym celu modelu globalnego.

9. LITERATURA

[1] Cholewa W., Kaźmierczak J.: *Diagnostyka techniczna maszyn. Przetwarzanie cech sygnałów*. Skrypt uczelniany 1904. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1995.

[2] Cholewa W., Pedrycz W.: *Systemy doradcze*. Skrypt uczelniany 1447. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1987.

[3] Cholewa W.: *Systemy doradcze w diagnostyce technicznej*. W: Korbicz J., Kościelny J. M., Kowalczuk Z., Cholewa W., redaktorzy, Diagnostyka procesów. Modele, metody sztucznej inteligencji, zastosowania, strony 543–580. WNT, Warszawa 2002.

[4] Kiciński J., red.: *Modelowanie i diagnostyka oddziaływań mechanicznych, i magnetycznych w turbozespołach energetycznych*, Gdańsk, 2005. Wydawnictwo IMP PAN.

[5] Korbicz J., Kościelny J., Kowalczuk Z., Cholewa W., red.: *Diagnostyka procesów. Modele, metody sztucznej inteligencji, zastosowania*. WNT, Warszawa 2002.

[6] Kościelny J. M.: *Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.

[7] Moczulski W.: *Knowledge discovery in diagnostic databases*. Proc 2nd Symp. Methods of Artificial Intelligence in Mechanics and Mechanical Engineering, AI-Mech, Gliwice, 2:149–154, 2001.

[8] Psiuk K.: *Obiektowe modele procesu propagacji stanów w układach maszyn*. Zeszyt 119. Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.

[9] Rybczyński W.: *Rozosiowania linii wirników*. W: Kiciński J., redaktor, Modelowanie i diagnostyka oddziaływań mechanicznych, i magnetycznych w turbozespołach energetycznych, strony 1024–1080, Gdańsk, 2005. Wydawnictwo IMP PAN. r. 22.2.

[10] Rzydzik S.: *Identyfikacja stanu w układach rozproszonych*. Zeszyt 135. Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2007.

[11] Urbanek G.: *Zastosowanie algorytmów ewolucyjnych w identyfikacji odwrotnych modeli diagnostycznych*. Zeszyt 132. Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2006.

Dr inż. **Sebastian RZYDZIK** jest adiunktem Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej. W pracy naukowej zajmuje się stosowaniem technik informatycznych oraz metod sztucznej inteligencji w eksploatacji i diagnostyce urządzeń technicznych. Swoje zainteresowania skupia również na metodach komputerowego wspomagania projektowania maszyn.

DIAGNOSTYKA BEZPIECZEŃSTWA POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH ZA POMOCĄ LINII DIAGNOSTYCZNYCH

Kazimierz SITEK

Unimetal Sp. z o.o.
77 – 400 Złotów, ul. Kujańska 10, fax: (067) 263 26 37, e-mail: technologia@unimetal.pl

Streszczenie

W referacie opisano diagnostykę bezpieczeństwa pojazdów samochodowych za pomocą linii diagnostycznych. Przedstawiono rodzaje linii diagnostycznych wytwarzanych przez firmę Unimetal, ich przeznaczenie, budowę oraz możliwy do wykonania zakres badań. Podano podstawowe dane techniczne urządzeń kontrolnych wchodzących w skład tych linii. Opisano budowę i działanie centralnej jednostki sterującej oraz urządzeń tworzących tor pomiarowy układów podwozia pojazdu. Podano zasady zabudowy urządzeń składowych linii na stanowisku kontrolnym stacji diagnostycznej. Wyszczególniono elementy podstawowe i wyposażenie dodatkowe urządzeń składowych linii. Na rysunkach pokazano centralną jednostkę sterującą linii oraz przykładowe rozmieszczenie urządzeń pomiarowych linii na stanowisku kontrolnym stacji kontroli pojazdów. W części końcowej opisano tendencje rozwojowe linii diagnostycznych.

Słowa kluczowe: diagnostyka bezpieczeństwa, pojazdy, linie diagnostyczne.

THE DIAGNOSTICS OF THE SAFETY BY USE DIAGNOSTIC LINES

Summary

In the paper one described the diagnostic of the vehicles safety by use diagnostic lines. Presented kinds of diagnostic lines produced by the firm Unimetal, their destination, the build and possible range of research. In the paper gave basic characteristics of the lines equipments, described the build and the modus operandi of the master control unit and devices from measuring-line of the chassis of the vehicle. Gave rules of the building of devices of the diagnostic station. Specified basic elements and the accessories of devices of the lines. On the draws one showed the master control unit of the line and the exemplar positions of measuring equipments of the line on the vehicles control station. In the final part one described tendencies of development of diagnostic lines.

Keywords: safety diagnostic, cars, diagnostic lane.

1. WPROWADZENIE

Zakres diagnozowania podwozi pojazdów samochodowych obejmuje określenie stanu technicznego układów: napędowego, jezdnego, zawieszenia, kierowniczego i hamulcowego. Podstawowe parametry charakteryzujące stan układu napędowego (np. moc na kołach napędowych, drogę wybiegu) można badać na hamowniach podwoziowych. Ocenę stanu technicznego pozostałych układów podwozia wykonuje się obecnie najczęściej za pomocą urządzeń kontrolnych wchodzących w skład linii diagnostycznych.

Wymagania dotyczące warunków badań pojazdów samochodowych wymusiły określony zakres wyposażenia stanowisk kontrolnych. Rozwój technik pomiarowych, a zwłaszcza coraz szersze wykorzystanie elektroniki, pozwoliło na wprowadzenie nowej generacji urządzeń diagnostycznych w postaci skomputeryzowanych linii diagnostycznych, zbudowanych systemem modułowym, z automatycznym centralnie sterowanym przebiegiem kontroli. Stanowiska takie umożliwiają kompleksowe badanie układów podwozia pojazdu istotnie wpływających na bezpieczeństwo jazdy, w krótkim czasie i przy najbardziej ekonomicznym wykorzystaniu wspólnych modułów. Wyniki pomiarów i obliczeń po elektronicznym przetworzeniu są wyświetlane na ekranie monitora w postaci liczbowej i graficznej. Stan techniczny pojazdu ocenia się na podstawie obszernego zbioru wartości parametrów diagnostycznych, porównywanych z ich wartościami nominalnymi. Istnieje możliwość archiwizacji wyników badań. Drukarka umożliwia otrzymanie protokołu z każdego badania. Stosowanie tej klasy urządzeń pozwala uzyskać dużą pewność wyników badań oraz całkowitą zgodność z obowiązującymi wymaganiami prawnymi

Początkowo na rynku krajowym dostępne były wyłącznie linie diagnostyczne wytwarzane przez producentów zagranicznych. Obecnie pojawiły się również linie diagnostyczne do kontroli pojazdów samochodowych oferowane przez polskich wytwórców (Fudim-Polmo, Unimetal).

2. ZABUDOWA LINII DIAGNOSTYCZNYCH NA STANOWISKU KONTROLNYM

Najczęściej spotyka się następujące odmiany linii diagnostycznych: do badania samochodów osobowych, do badania pojazdów ciężarowych oraz uniwersalne. Wytwórcy linii diagnostycznych proponują różne możliwości ustawienia urządzeń pomiarowych na stanowisku kontrolnym stacji kontroli pojazdów.

W przypadku linii osobowych stosuje się następujące warianty zabudowy urządzeń na stanowisku kontrolnym stacji:

- na płaskiej powierzchni z wgłębieniami na urządzenia pomiarowe,
- na posadzce z zastosowaniem ramp najazdowych,
- na obrzeżach kanału przeglądowego (rys. 1).

Rys. 1. Linia osobowa z urządzeniami rozmieszczonymi na obrzeżach kanału (źródło: Unimetal)

W dwóch pierwszych przypadkach uzupełnieniem linii diagnostycznej jest podnośnik (nożycowy lub kolumnowy), który służy do przeprowadzania czynności diagnostyczno-regulacyjnych. Umożliwiają to obrotnice do sprawdzania kątów skrętu kół kierowanych oraz urządzenie do wymuszania szarpnięć kołami jezdnymi, wbudowane w płyty najazdowe podnośnika. Niektóre rodzaje podnośników są wyposażone w układ poziomowania płyt najazdowych oraz płyty przesuwne tylnej osi, co pozwala wykorzystać podnośnik do kontroli geometrii ustawienia kół jezdnych. Jeżeli linia jest zlokalizowana wzdłuż kanału przeglądowego, to podnośnik nie występuje, a obrotnice i tester do sprawdzania luzów wbudowane są w posadzkę stanowiska. W razie zastosowania ramp najazdowych linię diagnostyczną można ustawić na dowolnej utwardzonej powierzchni, gdyż poszczególne moduły rampy są najczęściej wyposażone w układy poziomujące.

Natomiast linie diagnostyczne ciężarowe oraz uniwersalne rozmieszcza się wyłącznie na obrzeżach kanału przeglądowego stacji kontroli pojazdów. Stosuje się wówczas dzielone wykonanie urządzeń pomiarowych podwozia. Urządzenia do diagnozowania układów podwozia zagłębia się w posadzce. Stanowiska kontrolne powinny być przelotowe.

3. LINIE DIAGNOSTYCZNE OFEROWANE PRZEZ FIRMĘ UNIMETAL

W dalszej części przedstawiono polskie linie diagnostyczne wytwarzane przez firmę Unimetal przeznaczone do kontroli samochodów osobowych, ciężarowych, uniwersalne i mobilne.

Zastosowana w nich centralna jednostka sterująca CJS (komputer, monitor kolorowy 17"/19", drukarka, pilot zdalnego sterowania, szafka przyłączeniowa) umożliwia połączenie w linię urządzeń diagnostycznych zarówno nowo produkowanych, jak i urządzeń wcześniej zainstalowanych na stanowiskach kontrolnych i działających dotychczas samodzielnie. Jednostka sterująca (rys. 2) zapewnia zdalne sterowanie (za pomocą fal radiowych) urządzeniami składowymi linii oraz umożliwia przechowywanie wyników badań w jednej bazie danych.

Rys. 2. Centralna jednostka sterująca osobowej linii diagnostycznej Uniline-2000 firmy Unimetal

Program komputerowy jednostki centralnej steruje pracą urządzeń wchodzących w skład linii,

przetwarza sygnały otrzymane z elektronicznych układów pomiarowych, umożliwia wizualizację prowadzonych badań i dokonuje oceny stanu układów pojazdu (na podstawie określonych dla danego pojazdu wartości granicznych parametrów). Struktura programu stwarza możliwość jego rozszerzenia o dodatkowe moduły pomiarowe i programy pozwalające na tworzenie dokumentów związanych z badaniem technicznym.

Program jest wyposażony w bazę danych pojazdu, w której zawarte są między innymi informacje o przeprowadzonym badaniu oraz uzyskanych wartościach podstawowych parametrów diagnostycznych. Pozwala to na śledzenie zmian stanu technicznego pojazdu podczas jego eksploatacji.

Procedura pomiarowa może być realizowana w trybie automatycznym lub ręcznym. W trybie automatycznym realizowane są pomiary według wcześniej ustalonego algorytmu. Natomiast tryb ręczny umożliwia prowadzenie badań według dowolnej kolejności. Prosta obsługa programu sterującego umożliwia sprawne i bezpieczne przeprowadzenie badania pojazdu. Drukarka zapewnia otrzymanie zbiorczego protokołu po zakończeniu procedury pomiarowej. Istnieje możliwość wprowadzenia do końcowego raportu informacji tekstowej o stanie układów zawieszenia i kierowniczego (wyników badania na urządzeniu szarpiącym).

3.1. Osobowa linia diagnostyczna

Linia diagnostyczna Uniline-2000 jest przeznaczona do badania pojazdów samochodowych o dopuszczalnej masie całkowitej (dmc) do 3,5 t (w tym z nierozłączalnym napędem na cztery koła, ciągników rolniczych i motocykli). W skład linii wchodzą następujące moduły (rys. 3 i rys. 4):

- centralna jednostka sterująca,
- tester płytowy do wstępnej oceny ustawienia kół jezdnych,
- urządzenie do kontroli zawieszenia (z układem wagowym),
- stanowisko rolkowe do badania hamulców,
- urządzenie szarpiące kołami jezdnymi (z napędem pneumatycznym).

Modułem kontrolnym występującym na początku linii diagnostycznej jest tester płytowy do wstępnej oceny ustawienia kół jezdnych UNO-2A/L. Podstawowym elementem urządzenia jest zespół najazdowy (płyta pomiarowa). Dopuszczalny nacisk na zespół najazdowy wynosi 10 kN. Zakres pomiarowy wynosi ±9 mm. Badanie wykonuje się w warunkach dynamicznych, w czasie ruchu samochodu z prędkością około 5 km/h. Obliczany jest poślizg boczny koła (poprzeczne przesunięcie płyty pomiarowej odniesione do jej długości) albo wskaźnik prawidłowości ustawienia kół (poślizg boczny przeliczony na umowną średnicę tarczy koła). Kryteria pomiaru są podawane przez producenta urządzenia. Wynik pomiaru jest prezentowany na ekranie monitora (tablicy świetlnej) w sposób liczbowy i graficzny oraz przedstawiany w protokole z badań. Rozpoczęcie i zakończenie cyklu pomiarowego realizowane jest automatycznie.

Rys. 3. Linia osobowa firmy Unimetal (urządzenia wbudowane w posadzkę i podnośnik 4-kolumnowy)

Kolejnym elementem toru pomiarowego podwozia jest urządzenie do badania układu zawieszenia TUZ-1/L. Do oceny stanu zawieszenia wykorzystano metodę drgań wymuszonych. Urządzenie działa na podstawie analizy nacisku koła na podłoże (metoda Eusama). Na stanowisku wymusza się drgania, a mierzy się nacisk dynamiczny i nacisk statyczny koła na płytę najazdową oraz oblicza wskaźnik Eusama. Do oceny stanu technicznego zawieszenia wystarcza odniesienie wyników pomiaru do wymagań ustalonych przez Europejskie Stowarzyszenie Producentów Amortyzatorów. W tej metodzie zastosowano czterostopniową skalę oceny skuteczności tłumienia zawieszenia oraz ustalono dopuszczalną różnicę między stroną lewą i prawą. Wyniki pomiarów podawane są w procentach (%). Kryteria oceny są jednakowe dla wszystkich pojazdów. Nie ma potrzeby tworzenia bazy danych charakterystyk wzorcowych.

Urządzenie TUZ-1/L składa się z dwóch mechanicznych zespołów wibracyjnych z wbudowanym układem pomiarowym (czujniki tensometryczne) i jest zespolone z wagą. Dopuszczalny nacisk na zespół wibracyjny wynosi 10 kN. Częstotliwość drgań płyty pomiarowej wynosi 24 Hz, a skok płyty 6 mm. Czas badania jednego pojazdu wynosi około 2 minut. Sterowanie procesem pomiarowym jest automatyczne. Sygnał elektryczny z czujników przez wzmacniacz przekazywany jest do centralnej jednostki sterującej. Wyniki pomiaru prezentowane są na ekranie monitora w formie liczbowej i graficznej.

Rys. 4. Linia osobowa firmy Unimetal (urządzenia wbudowane w posadzkę i podnośnik nożycowy)

Następnym modułem pomiarowym linii jest stanowisko rolkowe RHO-6/L do badania hamulców. Istnieje możliwość wyboru automatycznego lub ręcznego trybu pomiarów. Badanie motocykli odbywa się za pomocą specjalnych nakładek. Urządzenie umożliwia również prowadzenie badań hamulców w pojazdach z nierozłączalnym napędem na cztery koła (opcja pozwalająca na odwracanie kierunku obrotów jednego zespołu napędowego).

W zespołach napędowych do pomiaru sił hamowania wykorzystano elektroniczny układ pomiarowy z czujnikami tensometrycznymi. W stanowisku zastosowano automatyczne włączanie i wyłączanie napędu rolek oraz wspomaganie wyjazdu pojazdu z rolek napędowych. Urządzenie posiada układ kontrolny sygnalizacji poślizgu i jest wyposażone w przewodowy miernik siły nacisku na pedał hamulca. Zakres mierzonych sił hamowania wynosi 0-6 kN, maksymalny nacisk osi pojazdu 20 kN, prędkość obwodowa rolek 5 km/h, zakres średnic obręczy kół 10-16".

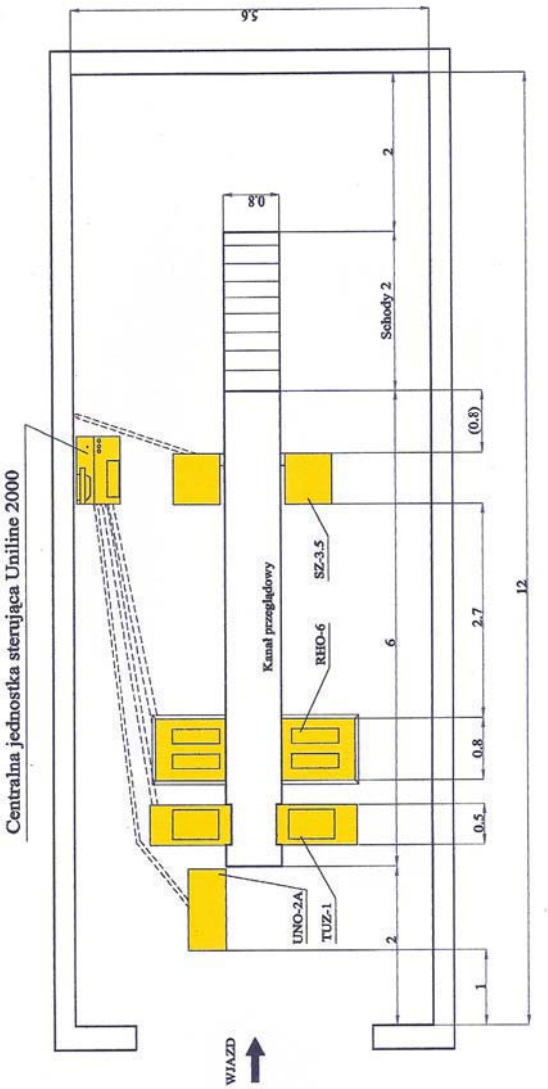
Rozpoczęcie pomiaru następuje w chwili, gdy koła pojazdu znajdą się na rolkach urządzenia. Kolejno wykonywane są pomiary i obliczenia: oporów toczenia kół, stabilności siły hamowania każdego koła, wartości sił hamowania, wskaźnika skuteczności hamowania, rozdziału sił hamowania na strony oraz nacisku na pedał hamulca. Na ekranie monitora prezentowane są wyniki pomiarów sił hamowania koła lewego i prawego, różnicy sił hamowania oraz siły nacisku na pedał hamulca w postaci liczbowej i na wykresach słupkowych.

Wyposażenie dodatkowe (opcja) oferowane wraz z urządzeniem rolkowym obejmuje: analogową tablicę wskaźnikową sił hamowania, nakładki do badania motocykli i bezprzewodowy miernik siły nacisku na pedał hamulca.

Po zakończeniu badań pojazdu na linii diagnostycznej, uzyskuje się na ekranie monitora planszę zbiorczą z wynikami końcowymi pomiarów: ustawienia kół jezdnych, układu zawieszenia i układu hamulcowego. Możliwe jest również sporządzenie protokołu z wykonanych badań wraz z oceną końcową stanu technicznego pojazdu.

Uzupełnieniem linii diagnostycznej jest urządzenie SZ-3.5 do wymuszania szarpnięć kołami jezdnymi pojazdu (z napędem pneumatycznym) w celu kontroli luzów w elementach układów zawieszenia i kierowniczego. Urządzenie składa się z dwóch zespołów szarpaków (platforma lewa i prawa), szafki sterującej, lampy halogenowej z przyciskami sterującymi oraz przyrządu do blokowania pedału hamulca. Podstawowe dane techniczne urządzenia szarpiącego: maksymalny nacisk koła na płytę wynosi 10 kN, skok płyty szarpiącej w kierunku poprzecznym 45 mm, kąt obrotu płyty (dla ruchu skrętnego) wynosi 16°, a siła wymuszająca ruch płyt 630 daN.

Przykładowe rozmieszczenie urządzeń osobowej linii diagnostycznej Uniline-2000 na stanowisku kontrolnym stacji kontroli pojazdów przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Przykładowe rozmieszczenie urządzeń linii osobowej Uniline-2000 na stanowisku kontrolnym stacji kontroli pojazdów (źródło: Unimetal)

3.2. Uniwersalna linia diagnostyczna

Firma Unimetal wytwarza również uniwersalną linię diagnostyczną Uniline-5000 przeznaczoną do badania pojazdów o dmc zarówno do, jak i powyżej 3,5 t. Linia uniwersalna składa się z niżej wymienionych urządzeń (rys. 6):

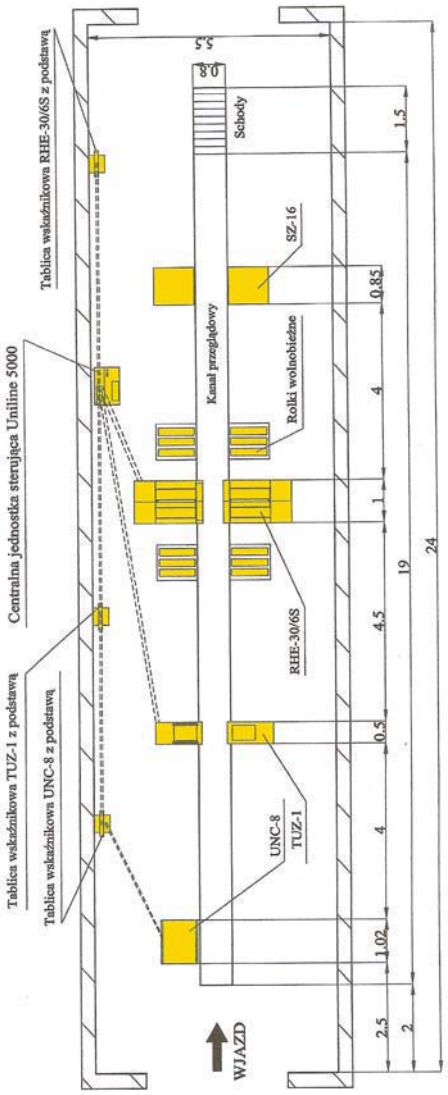
- centralna jednostka sterująca,
- tester płytowy do wstępnej oceny ustawienia kół jezdnych,
- urządzenie do badania układu zawieszenia w pojazdach o dmc do 3,5 t,
- stanowisko rolkowe do badania hamulców (z wagą, urządzeniem dociążającym osie pojazdu, miernikami ciśnienia w instalacji pneumatycznej, miernikiem nacisku na pedał hamulca oraz rolkami wolnobieżnymi),
- urządzenie do wymuszania szarpnięć kołami jezdnymi pojazdu (z napędem hydraulicznym) w celu kontroli luzów w układach zawieszenia i kierowniczym.

Rys. 6. Linia uniwersalna Uniline-5000 z urządzeniami rozmieszczonymi na obrzeżach kanału (źródło: Unimetal)

W stanowiskach uniwersalnych urządzenia pomiarowe układów podwozia mają zainstalowane dwa zakresy pomiarowe mierzonych parametrów (oddzielny dla samochodów osobowych i ciężarowych).

Przykładowe rozmieszczenie urządzeń linii uniwersalnej na stanowisku kontrolnym okręgowej stacji kontroli pojazdów przedstawiono na rys. 7.

Pierwszym stanowiskiem linii diagnostycznej (toru pomiarowego podwozia) jest uniwersalne urządzenie płytowe UNC-8 do wstępnej oceny ustawienia kół jezdnych. Składa się z płyty pomiarowej (zespołu najazdowego) i kasety pomiarowej. Nacisk na zespół najazdowy wynosi 80 kN, zakres pomiarowy ±25 mm. Ocena prawidłowości ustawienia kół następuje podczas przejazdu pojazdu przez swobodnie ułożyskowaną płytę najazdową, która ulega przesunięciu w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu samochodu. Wynik pomiaru pokazywany jest na ekranie monitora (tablicy wskaźnikowej) i może zostać wydrukowany z odpowiednią interpretacją.



Rys. 7. Przykładowe rozmieszczenie urządzeń linii uniwersalnej Uniline-5000 na stanowisku kontrolnym

Kolejnym stanowiskiem linii jest urządzenie TUZ-1 do kontroli układu zawieszenia w pojazdach o dmc do 3,5 t. Możliwe jest umieszczenie tego stanowiska w zestawie urządzeń uniwersalnej linii diagnostycznej, dzięki zabezpieczeniu zespołów wibracyjnych pokrywami ochronnymi.

Następnym modułem pomiarowym linii diagnostycznej jest uniwersalne stanowisko rolkowe RHE-30/6S do badania hamulców. Przeznaczone jest do kontroli hamulców samochodów osobowych, ciężarowych, autobusów, ciągników rolniczych, przyczep i motocykli. Umożliwia badanie hamulców w pojazdach dwuosiowych oraz wieloosiowych (z osiami wleczonymi lub międzymostowymi mechanizmami różnicowymi). W razie potrzeby można wykonywać pomiary sił hamowania

z wykorzystaniem urządzenia dociążającego osie pojazdu.

Stanowisko rolkowe składa się z dwóch zespołów napędowych, tablicy wskaźnikowej, przewodowych mierników ciśnienia w instalacji pneumatycznej (0-1 MPa) i siły nacisku na pedał hamulca (0-1 kN). W celu uzyskania uniwersalności zastosowano dwa zakresy pomiarowe sił hamowania (0-6 kN i 0-30 kN) oraz dwa zakresy prędkości obwodowych rolek napędowych (2,54 km/h i 5,08 km/h). Maksymalny nacisk osi wynosi 160 kN, zakres średnic obręczy kół 12-22,5".

Po włączeniu urządzenia automatycznie realizowany jest test elektronicznego systemu pomiarowego. Badanie układu hamulcowego można wykonywać w cyklu automatycznym lub ręcznym. Urządzenie rolkowe umożliwia wykonanie pomiarów i obliczeń: oporów toczenia kół, wskaźników stabilności siły hamowania, wartości sił hamowania, wskaźnika skuteczności hamowania, różnicy sił hamowania kół jednej osi, wartości ciśnień w instalacji pneumatycznej lub siły nacisku na pedał hamulca. Zapewnione jest sporządzenie raportu z przeprowadzonych badań.

Wyposażenie dodatkowe stanowiska obejmuje: rolki wolnobieżne, hydrauliczne urządzenie dociążające osie pojazdu, układ wagi, nakładki do badania motocykli, bezprzewodowe mierniki ciśnienia i siły nacisku na pedał hamulca.

W części końcowej linii znajduje się uniwersalne urządzenie SZ-16 do wymuszania szarpnięć kołami jezdnymi w celu kontroli luzów w układach zawieszenia i kierowniczym. Urządzenie składa się z dwóch płyt szarpiących (najazdowych), zasilacza hydraulicznego z rozdzielaczem, szafki sterującej i lampy halogenowej z przyciskami sterującymi. Płyty najazdowe zamontowane są w wannach fundamentowych i osadzone na prowadnicach zapewniających swobodę ruchu w kierunkach wzdłużnym i poprzecznym. Ruch płyty wymuszany jest przez jeden z czterech siłowników jednostronnego działania, zasilanych przez zasilacz hydrauliczny z wbudowanym układem elektrozaworów.

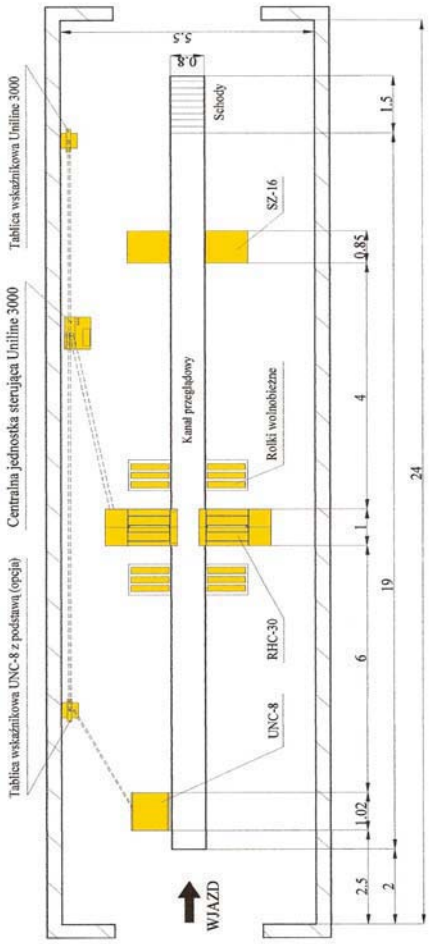
W celu zapewnienia uniwersalności stanowiska wprowadzono dwa zakresy skoku płyt najazdowych (±30 mm i ±50 mm). Siła wymuszająca ruch płyt wynosi 30 kN, maksymalny nacisk osi 160 kN, ciśnienie robocze 15,2 MPa.

3.3. Ciężarowa linia diagnostyczna

Urządzenia diagnostyczne oferowane przez firmę Unimetal pozwalają również na zestawienie linii do badania pojazdów o dmc powyżej 3,5 t. W skład linii do badania samochodów ciężarowych Uniline-3000 wchodzą (rys. 8 i rys. 9):

- centralna jednostka sterująca,
- stanowisko płytowe do wstępnej oceny ustawienia kół jezdnych,
- urządzenie rolkowe do badania hamulców z miernikami do pomiaru ciśnienia w instalacji pneumatycznej i nacisku na pedał hamulca oraz rolkami wolnobieżnymi (opcja),
- urządzenie do wymuszania szarpnięć kołami jezdnymi pojazdu (z napędem hydraulicznym) w celu kontroli luzów w elementach układu zawieszenia i układu kierowniczego.

Rys. 8. Widok linii ciężarowej Uniline-3000 (źródło: Unimetal)



Rys. 9. Przykładowe rozmieszczenie urządzeń linii ciężarowej Uniline-3000 na stanowisku kontrolnym

Spośród wymienionych urządzeń dwa są stanowiskami uniwersalnymi (tester do oceny ustawienia kół UNC-8 oraz urządzenie do wymuszania szarpnięć kołami jezdnymi SZ-16). Do badania hamulców zastosowano odmianę ciężarową urządzenia rolkowego RHC-30 z elektronicznym układem pomiarowym siły hamowania. Zakres pomiarowy siły hamowania wynosi 0-30 kN, maksymalny nacisk osi pojazdu 160 kN, prędkość obwodowa rolek napędowych 2,67 km/h, a zakres średnic obręczy kół 14-22,5". Na stanowisku RHC-30 są mierzone i obliczane identyczne parametry diagnostyczne, jak w urządzeniu uniwersalnym. Uzyskane wyniki pomiarów można przedstawić w postaci wydruku (raport końcowy z badań).

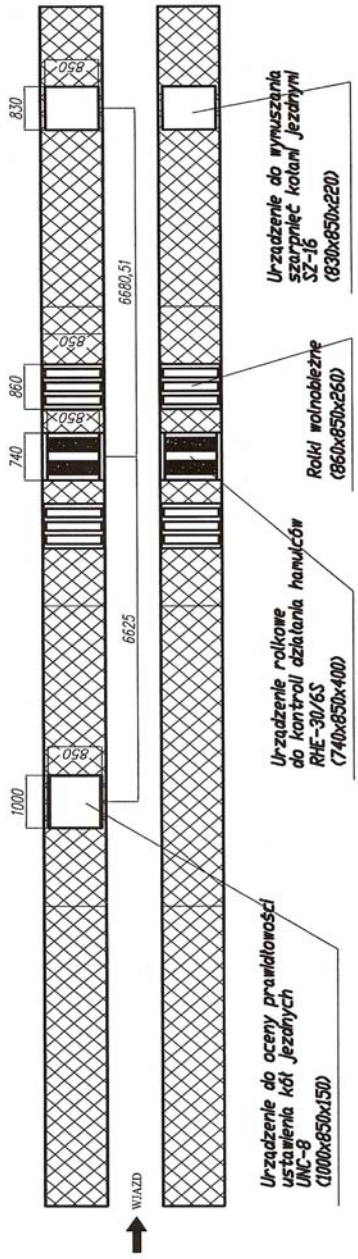
3.4. Mobilna linia diagnostyczna

Mobilna linia uniwersalna firmy Unimetal składa się z centralnej jednostki sterującej, urządzenia płytowego UNC-8 do oceny wstępnej ustawienia kół jezdnych, urządzenia rolkowego RHE-30/6S do kontroli działania hamulców, rolek wolnobieżnych, urządzenia szarpiącego SZ-16 (z napędem hydraulicznym), rampy najazdowej, przewodów połączeniowych i kontenera.

Centralna jednostka sterująca (rys. 10) jest umieszczona w kontenerze. Składa się z szafki, komputera, monitora, drukarki i pilota zdalnego sterowania oraz szafki elektrycznej.

Zespół urządzeń do badania układów podwozia wbudowano we wnęki rampy najazdowej (rys. 11), do której wykonania wykorzystano elementy składanego mostu saperskiego SMT.

Rys. 10. Centralna jednostka sterująca mobilnej linii diagnostycznej firmy Unimetal: 1 – szafka z komputerem, monitorem i drukarką, 2 – szafka elektryczna



Rys. 11. Rozmieszczenie urządzeń linii mobilnej firmy Unimetal we wnękach rampy najazdowej (mostu SMT)

Przyrząd do pomiaru siły nacisku na pedał hamulca, miernik ciśnienia w instalacji pneumatycznej pojazdu (rys. 12) oraz pilot zdalnego sterowania zostały wykonane w wersji bezprzewodowej (transmisja danych za pomocą fal radiowych).

Zasilaną z sieci zewnętrznej szafkę elektryczną łączy się przewodami ze skrzynką przyłączeniową umieszczoną z boku rampy najazdowej. Zasilanie urządzeń kontrolnych następuje za pomocą przewodów połączeniowych z wtyczkami (zasilających i sygnałowych). Rampy najazdowe należy ustawić na utwardzonej i poziomej nawierzchni równolegle do płaszczyzny podłużnej utworzonego stanowiska kontrolnego.

Rys. 12. Bezprzewodowy miernik ciśnienia w instalacji pneumatycznej: 1 – przetwornik ciśnienia, 4 – nadajnik radiowy, 5 – odbiornik radiowy, 2, 3, 6 – przewód ze złączem

4. ROZWÓJ LINII DIAGNOSTYCZNYCH

Aktualnie można wyodrębnić następujące tendencje rozwojowe w konstrukcji linii diagnostycznych:

1) Linie motocyklowe (rys. 13) – przeznaczone są do badania pojazdów jednośladowych. Umożliwiają pionowe ustawienie motocykla podczas badań (wyposażone są w rampę z uchwytami pneumatycznymi do blokowania koła przedniego i tylnego). Linie do badania pojazdów jednośladowych rozpowszechnione są w krajach o dużej liczbie motocykli.

Rys. 13. Widok linii diagnostycznej do badania pojazdów jednośladowych firmy Giuliano

2) Linie segmentowe (rys. 14) – to rozwiązanie polega na grupowaniu urządzeń linii w kilka oddzielnych stanowisk kontrolnych, ustawionych w jednym ciągu pomiarowym. Zwykle występują trzy lub cztery stanowiska pomiarowe ustawione w pewnej odległości od siebie. Pozwala to na zwiększenie przepustowości stanowiska. Na każdym stanowisku pomiarowym występują pulpity sterownicze lub terminale komputerowe z monitorami.

Rys. 14. Widok czterostopniowej linii Eurosystem firmy Maha do badania pojazdów osobowych i dostawczych

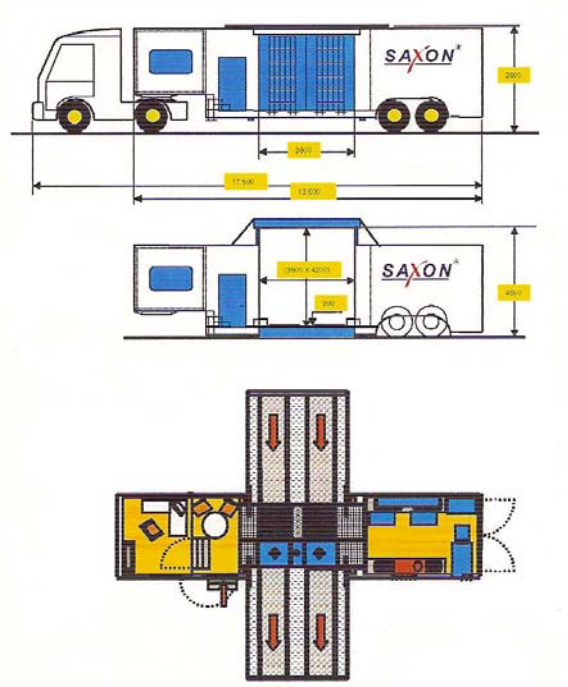
3) Linie podwójne (rys. 15) – jedna z linii jest wówczas linią osobową, a druga linią uniwersalną lub ciężarową. W efekcie następuje znaczne zwiększenie przepustowości stacji kontroli pojazdów.

Rys. 15. Okręgowa stacja kontroli pojazdów firmy Unimetal z dwoma liniami diagnostycznymi (osobową Uniline-2000 i uniwersalną Uniline-5000)

4) Linie uniwersalne (rys. 16) – umożliwiają badanie na tych samych stanowiskach kontrolnych pojazdów o dopuszczalnej masie całkowitej zarówno do 3,5 t, jak i powyżej 3,5 t. Urządzenia do badania układów podwozia wyposaża się wówczas w dwa zakresy pomiarowe mierzonych parametrów. Pozwala to na znaczne zmniejszenie kosztów wykonania (wyposażenia) stacji kontroli pojazdów.

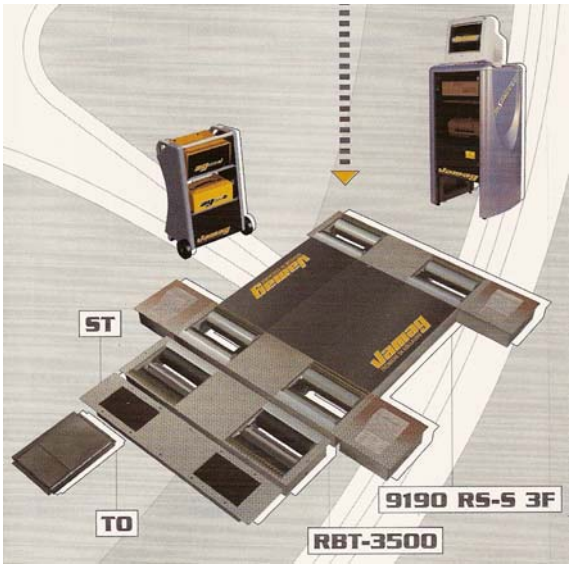
Rys. 16. Widok uniwersalnej linii diagnostycznej Uniline-5000 firmy Unimetal do badania pojazdów o dmc do i powyżej 3,5 t

5) Linie mobilne – można przewozić i rozstawiać w wybranym miejscu. Stanowią ofertę specjalną niektórych producentów. Mogą być przewożone w kontenerze lub w naczepie. Spotyka się dwa rozwiązania: urządzenia toru pomiarowego podwozia mogą być wyjmowane z naczepy (kontenera) i ustawiane obok niej w linię diagnostyczną lub urządzenia kontrolne pozostają na stałe w naczepie, a rampy najazdowe ustawia się poprzecznie do jej osi podłużnej (rys. 17).



Rys.17. Przykładowe rozwiązanie linii mobilnej firmy Saxon przeznaczonej do badania pojazdów o dmc do 3,5 t umieszczonej w naczepie (po rozłożeniu najazdów kierunek ruchu pojazdu badanego jest poprzeczny w stosunku do osi podłużnej naczepy)

6) Linie z hamownią podwoziową (rys. 18) – takie stanowiska umożliwiają kompleksowe badanie podstawowych układów samochodu, to jest układu jezdnego, zawieszenia, kierowniczego i hamulcowego oraz układu napędowego (również silnika pod obciążeniem).



Rys. 18. Widok linii diagnostycznej do badania pojazdów o dmc do 3,5 t z dwuosiową hamownią podwoziową (źródło: Vamag)

Miernikiem nowoczesności linii diagnostycznej oraz jej przydatności do przyszłościowych wymagań jest odpowiednie oprogramowane.

Centralna jednostka sterująca linii za pomocą magistrali komunikacyjnej wymienia dane cyfrowe z modułami pomiarowymi układów podwozia i innymi urządzeniami oraz przetwarza wyniki badań. Wymiana danych odbywa się w oparciu o wybrany standard transmisji szeregowej, co pozwala na podłączenie kilkudziesięciu układów peryferyjnych i zarządzanie nimi przez jednostkę centralną (możliwość rozbudowy oraz aktualizacji oprogramowania). Nowe wersje linii mogą współpracować z siecią komputerową stacji kontroli pojazdów i siecią zewnętrzną (np. centralna ewidencja pojazdów i kierowców), a także pracować metodą diagnozy zdalnej. Obsługę linii ułatwiają czytelne programy graficzne. Podczas badań na monitorze pojawiają się okna (rys. 19÷21), które przedstawiają: czynności do wykonania, komunikaty dla diagnosty, wyniki wykonanych pomiarów, zmianę badanych parametrów w postaci zależności funkcyjnych, protokoły z kontroli itp.

Linie diagnostyczne charakteryzują się nowoczesnym rozwiązaniem konstrukcyjnym, niezawodnością działania i łatwością obsługiwania. Umożliwiają obiektywną ocenę stanu technicznego układów podwozia istotnie wpływających na bezpieczeństwo jazdy pojazdów samochodowych, ciągników rolniczych, motocykli, przyczep i naczep.

Rys.19. Widok ekranu *Wybierz osie rodzaje pomiarów* (źródło: Unimetal)

Rys. 20. Widok ekranu *Wyniki badania układu zawieszenia* (źródło: Unimetal)

Rys. 21. Widok ekranu *Wyniki badania hamulca roboczego* (źródło: Unimetal)

LITERATURA

[1] *Materiały informacyjne firm produkujących urządzenia (linie) diagnostyczne:* Fudim-Polmo Giuliano, Maha, Saxon, Unimetal, Vamag.

[2] Praca zbiorowa (red. Cempel C., Żółtowski B.). *Inżynieria diagnostyki maszyn: wydanie 1*, Radom, Instytut Technologii Eksploatacji PIB, 2004.

[3] Praca zbiorowa (red. Bocheński C.): *Badania kontrolne samochodów: wydanie 1*, Warszawa, WKŁ, 2000.

[4] Praca zbiorowa (red. Niziński S.): *Diagnostyka samochodów osobowych i ciężarowych: wydanie 1*, Warszawa, Dom Wydawniczy Bellona, 1999.

[5] Sitek K.: *Diagnostyka samochodowa. Układy odpowiedzialne za bezpieczeństwo jazdy: wydanie 1,* Warszawa, Wydawnictwo Auto 1999.

[6] Sitek K., Syta S.: *Pojazdy samochodowe. Badania i diagnostyka: wydanie 1*, Warszawa, WKŁ, 2008.

Dr inż. **Kazimierz SITEK**, absolwent Wojskowej Akademii Technicznej (1974). Stopień doktora nauk technicznych uzyskał na Wydziale Mechanicznym WAT (1983). Pracował na stanowiskach naukowych i dydaktycznych w Wyższej Oficerskiej Szkole Samochodowej oraz Centrum Szkolenia Czołgowo-Samochodowego. Wieloletni kierownik stacji kontroli pojazdów. Organizator szkolenia diagnostów w zakresie przeprowadzania badań technicznych pojazdów. Staż naukowo-dydaktyczny: Offiezierschochschule der Landstreitkräfte (Löbau, Niemcy, 1988). Obecnie pełni funkcje starszego specjalisty ds. diagnostyki (Unimetal) i ds. szkolenia (WORD). Zajmuje się zagadnieniami eksploatacji i diagnostyki pojazdów samochodowych oraz problemami transportu drogowego. Jest autorem lub współautorem 170 publikacji, w tym 6 książkowych. Rzeczoznawca SIMP, członek PTDT.

METODYKA NAUCZANIA DIAGNOZOWANIA SYSTEMÓW BEZPIECZEŃSTWA NA PRZYKŁADZIE SYSTEMÓW SYGNALIZACJI WŁAMANIA I POŻARU

Jacek PAŚ, Tadeusz DĄBROWSKI

Wydział Elektroniki WAT, Instytut Systemów Elektronicznych (0 22 68 39 125) JPaś@wel.wat.edu.pl

Streszczenie

Podstawowym zadaniem systemów bezpieczeństwa instalowanych w obiektach budowlanych jest wykrywanie zagrożeń i powiadamianie o ich wystąpieniu w celu podjęcia odpowiednich działań. Instalowane w obiektach budowlanych techniczne systemy ochrony wymagają podczas eksploatacji wykonywania określonych sprawdzeń, na podstawie, których można postawić diagnozę. Wiarygodność diagnozy decyduje o dalszym istnieniu systemu (naprawa, wymiana czujek, wyłączenie systemu, wezwanie serwisu, itp.), co wiąże się z kosztami. W referacie przedstawiono metodykę nauczania diagnozowania złożonych systemów bezpieczeństwa na przykładzie systemów sygnalizacji włamania i pożaru.

Słowa kluczowe: diagnozowanie, techniczny system ochrony, metodyka nauczania.

METHODOLOGY OF TEACHING OF DIAGNOSING TECHNICAL SECURITY SYSTEMS WITH EXAMPLES OF SYSTEM OF SIGNALIZATION OF BURGLARY AND FIRE

Summary

The main task of security systems installed in objects is detection of emergencies, informing about them and, if it is possible, initializing respective countermeasures. Security systems used in buildings require diagnosing to identify their technical and functional condition. Likelihood of the obtained diagnosis decides about further actions (repair, replacement of sensors, calling for service, etc.), and this is connected with certain costs. This elaboration is an illustration of certain methodology of teaching of diagnosing a technical security system on the basis of systems of signalization of burglary and assault and signalization of fire.

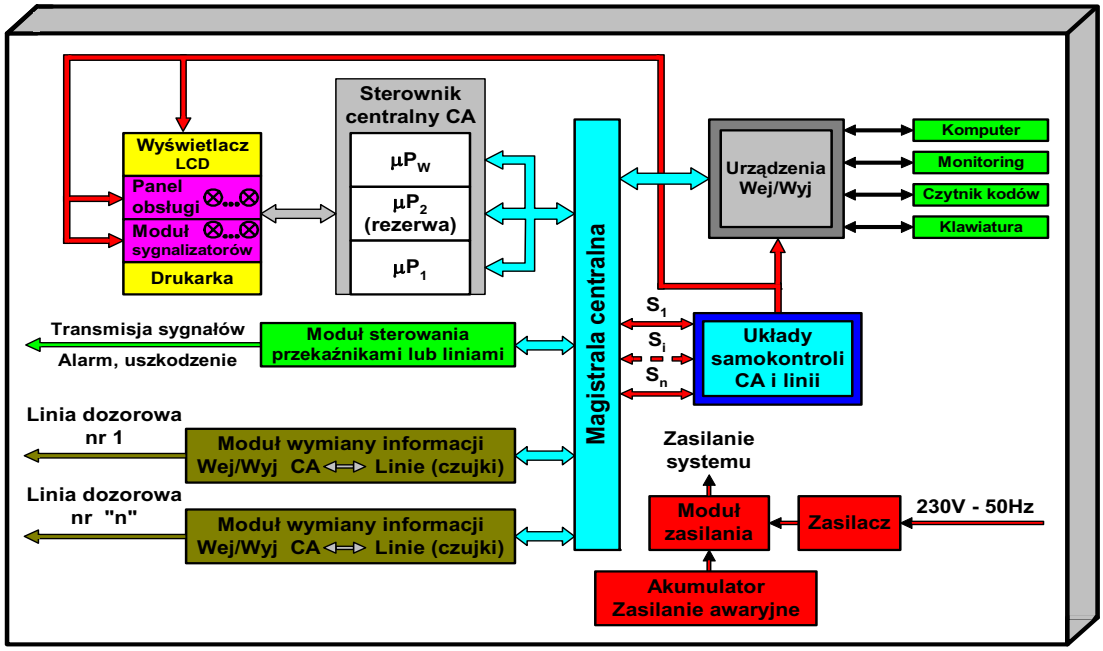
Keywords: diagnosing, technical security system, methodology of teaching.

1. DIAGNOZOWANIE TECHNICZNYCH SYSTEMÓW BEZPIECZEŃSTWA

Systemy bezpieczeństwa (ochrony) są obiektami technicznymi złożonymi, gdyż realizują wiele różnych funkcji, do których można na przykład zaliczyć: dozorowanie zabezpieczanego obiektu, autodiagnozowanie elementów systemu (czujek, kamer, linii zasilających, urządzeń wej/wyj, rezerwowych źródeł zasilania, itd.), alarmowanie o zagrożeniu, inicjowanie działań antydestrukcyjnych. Złożone systemy bezpieczeństwa wyposażane są w układy samokontroli tj. układy automatycznego dozorowania stanu technicznego. Dozorowanie to polega na permanentnym diagnozowaniu poszczególnych elementów systemu (tj. czujek, elementów centrali alarmowej, kamer, monitorów, sygnalizatorów optycznych itd.). Centrala alarmowa wytwarza wzorcowe sygnały, które pobudzają poszczególne elementy składowe sytemu. Zadaniem konstruktorów jest określenie na etapie konstruowania systemu dopuszczalnych tolerancji sygnałów wymuszających i odpowiedzi.

Elementem odpowiedzialnym za realizację algorytmu dozorowania systemu bezpieczeństwa jest mikroprocesor sterownika centralnego centrali alarmowej, który realizuje określoną programowo sekwencję działań diagnostycznych. Pobudzone sygnałami diagnostycznymi, wytworzonymi przez układ samokontroli, czujki alarmowe „odpowiadają" impulsami o założonej sekwencji np. czasowej. Każda czujka zabudowana w linii dozorowej posiada swój własny, unikalny adres (przypisanie tego samego adresu dla dwóch czujek powoduje sygnalizację niezdatności w CA).

Informacja o stanach zdatności lub niezdatności czujek pojawia się na wyświetlaczu LCD lub w module sygnalizatorów wizualnych. W przypadku wystąpienia, podczas sprawdzania stanu technicznego systemu, stanu alarmu np. przeciwpożarowego, przerywana jest procedura testowania (sygnał alarmu posiada większy priorytet niż sygnały diagnostyczne) i uruchamiane są działania informacyjno-terapeutyczne (rys. 1).



Rys. 1. Schemat blokowy złożonego systemu bezpieczeństwa z układem samokontroli

2. DIAGNOZOWANIA STANU SYSTEMU NA PRZYKŁADZIE UKŁADU SYGNALIZACJI WŁAMANIA I NAPADU

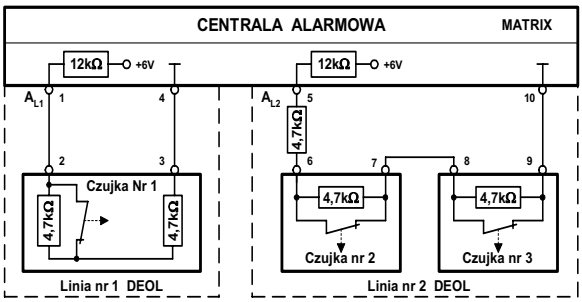
Stanowisko laboratoryjne przedstawia model fizyczny układu sygnalizacji włamania, które składa się z centrali alarmowej CA z dwoma liniami dozorowania stanu chronionych pomieszczeń – linie DEOL. W linii dozorowania nr 1 znajduje się jedna czujka z dwoma rezystorami. W linii dozorowania nr 2 znajdują się dwie czujki. Ogólny schemat „układu sygnalizacji włamania" przedstawiono na rys. 2. Do każdej linii dołączony jest rezystor ograniczający prąd do wartości 0,5mA, w przypadku wystąpienia zwarcia linii. Rezystory te znajdują się w centrali alarmowej. Zestaw stanowiska stanowi pulpit sterująco-pomiarowy i woltomierz. Na rys. 3 przedstawiono widok płyty czołowej stanowiska.

W stanach zdatności i niezdatności stanowisko umożliwia:

- sygnalizację stanów pracy „układu sygnalizacji włamania";
- pomiar napięcia U_{L1} i U_{L2} w punktach A_{L1} i A_{L2};
- pomiar napięcia w wybranych punktach linii nr 1 i 2 (punkty nr 1 ÷ 10);
- zadawanie uszkodzeń „układu sygnalizacji włamania".

Przed rozpoczęciem ćwiczenia wykładowca podaje numery wyłączników, które studenci powinni włączać kolejno, aby zadać określone uszkodzenie. Dopiero po przeprowadzeniu procesu diagnozowania jednego uszkodzenia, należy włączyć następny wyłącznik (po wyłączeniu poprzedniego), zadając kolejne uszkodzenie. Założono, że w układzie diagnozowanym istnieje w danej chwili tylko jedna niezdatność.

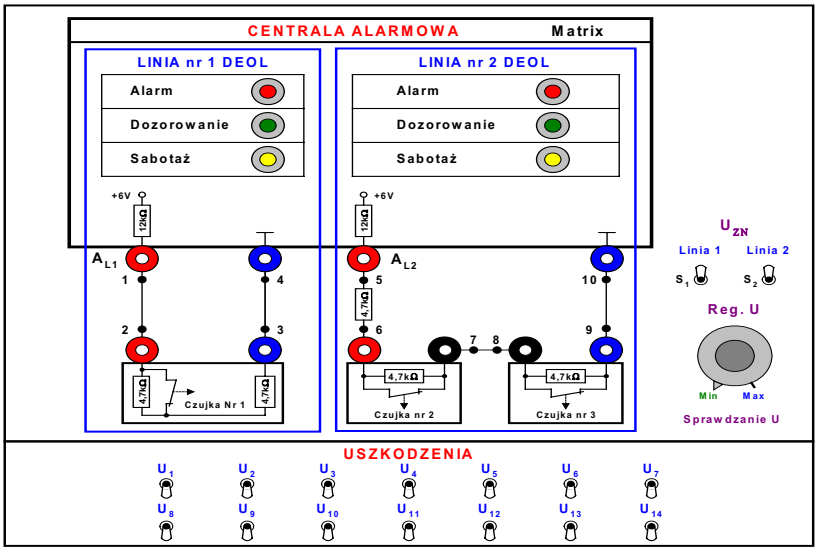
W tabeli 1 zestawiono przykładowe zbiory objawów i hipotez, polecenie wykonania sprawdzeń, wyniki realizacji tych sprawdzeń oraz ostateczną diagnozę o stanie systemu sygnalizacji włamania i napadu.



Rys. 2. Ogólny schemat układu sygnalizacji włamania i napadu z przyłączonymi do centrali alarmowej liniami DEOL.

Tabela 1. Sposób wypełnienia tabeli diagnostycznej

Zbiór objawów	**Zbiór hipotez**
1. Świeci dioda żółta „**Sabotaż**" w linii **nr …**	1. Uszkodzona linia DEOL nr **1** lub **2**
2. Świeci dioda zielona „**Dozoro.**" w linii **nr …**	2. Zwarcie między punktami **…i…Linii nr…**
3. Świeci dioda czerwona „**Alarm**" w linii **nr …**	3. Przerwa między punktami **…i…Linii nr…**
Zbiór sprawdzeń	**Zbiór wyników sprawdzeń**
1. Sprawdzić napięcie w punkcie $\mathbf{A_{L1}}$ lub $\mathbf{A_{L2}}$	1. Napięcie w punkcie $\mathbf{A_{L..}}$ - $\mathbf{U_{AL1}}$ lub $\mathbf{U_{AL2}}$ = **…V**



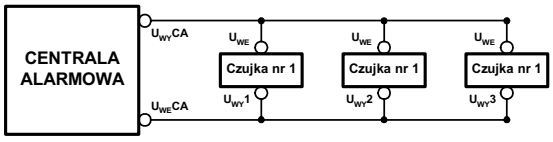
Rys. 3. Schemat płyty czołowej systemu sygnalizacji włamania i napadu zrealizowanej w ćwiczeniu laboratoryjnym

3. DIAGNOZOWANIE STANU SYSTEMU SYGNALIZACJI POŻARU

Układ sygnalizacji pożaru ma na celu wczesne wykrywanie pożaru oraz alarmowanie o nim w celu umożliwienia podjęcia działań takich jak:
- uruchomienie samoczynnych procesów gaszenia;
- ewakuacja ludzi i mienia;
-wezwanie straży pożarnej za pomocą systemów transmisji alarmu.

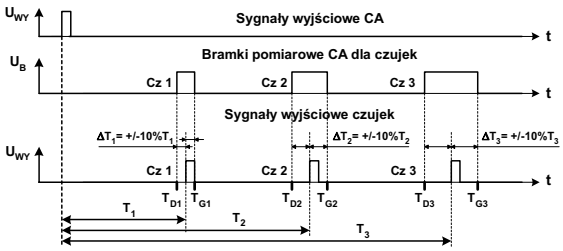
W skład tego układu wchodzą następujące podstawowe elementy:
-centralka sygnalizacji pożarowej wraz z systemem zasilania w energię elektryczną;
-czujki pożarowe;
-urządzenia transmisji sygnałów alarmu pożarowego;
-sygnalizatory alarmowe.

Stanowisko laboratoryjne przedstawia prosty model fizyczny układu sygnalizacji pożaru, który składa się z centrali alarmowej (CA) z jedną linią dozorowania stanu chronionych pomieszczeń. W linii dozorowania znajdują się trzy czujki pracujące w systemie impulsowym z podziałem czasowym. Ogólny schemat „układu sygnalizacji pożaru" przedstawiono na rys.4.



Rys. 4. Ogólny schemat „Układu sygnalizacji pożaru"

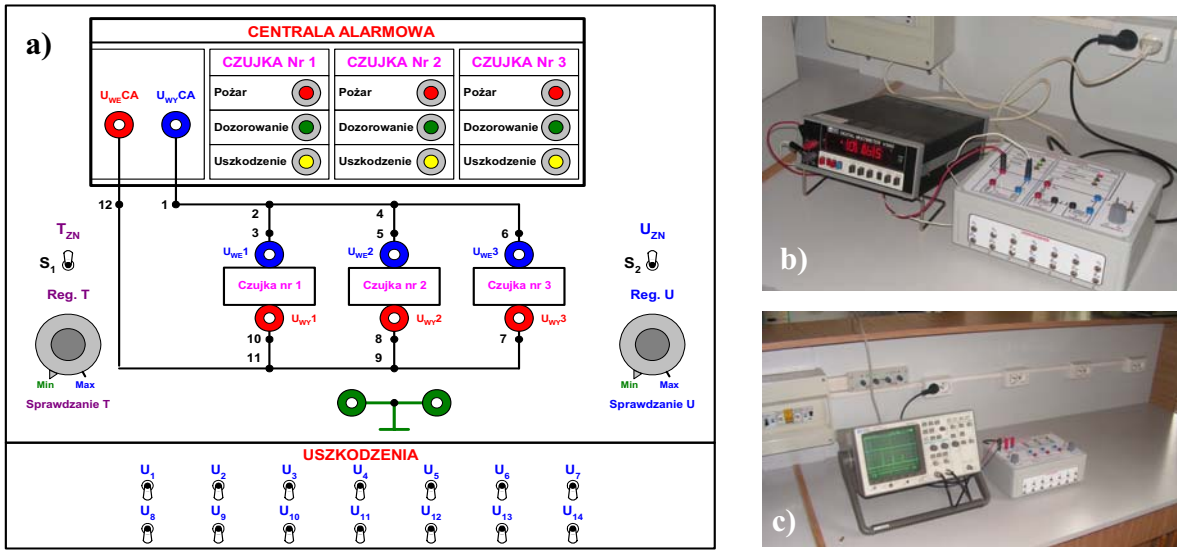
Po wysłaniu impulsu przez centralę, czujka generuje impuls z opóźnieniem czasowym T_i zależnym od numeru czujki. $T_i = T_1$ lub T_2, lub T_3. Po czasie T_1 czujka nr 1 wysyła do linii dozorowej impuls o wartości zależnej od stanu czujki. W kolejnych przedziałach T_2 i T_3 impulsy są wysyłane przez czujki nr 2 i 3. Układy wejściowe centrali kontrolując wartości amplitudy impulsów przy pomocy komparatorów drabinkowych w wyznaczonych przedziałach czasowych określają stan poszczególnych czujek (rys. 5).



Rys. 5. Impulsy wyjściowe centrali alarmowej i czujek

Zestawem laboratoryjnym (stanowiskiem pomiarowym) jest pulpit sterująco-pomiarowy i oscyloskop cyfrowy. Stanowisko umożliwia zadawanie uszkodzeń „układu sygnalizacji pożaru" (wyłączniki z napisem „uszkodzenia" ($U_1 \div U_{14}$). Diody służą do sygnalizacji stanu pracy „układu sygnalizacji pożaru" (zgodnie z opisem na płycie czołowej stanowiska rys. 6a).

Przed rozpoczęciem ćwiczenia wykładowca podaje numery wyłączników, które studenci powinni włączać kolejno, aby zadać określone uszkodzenie. Dopiero po przeprowadzeniu procesu diagnozowania jednego uszkodzenia, należy włączyć następny wyłącznik (po wyłączeniu poprzedniego), zadając kolejne uszkodzenie. Założono, że w układzie diagnozowanym istnieje w danej chwili tylko jedna niezdatność. W tab. 2 przedstawiono przykładowe objawy, hipotezy oraz dostępny zbór sprawdzeń.



Rys. 6. a) Widok płyty czołowej stanowiska do diagnozowania „układu sygnalizacji pożaru", b) Model laboratoryjny układu sygnalizacji włamania i napadu, c) Model laboratoryjny układu sygnalizacji pożaru

Tabela 2. Sposób wypełnienia tabeli diagnostycznej dla systemu sygnalizacji pożarowej

Zestaw wstępnych objawów uszkodzeń	
1.	Świecą żółte diody w kanałach czujek nr .....
Zbiór hipotez	
1.	Uszkodzone kanały czujek nr,. i .. (czujki nr ..)
2.	Brak impulsów na wyjściu CA czujek nr, ...
Zbiór poleceń wykonania sprawdzeń	
Sprawdzeniu podlega istnienie impulsu, amplituda „U" i przesunięcie impulsu w czasie „T" wg. pkt.....	
1.	Sprawdzić parametry impulsów na wejściu CA czujek nr .. , .. i .. (czujki nr ..)
2.	.....

4. WNIOSKI

Aby nauczanie osiągnęło swój cel należy odpowiednio dobrać metodę nauczania. Metody nauczania „to celowo i systematycznie stosowany sposób pracy nauczyciela z uczniami, który umożliwia uczniom opanowanie wiedzy wraz z umiejętnością posługiwania się nią w praktyce, jak również rozwijanie zdolności i zainteresowań poznawczych uczniów" [1].

Aktywne uczenie, do których można zaliczyć, m. in. **ćwiczenie laboratoryjne** ma wiele zalet, bowiem angażuje różne zmysły ucznia, co pozwala na lepsze zrozumienie i zapamiętanie nauczanych treści. Uczący się generalnie pamiętają tyko 10% tego, co słyszą (np. wykład); 40% tego, o czym rozmawiają (np. dyskusja, ćwiczenia rachunkowe), **ale aż 90% tego, co robią (np. ćwiczenia laboratoryjne, inscenizacja**). Dlatego tak ważnym problemem jest odpowiednie przygotowanie i przeprowadzenie ćwiczenia laboratoryjnego, które powinno odpowiadać rozwiązaniom technicznym istniejącym w rzeczywistych systemach bezpieczeństwa. Przedstawione w niniejszym opracowaniu ćwiczenia laboratoryjne wykonywane są w ramach przedmiotu „Eksploatacja systemów bezpieczeństwa".

LITERATURA

[1] Kupisiewicz Cz.: *Podstawy dydaktyki ogólnej*. Warszawa: Wydaw. PWN 1988.
[2] Migdalski J.: *Inżynieria niezawodności-poradnik.* ATR Bydgoszcz 1992
[3] Łukasik Z.: *Teoria informacji i bezpieczeństwo transmisji* Politechnika Radomska 2005
[4] Staniszewski R. *Sterowanie procesem eksploatacji* Warszawa: Wydaw. WNT 1988

Mgr inż. **Jacek PAŚ** jest asystentem naukowo-dydaktycznym w Instytucie Systemów Elektronicznych Wojskowej Akademii Technicznej. Głównym obszarem jego zainteresowań jest kompatybilność elektromagnetyczna oraz eksploatacja systemów bezpieczeństwa.

Dr hab. inż. **Tadeusz DĄBROWSKI** jest zatrudniony na stanowisku profesora nadzwyczajnego w Instytucie Systemów Elektronicznych na Wydziale Elektroniki WAT. Zainteresowania naukowe koncentruje głównie w obszarze teorii eksploatacji. Do ważniejszych zagadnień, którymi się zajmuje należą: diagnostyka systemów antropotechnicznych; optymalizacja procesów diagnostyczno-obsługowych; komputerowe wspomaganie procesu diagnostyczno-obsługowego.

NEURONOWA SYMULACJA FLUKTUACJI CIŚNIENIA I TEMPERATURY PARY W UPUŚCIE PAROWEGO BLOKU ENERGETYCZNEGO

Justyna ŚLĘZAK-ŻOŁNA, Jerzy GŁUCH

Politechnika Gdańska, Wydział Oceanotechniki I Okrętownictwa
Katedra Automatyki Okrętowej i Napędów Turbinowych
Gdańsk 80-952, ul. Narutowicza 11/12, jslezak@pg.gda.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę symulacji neuronowej dla zastosowań w diagnostyce on-line obiektów energetycznych. Model neuronowy opiera się na statycznych jednokierunkowych sztucznych sieciach neuronowych oraz na danych pomiarowych z parowego bloku energetycznego o mocy 200 MW. Sieci podają wartości referencyjne parametrów przepływowych pary dla aktualnych warunków obciążenia obiektu. Badano wpływ na jakość symulacji neuronowej takich czynników jak: sposób definiowania stanu obciążenia obiektu, dobór danych uczących i testujących, metody wyszukiwania najlepszych struktur sieci, wpływ błędów pomiarowych i sezonowych zmian warunków pracy obiektu. Dokładność modelu porównano ze sprawdzonym modelem analitycznym danego obiektu.

Słowa kluczowe: sztuczne sieci neuronowe, diagnostyka on-line, parowy blok energetyczny.

NEURAL SIMULATION OF PRESSURE AND TEMPERATURE FLUCTUATIONS AT STEAM EXTRACTION OF POWER UNIT WITH STEAM TURBINE

Summary

This paper presents neural simulation method for on-line diagnostics use for steam power units. Neural model is based on static feedforward artificial neural networks and measurements from steam 200 MW power unit. The networks give reference steam flow parameters for current operation settings. Researched was dependence on neural simulation quality such factors as: defining power settings, teaching and testing data selection, searching out of the best networks architecture, measurement errors and seasonal changes of operation conditions. Accuracy of neural calculations was compared with verified analytical model of the object.

Keywords: artificial neural networks, on-line diagnostics, steam power unit.

1. WSTĘP

Obecnie w energetyce powszechne są rozbudowane systemy monitorujące bieżącą pracę obiektów. Setki pomiarów parametrów pracy obiegu zbierane są na ekranach pulpitów operatorskich, aby ułatwić obsługę, poprawić bezpieczeństwo i zwiększyć kontrolę nad tymi skomplikowanymi obiektami. Jednak w większości przypadków ta ogromna ilość informacji nie jest w pełni wykorzystana i sprowadza się do zdalnego sterowania obiektem oraz śledzenia poprawnej wartości parametrów pracy. Gdzieniegdzie tylko wyznaczane są na bieżąco uproszczone wskaźniki sprawności pracy najważniejszych urządzeń i porównywane z wartościami referencyjnymi podawanymi przez producenta urządzeń, które nie uwzględniają aktualnych warunków pracy ani dynamiki zmian obciążenia bloków parowych.

Brakuje więc wiarygodnej informacji o referencyjnym stanie obiektu podawanej dla aktualnego stanu pracy. Źródłem takiej informacji powinien być model obiektu, spełniający podstawowe wymagania operatora bloku, czyli: dostarczanie informacji o referencyjnym stanie pracy układu dla aktualnych warunków ruchowych, z dobrą dokładnością i w czasie zbliżonym do czasu taktowania systemu monitorującego.

Sztuczne sieci neuronowe mogą okazać się metodą pozwalającą spełnić te wymogi. Ich przydatność do symulowania parametrów pracy ustabilizowanego cieplnie obiegu parowego została sprawdzona w pracy [1]. Następnym etapem jest potwierdzenie skuteczności tej metody do wyznaczania wzorcowych parametrów pracy obiektu w trybie on-line, z uwzględnieniem dynamiki procesów w nim zachodzących.

W artykule zawarto dotychczasowe wyniki mające na celu zweryfikować metodę poprzez:

— neuronowe wyznaczanie parametrów ciśnienia i temperatury pary w 2 i 6 upuście regeneracyjnym w odpowiedzi na zadany stan obciążenia bloku;
— kontrolę dokładności neuronowej symulacji w procesie testowania sieci;

— wyznaczanie chwilowych wartości wskaźnika sprawności kadłuba średnioprężnego (SP) turbiny na podstawie parametrów wyznaczanych neuronowo oraz porównanie go ze wskaźnikiem wyznaczanym bezpośrednio z danych pomiarowych.

2. MODEL NEURONOWY

1.1. Dane eksploatacyjne

Bazą do budowy modelu są dane pomiarowe z systemu monitoringu bloku parowego ze zmodernizowaną turbiną TK200. Wyniki pomiarów w systemie są wyznaczane z częstotliwością 10 sekund i archiwizowane raz na dobę. Zestaw danych do trenowania sieci neuronowych zawierał 27 dobowych plików z okresu 3 lat eksploatacji i charakteryzował się zróżnicowaniem pór roku, konfiguracji urządzeń układu i warunków pracy.

1.2. Sztuczne sieci neuronowe (SSN)

Symulowane funkcje charakteryzowały się bardzo nieregularnym przebiegiem z wieloma punktami nieciągłości. Do tego typu celów najskuteczniejsze są jednokierunkowe SSN z sigmoidalną i liniową funkcją przejścia, uczone metodą wstecznej propagacji błędu i algorytmem Levenberg'a-Marquardt'a [1,2]. Zmiennymi w strukturze sieci były wejściowe macierze uczące (definiujące stan obciążenia bloku), liczba neuronów oraz iteracji procesu uczenia (epok treningu).

1.3. Zestawy danych uczących

Właściwością modelowania typu „czarnej skrzynki" - takim jak modelowanie neuronowe - jest to, że struktura modelu powstaje na „bazie" danych wejściowych i wyjściowych. Dlatego definiowanie aktualnego stanu pracy bloku ma decydujące znaczenie w procesie neuronowej symulacji parametrów pary w upustach.

Zestaw parametrów definiujących aktualny stan obciążenia bloku został nazwany zestawem ***parametrów niezależnych*** [3] pracy bloku. Wykorzystano go jako zbiór bazowy do poszukiwań optymalnych danych wejściowych dla sieci, Tabela 1. Odpowiedzią układu na zadany zestaw *parametrów niezależnych* jest zbiór ***parametrów zależnych*** [3] – wyników pomiarów parametrów cieplno-przepływowych pary w najważniejszych punktach obiegu. Wyznaczanie wskaźnika sprawności kadłuba turbiny SP wymaga znajomości wartości ciśnienia i temperatury w 2 i 6 upuście pary (pu2, pu6, tu2, tu6). Każda z sieci wyznacza wartość jednego parametru w danym punkcie obiegu.

Tabela 1. Parametry niezależne pracy obiektu.

Lp.	Symbol	Nazwa	Wymiar
1	M	Moc czynna generatora	MW
2	F	Masowe natężenia przepływu pary świeżej z kotła	t/h
3	P1	Ciśnienie pary świeżej	MPa
4	T1	Temperatura pary świeżej	^oC
5	T2	Temperatura pary przegrzanej	^oC
6	W1	Masowe natężenie przepływu wody wtryskiwanej do WP	t/h
7	W2	Masowe natężenie przepływu wody wtryskiwanej do SP	t/h
8	Pk	Ciśnienie w kondensatorze	kPa

1.4. Proces uczenia sieci

Ze względu na podstawowe znaczenie parametrów niezależnych w procesie uczenia sieci, sprawdzono wpływ każdego z nich na efektywność procesu uczenia. Przygotowano zestaw macierzy wejściowych, które różniły się zbiorem parametrów, Tabela 2. Dla każdego z tych zestawów przeprowadzono serię treningów i wybrano najbardziej efektywną sieć, aby następnie porównać najlepsze wyniki z wszystkich serii.

Tabela 2. Zestawy parametrów niezależnych wchodzących w skład macierzy uczących.

Lp.	Zestaw parametrów
1	M
2	M P
3	M P T1
4	M P T1 T2
5	M P T1 T2 W1
6	M P T1 T2 W1 W2
7	M P T1 T2 W1 W2 Pk
8	M P T1 T2 W1 W2 Pk F
9	F
10	F P
11	F P T1
12	F P T1 T2
13	F P T1 T2 W1
14	F P T1 T2 W1 W2
15	F P T1 T2 W1 W2 Pk
16	M P T1 W1 Pk
17	MFPk

Jednym z rezultatów procesu uczenia sieci był rozkład proporcji pomiędzy zestawem danych uczących i testujących. Aby wykazać najkorzystniejszy zestaw uczący porównywano wyniki testowania wielu sieci. Ze względu na uzyskane wyniki oraz na to, że korzystne jest aby zbiór danych testujących sieci był jak największy, wybrano zestaw jednodobowy jako wystarczający

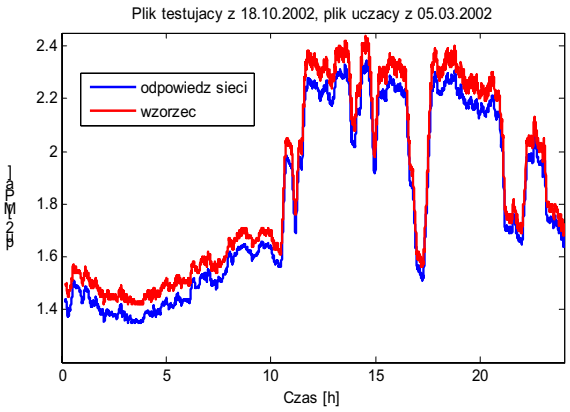
i dający dobre efekty w procesie uczenia. Sieci były trenowane na kilku charakterystycznych plikach różniących się znacznie przebiegiem obciążenia bloku. Oprócz powyższych sprawdzono także wpływ na jakość trenowania między innymi:

— Uśrednianie temperatury pary świeżej (T1) i przegrzanej (T2) w zakresie 20 minut wstecz.
— Uzupełnianie parametru mocy o wartości poprzedzające na 12 minut wstecz („historia" obciążenia)
— Numeryczne korygowanie systematycznych (statycznych) błędów odpowiedzi sieci
— Kilka typów standardowej normalizacji danych wejściowych do sieci
— Trybów pracy obiegu z włączoną i wyłączoną regeneracją wysokoprężną

1.5. Testowanie sieci

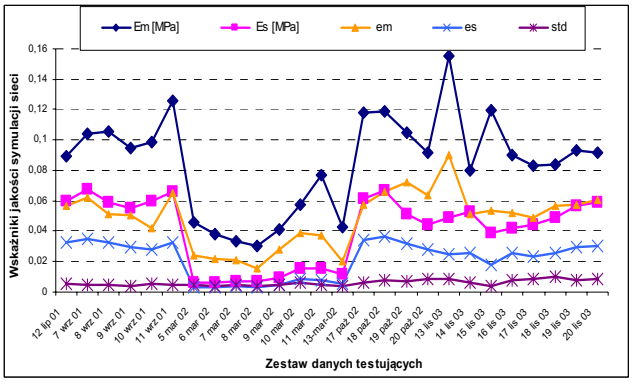
Proces testowania sieci był najważniejszym etapem pracy, ponieważ decydował o przydatności i jakości uzyskanego modelu. Z tego względu starano się, aby zestaw danych testujących był na tyle obszerny, by reprezentować rzeczywiste warunki pracy obiektu.

Zestaw danych testujących jest ponad 20-krotnie większy od zestawów uczących, można więc uznać uzyskane sieci za dobrze przetestowane i oceniać wszystkie parametry i czynniki trenowania wyłącznie na podstawie wyników testowania.



Rys. 1. Przykład wyników testowania sieci na pliku dobowym.

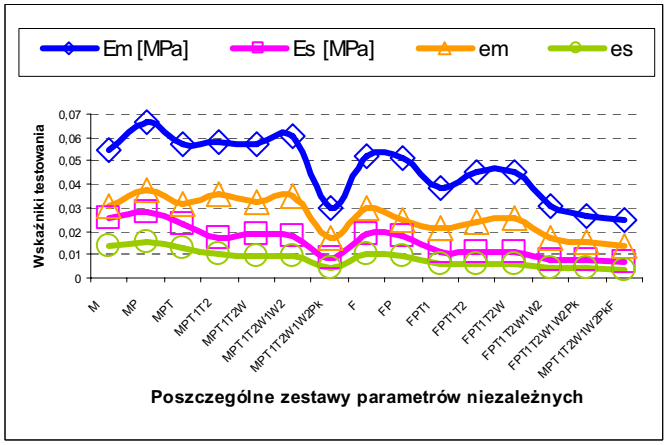
Ocena skuteczności sieci neuronowych była realizowana w kilku etapach. Pierwszym z nich było przeprowadzenie symulacji na wszystkich plikach testujących i wyznaczenie 5 wskaźników efektywności symulacji: wartości maksymalnego bezwzględnego (**Em**) i względnego (**em**) błędu, wartości średniego bezwzględnego (**Es**) i względnego (**es**) błędu oraz wartości średniego odchylenie standardowe (**std**), Rys. 1 i 2. Następnie wskaźniki z testowania danej sieci na wszystkich plikach były uśredniane i sprowadzane do jednego zbiorczego wyniku. W ten sposób można było porównywać wyniki dużej ilości sieci w poszukiwaniu najlepszych struktur.



Rys. 2. Przykład zbiorczego wyniku testowania danej sieci symulującej wartość ciśnienia. Wartości wskaźników uśrednionych po całym zestawie testującym: Em śr = 0,085127 Mpa; Es śr = 0,040839 Mpa; em śr = 0,048603; es śr = 0,021736; std śr = 0,006026.

2. WYNIKI

Podstawowym celem pracy było znalezienie struktur sieci możliwie najlepiej symulujących przebieg ciśnienia i temperatury pary w upustach regeneracyjnych. Dzięki prostemu systemowi oceny jakości sieci można było porównać wyniki około 700 struktur, co pozwoliło ocenić wpływ wielu czynników na proces symulowania neuronowego.



Rys. 3. Wyniki porównania własności najlepszych sieci symulujących ciśnienie dla danego zestawu parametrów niezależnych.

Wyniki testowania sieci symulujących chwilowe wartości ciśnienia w upustach wykazały prawidłowość: hierarchię wpływu poszczególnych parametrów na skuteczność symulacji. Podstawowe znaczenie dla sieci miały moc oraz masowe natężenie przepływu, reszta parametrów powodowała jedynie dalszą poprawę wyników, Rys. 3. Taka prawidłowość nie miała miejsca dla sieci symulujących wartość temperatury. Tutaj najlepsze wyniki dla wszystkich serii treningów były zbliżone,

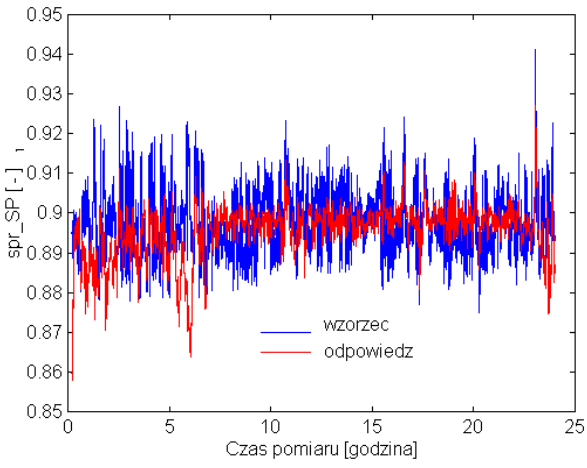
więc do symulacji temperatury wystarczyła moc lub wydatek pary świeżej.

Zastąpienie w macierzach wejściowych wartości chwilowych temperatury pary świeżej i przegrzanej wartościami uśrednianymi spowodował niewielką poprawę efektywności symulacji, zwłaszcza przy najbardziej dynamicznych zmianach obciążenia.

Uzupełnianie macierzy uczących o „historie mocy" z reguły poprawiało wyniki sieci. Jednak efekt ten dla symulacji temperatury był dużo mniejszy niż dla ciśnienia.

Wyniki wykazały, że korzystny wpływ na jakość symulacji parametru temperatury ma zastosowanie jednej ze standardowych normalizacji danych wejściowych dla sieci, a największym problemem było występowanie stałej wartości błędu mimo dobrego odtwarzania fluktuacji parametru - „przesunięcia" odpowiedzi sieci w stosunku do wartości wzorcowej o znaczną wartość. Błąd ten był tym większy im większy był odstęp czasu miedzy plikiem uczącym i testującym. Ważne jest, że wpływu na to nie miało sezonowe włączanie i wyłączanie regeneracji wysokoprężnej na obiekcie. Po prostej korekcie numerycznej jakość symulacji okazała się zadowalająca: es < 1%.

Wyniki obliczeniowego odtwarzania fluktuacji sprawności kadłuba SP turbiny 200 MW na podstawie wyliczonych neuronowo chwilowych wartości ciśnień i temperatur wykazały zbliżoną dokładność do sprawności liczonej bezpośrednio z danych pomiarowych, Rys. 5.



Rys. 4. Przykład obliczeniowego (wzorzec) i neuronowego (odpowiedź) odtwarzania fluktuacji sprawności kadłuba SP turbiny.

3. PODSUMOWANIE

Przydatność metody sztucznych sieci neuronowych do wyznaczania chwilowych referencyjnych wartości sprawności turbiny została potwierdzona uzyskanymi wynikami testowania sieci: es =~ 2% i em =~6%.

Czas pozyskiwania informacji o referencyjnych wartościach parametrów pracy obiegu jest na tyle krótki, że spełnia wymogi diagnostyki on-line.

Zaletą takiego modelu jest jego prostota i niski koszt wykonania a zarazem duża użyteczność – może funkcjonować jako dodatkowa lub wewnętrzna aplikacja wpisana w dowolny program, system monitorujący lub diagnostyczny.

LITERATURA

[1] Ślęzak-Żołna J.: *Neuronowy symulator turbinowej siłowni parowej dużej mocy*, Praca magisterska WOiO Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2004.

[2] Demuth H., Beale M.: *Neural Network Toolbox for use with Matlab*, The MathWorks, Inc., 1996 Natick.

[3] Głuch J.: *Weryfikacja wybranych współczynników eksperymentalnych procesu projektowania przepływowego turbin oparta o standardowe pomiary bloków energetycznych,* Pr. Doktorska. Wydz. Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1992.

[4] Ślęzak-Żołna J., Głuch J.: *Charakterystyki sprawnościowe on-line jako symptomy niesprawnej pracy bloków energetycznych*, Diagnostyka Procesów i Systemów, Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2007, Rozdział, str. 285-293

Mgr inż. **Justyna ŚLĘZAK-ŻOŁNA.** Asystentka w Katedrze Automatyki Okrętowej i Napędów Turbinowych Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa na Politechnice Gdańskiej; Doktorantka 4-go roku Studium Doktoranckiego: *Współczesne technologie i konwersja energii*

Dr inż. **Jerzy GŁUCH.** Adiunkt w Katedrze Automatyki Okrętowej i Napędów Turbinowych Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa na Politechnice Gdańskiej

OPTYMALIZACJA NEURONOWEGO MODELU PROGNOSTYCZNEGO

Maciej TABASZEWSKI

Politechnika Poznańska, Instytut Mechaniki Stosowanej
Ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Maciej.Tabaszewski@put.poznan.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono metodę prognozowania wartości symptomu w oparciu o optymalizowany neuronowy model prognostyczny. Heurystyczna optymalizacja modelu odbywała się dwoma metodami: w oparciu o ocenę błędu *ex post* (błąd prognozy oceniany na podstawie różnic wartości prognozowanych i pomiarów), oraz przewidywanie szerokości przedziału predykcji *ex ante* (w tym samym kroku czasowym, w którym budowana jest prognoza). Omawiane metody zastosowano dla danych pochodzących z młynów wentylatorowych. Ostatecznie najlepsze rezultaty uzyskano stosując średnią ważoną prognoz generowanych przez różne typy i struktury sieci. Wagi uzależnione były od błędów prognozy *ex post* uzyskiwanych przez daną sieć. Przy zastosowaniu wspomnianej metody udało się zapewnić średni błąd prognozy na poziomie 4,5%.

Słowa kluczowe: prognoza wartości symptomu, sieci neuronowe, przedział predykcji.

OPTIMIZATION OF NEURAL PREDICTIVE MODEL

Summary

The paper presents a method for prediction of symptom values based on an optimized neural predictive model. The heuristic model optimization was carried out by means of two methods: based on *ex post* error evaluation (the error of prediction evaluated based on the difference between the predicted and measured values), and on *ex ante* estimation of a prediction interval width (at the same time step, at which the prediction is made). The above methods were applied to measurement data obtained from fan mills. Finally, the best results were obtained when a weighted average of predictions generated by different types and topologies of networks was used. The weights were dependent on the *ex post* prediction errors obtained by the given network. With use of the method it was possible to guarantee the average error of prediction at the level of 4.5%.

Keywords: prediction of symptom values, neural networks, prediction interval.

1. WPROWADZENIE

Problem prognozowania dla potrzeb diagnostyki technicznej poruszany jest przez wielu autorów. Można tutaj wymienić choćby niektóre, przykładowe prace [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Podsumowując prace ze wspomnianego obszaru można wyróżnić kilka głównych problemów prognostycznych pojawiających się w diagnostyce technicznej:

a) prognoza stanu obiektu technicznego w zadanej przyszłości. Taka prognoza sprowadzać się będzie do odpowiedzi na pytanie, czy w zadanym horyzoncie czasowym prognozy nastąpi zmiana stanu technicznego (np. [3, 4, 5]),
b) czasu resztkowego do awarii. Prognoza określa czas (lub ogólniej miarę eksploatacyjną) dzielącą chwilę obecną, w której sporządza się prognozę, od chwili wystąpienia zmiany stanu technicznego (np. [9, 10, 11, 16]),
c) wartości symptomu, jako jednostronna ekstrapolacja miary sygnału diagnostycznego poza przedział obserwacji [13, 14, 2, 3, 26, 27]. Prognoza tego typu może nie być celem samym w sobie, natomiast może być narzędziem opracowania prognoz wymienionych w poprzednich punktach a i b,
d) następnego terminu diagnozowania – w przypadku stwierdzenia podczas diagnozowania stanu zdatności obiektu, kolejny termin jego diagnozowania ustalany jest na podstawie optymalnej prognozy [15].

Istnieje wiele modeli prognostycznych, które są wykorzystywane na potrzeby budowy prognoz w diagnostyce technicznej. Stosuje się zarówno metody adaptacyjne (np. [1, 2]), modele trendu (np. [14]), modele ARIMA (np. [3, 12]), modele oparte o teorię szarych systemów (np. [18]), sieci neuronowe lub też systemy neuronowo-rozmyte (np. [5, 17, 19]). Sieci neuronowe mogą być przydatne w przypadku bezpośredniego prognozowania resztkowego czasu do awarii (np. [9]), czy wielosymptomowej klasyfikacji stanu w przyszłości na podstawie prognozowanych wartości symptomów (np. [10]). Mają tutaj zastosowanie takie typy sieci jak: sieci RBF (ang. ang. *Radial Basis Function*),

MLP(*Multilayer Perceptron*), LVQ (ang. *Learning Vector Quantization*) czy CP (ang. *Counter Propagation*) [20, 21, 22]. W wielu przypadkach sieci neuronowe wykorzystywane są także do prognozowania samej wartości symptomu. Prognozy te mogą być wykorzystywane pośrednio do budowy prognoz stanu czy czasu resztkowego do awarii. W przypadku wspomnianego problemu zastosowanie mogą mieć między innymi sieci Elmana [23], MLP [24] czy GRNN (ang. Generalized Regression Neural Network) [23]. Uzyskiwane ostatecznie błędy prognozy mogą istotnie zależeć od rodzaju sieci, jej struktury czy nawet założonego błędu uczenia. Nawet dobrze dobrana początkowo struktura sieci może, w miarę napływu nowych danych pomiarowych, generować błędne prognozy. Bardzo istotnym problemem staje się więc optymalizacja neuronowego modelu prognostycznego i mechanizm adaptacji modelu do nowo napływających danych pomiarowych. Mechanizm powinien zapobiegać dezaktualizacji modelu prognostycznego i narastaniu błędów prognozy. Ma to szczególne znaczenie w automatycznych systemach diagnostycznych gdzie z założenia nie można liczyć na interwencję eksperta, pozwalającą przeciwdziałać temu niekorzystnemu zjawisku.

W pracy ograniczono się do modeli sieci neuronowych zastosowanych jako modele symptomowe z możliwością ekstrapolacji wartości symptomów poza przedział obserwacji. Właśnie w kontekście takich modeli zaprezentowane zostaną mechanizmy doboru struktury lub typu sieci neuronowej do aktualnych danych pomiarowych.

2. METODY OPTYMALIZACJI NEURONOWEGO MODELU PROGNOSTYCZNEGO

Jak wynika z badań autora w przypadku modelu prognostycznego w postaci sieci neuronowej można próbować dokonać powtórnego trenowania sieci w miarę napływu nowych danych co może poprawić jakość prognoz. Sam proces „dotrenowania" może odbywać się z wartościami wag z poprzedniego etapu uczenia (dla zbioru danych z poprzedniego etapu), a nie losowanymi wartościami wag jak zwykle ma to miejsce w uczeniu sieci. Przy założeniu, że nowo przychodzące dane nie wymuszają diametralnej zmiany parametrów modelu takie postępowanie znacznie przyspiesza proces uczenia sieci. Ogólnie odpowiada to generacji nowych, aktualnych oszacowań parametrów modelu prognostycznego, co w wielu przypadkach może wystarczająco dobrze sterować procesem jego adaptacji. Niekiedy jednak konieczna będzie przebudowa struktury samej sieci i dobór jej w taki sposób aby była optymalna do rozwiązania danego problemu. Modele, które nie mogą modyfikować swojej struktury muszą mieć ją ustaloną na podstawie wiedzy *a priori* przed rozpoczęciem uczenia, co jest o tyle trudne, że z góry nie wiadomo jaka jest złożoność problemu z jakim ma się do czynienia [28]. W praktyce najczęściej stosowana jest metoda prób i błędów. Znacznie jednak bardziej efektywnym rozwiązaniem może być automatyzacja budowy sieci neuronowych.

Bardzo ważnym zagadnieniem w modelowaniu symptomowych krzywych życia za pomocą sieci neuronowych jest zdolność generalizacji sieci. Sieć, która będzie zbyt dokładnie odzwierciedlać chwilowe fluktuacje symptomu i nie uogólnia trendu jego zmian, nie będzie dobrym narzędziem w przypadku prognoz długo czy średniookresowych. W ten sposób rodzi się ograniczenie co do zbytniej rozbudowy struktury sieci, która zwiększa liczbę „stopni swobody". Można powiedzieć, że struktura sieci jest nadmiarowa jeżeli dla innej mniejszej struktury można uzyskać nie gorszą wynikową sieć neuronową. Z drugiej jednak strony nadmierne zmniejszanie liczby neuronów może doprowadzić do sytuacji, w której siec nie będzie mogła osiągnąć zadanego błędu lub jeżeli błąd dopuszczalny zostanie zwiększony, otrzymamy nie najlepszą aproksymację danych pomiarowych, a co za tym idzie być może także nienajlepszą prognozę.

Modele sieci neuronowych o samo modyfikującej się strukturze (tzw. sieci ontogeniczne) muszą posiadać mechanizmy oceny niewystarczalności i nadmiarowości swojej struktury. Strukturę sieci można uznać za wystarczającą jeżeli można przeprowadzić proces trenowania sieci zakończony sukcesem (poniżej założonego błędu). Oprócz mechanizmu oceny struktury musi istnieć mechanizm jej przebudowy w celu osiągnięcia jak największego poziomu generalizacji.

Mechanizm przebudowy sieci może być oparty o ideę [28]:

- redukcji sieci,
- rozbudowy sieci,
- mieszaną powiększania i redukcji wg potrzeb,
- komitetów modeli[1].

Metody redukcji sieci mogą mieć tę wadę, że w miarę działania algorytmu struktura sieci staje się coraz prostsza. W przypadku gdy charakter napływających danych się zmieni struktura może być już zbyt uproszczona aby to uwzględnić. Może mieć to szczególne znaczenie wtedy gdy rejestrowana wartość miary sygnału diagnostycznego zależy także od parametrów sterowania i gdy zależność ta (czułość na te parametry) narasta w czasie cyklu życia obiektu.

Większość metod rozbudowy sieci odnosi się do ich zastosowania w problemie klasyfikacji, a nie aproksymacji. Algorytmy uczenia sieci z jednoczesną optymalizacją jej struktury i możliwością jej powiększania lub redukcji w zależności od potrzeb są dość skomplikowane

[1] Pojęcie komitetu modeli, które czasem funkcjonuje w literaturze, obejmuje zbiór modeli oraz reguły decyzyjne co do sposobu uzyskania wyniku w oparciu o ten zbiór

i obliczeniowochłonne. Ciekawym rozwiązaniem wydaje się zastosowanie idei komitetów modeli [28], w której rozpatrywane jest jednocześnie wiele konkurujących struktur sieci lub ich typów, a system nadrzędny decyduje o wyborze najlepszej z nich. W przypadku aproksymacji efektem działania komitetu może być ważona kombinacja wyjść uzyskiwanych z poszczególnych podmodeli. Tego typu podejście zastosowane do problemu klasyfikacji jest powszechnie znane [25]. Autor nie spotkał w dostępnej mu literaturze prac z zakresu wykorzystania tej metody dla celów optymalizacji prognozy wartości symptomu. W omawianym w tej pracy problemie ostatecznie wypracowana prognoza wartości symptomu może być uśrednioną wagowo wartością prognozy uzyskanej przez różne struktury modeli neuronowych, przy czym wagi można uzależnić od uzyskiwanego błędu *ex post*, a więc z pewnym opóźnieniem co do rzeczywistych potrzeb. W ten sposób nagradzane byłyby struktury (sieci), które w ostatnim okresie obserwacji sprawdzały się najlepiej dając najmniejsze błędy prognozy. Taki mechanizm zapobiega ciągłemu narastaniu błędu prognozy aczkolwiek nie zapobiega występowaniu jej wysokich chwilowych wartości. Skrajną możliwością jest wybór jednej prognozy w oparciu o model, który ostatnio (lub średnio w pewnym okresie) spisywał się najlepiej. Odpowiada to zastosowaniu wektora wag średniej ważonej o wszystkich wartościach zerowych, prócz elementu odpowiadającego wygrywającej metodzie. W przypadku niektórych sieci da się także dokonać oszacowania prognozy przedziałowej *ex ante.* W metodzie tej buduje się przedział predykcji względem wartości oczekiwanej zmiennej prognozowanej przy założeniu normalności błędów predykcji.

Ostatecznie zostaną tu przedstawione metody optymalizacji modelu prognostycznego opartego o zbiór konkurujących modeli sieci neuronowych przy czym funkcją kryterialną tej optymalizacji będzie błąd predykcji *ex post* lub *ex ante.*

2.1. Algorytm doboru sieci i jej struktury na podstawie błędu prognozy *ex post*

Aby określić błąd prognozy *ex post* należy znać rzeczywiste realizacje symptomów dla chwil czasowych przyszłych w stosunku do czasu, w którym budowano prognozę. Dlatego też metoda ta będzie charakteryzować się pewnym opóźnieniem w podejmowaniu decyzji o wyborze aktualnie najlepszego modelu prognostycznego. Jednak nawet działanie z pewnym opóźnieniem zabezpieczy przed ciągłym narastaniem błędu prognozy jeśli wykorzystywany do pewnej rozpatrywanej chwili model okaże się nieadekwatny. Z drugiej strony zbyt duży pośpiech w zmianie modelu wcale nie musi być dobrym rozwiązaniem. Może okazać się, że chwilowa fluktuacja wartości symptomu może skłonić do zbyt pochopnej zmiany modelu. Dodatkowo można tutaj uwzględniać wartość niepewności pomiarowej. Do sterowania algorytmem można zastosować powszechnie przyjęte miary błędu prognozy *ex post* począwszy od błędu średniokwadratowego skończywszy na współczynniku Theila. Przegląd metod ocen prognozy *ex post* można znaleźć choćby w pozycjach [29, 30, 31].

2.2. Algorytm doboru sieci i jej struktury na podstawie błędu prognozy *ex ante*

Dla modeli regresji nieliniowej można zastosować bezpośrednie oszacowanie błędu *ex ante* i odpowiednich przedziałów ufności. Jeżeli model regresji nieliniowej ma postać:

$$S_t = f(\Theta_t, c) + \varepsilon_t, \tag{1}$$

gdzie: błąd ma charakter addytywny oraz ma rozkład normalny $N(0,\sigma^2)$, Θ jest wektorem zmiennych niezależnych, c jest wektorem parametrów modelu, to wtedy przybliżony przedział ufności prognozy dla współczynnika ufności 1-α jest dany wzorem [32]:

$$\hat{S}_T \pm t_{N-p}^{\alpha/2} s\left[1 + f'(\Theta_T)\left(J'J\right)^{-1} f(\Theta_T)\right]^{\frac{1}{2}}, \tag{2}$$

gdzie: $t_{N-p}^{\alpha/2}$ wartość krytyczna rozkładu t – Studenta dla N-p stopni swobody, N- liczba obserwacji w oparciu, o które buduje się model, p- liczba parametrów modelu, oraz:

$$f(\Theta_T) = \left[\frac{\partial f(\Theta_T, c)}{\partial c_1}, \ldots, \frac{\partial f(\Theta_T, c)}{\partial c_p}\right]' \tag{3}$$

$f'(\Theta_T)$ - oznacza macierz transponowaną $f(\Theta_T)$, Θ_T - wektor zmiennej niezależnej modelu w chwili o indeksie T dla której buduje się prognozę, J' jest transponowaną macierzą J.
Macierz J ma postać:

$$J = \left[\left(\frac{\partial f(\Theta_t, c)}{\partial c_j}\right)\right], \tag{4}$$

gdzie: Θ_t stanowi wektor zmiennej niezależnej dla dostępnego zbioru danych t =1,2...N , N – ilość dostępnych obserwacji.

Natomiast s można oszacować jako:

$$s = \sqrt{\left[S - \hat{S}(\Theta, \hat{c})\right]'\left[S - \hat{S}(\Theta, \hat{c})\right]/(N-p)}, \tag{5}$$

gdzie: $\hat{S}(\Theta, \hat{c})$ - jest wektorem wartości modelowych (teoretycznych[2]) natomiast S stanowi

[2] Wyznaczonych na podstawie estymowanych parametrów modelu $\hat{c}$

wektor obserwacji. Oszacowanie elementów macierzy *J* i wektora *f* dokonuje się numerycznie za pomocą różnic skończonych.

W praktyce obliczeniowej stosuje się zamiast wzoru (2) równoważne podejście, które wykorzystuje rozkład ortogonalno-trójkątny QR. Stosowanie czynników rozkładu zamiast macierzy odwrotnej jest szybsze i ma lepsze własności numeryczne [33]. Wyrażenie 2 może zostać zastąpione przez:

$$\hat{S} \pm t_{N-p}^{\alpha/2} s \left[1 + \sum_{j=1}^{p} E_{ij}^2 \right]^{\frac{1}{2}}, i = 1,2,...n_p, \qquad (6)$$

gdzie *i* oznacza numer wektora zmiennych niezależnych, dla którego buduje się prognozę (wyznacza wartości modelowe), n_p - ilość prognoz, oraz:

$$E = F(\Theta_T)R^{-1}, \qquad (7)$$
$$J = QR$$

gdzie: Q - macierz ortogonalna powstała w wyniku rozkładu QR, *R* – macierz górna trójkątna powstała w wyniku rozkładu QR.

Ponieważ wyjście sieci neuronowej bez sprzężeń zwrotnych można przedstawić w postaci (1) można zastosować zaprezentowaną metodę do szacowania przedziału predykcji prognostycznych modeli neuronowych. Szacowanie tego przedziału dokonywane jest na etapie budowy samych prognoz, stąd można przewidywać najlepszą metodę z pośród rozpatrywanych już na tym etapie. Przykładowo można zaproponować tutaj miarę przewidywanej jakości prognozy w postaci szerokości przedziału predykcji lub względnej szerokości przedziału odniesionej do wartości oczekiwanej prognoz.

3. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA METOD

W celu zilustrowania działania metod dokonano porównania uzyskiwanego średniego błędu procentowego MAPE (ang. *Mean Absolute Percentage Error*). Wspomniany błąd definiowany jest jako:

$$MAPE = \frac{1}{h} \sum_{T=1}^{h} \left| \frac{\hat{S}_T - S_T}{S_T} \right| \cdot 100, \qquad (8)$$

gdzie: *h* – liczba prognoz w przedziale weryfikacji prognoz, $\hat{S}_T$ - prognozowana wartość symptomu, S_T - rzeczywista wartość symptomu.

Badania przeprowadzano dla danych otrzymanych z młynów wentylatorowych pracujących w jednej z elektrociepłowni w Polsce. Rozpatrywano zbiór 10 krzywych życia. Dla każdej krzywej dokonywano prognozy wielokrotnie z horyzontem 10 kroków w przód dla różnych jej odcinków. Ponieważ ostateczny wynik zależy od losowo dobranych wartości wag początkowych sieci, trenowanie i prognozowanie dla danego odcinka krzywej życia powtarzano 10-cio krotnie. Proces trenowania zakończył się sukcesem jeśli osiągnięto założony błąd uczenia. Jeżeli założony błąd uczenia nie został osiągnięty wynik prognozy nie został uwzględniany. W strukturach sieci uwzględniono jedno wejście - miarę eksploatacyjną młyna wentylatorowego, oraz wyjście w postaci wartości skutecznej prędkości drgań w paśmie od 5 Hz do 1000Hz. Wspomniane obiekty nie podlegały sterowaniu tzn. pracowały zawsze z tymi samymi parametrami roboczymi. Dostępne krzywe życia charakteryzowały się wyraźnym trendem związanym z szybkim narastaniem niewyrównoważenia wirnika powstałego w wyniku jego niejednorodnego zużycia. W przypadku oceny błędu *ex post* zastosowano sieci: Elmana, MLP oraz GRNN. Rekurencyjna sieć Elmana jest siecią ze sprzężeniem zwrotnym pomiędzy wyjściem warstwy ukrytej, a wejściem tej warstwy. Sieć taka dobrze nadaje się do aproksymacji przebiegów czasowych. Dzięki sprzężeniu zwrotnemu stan wyjść w danej chwili zależy nie tylko od aktualnego stanu wejścia ale także od jego poprzedniego stanu. Zarówno dla sieci MLP jak i sieci Elmana przyjęto jedną warstwę ukrytą jako wystarczającą dla celów aproksymacji dowolnej funkcji nieliniowej. Sieć GRNN to sieć z jedną ukrytą warstwą neuronów RBF i ze specjalną warstwą liniową na wyjściu sieci [23]. Niestety w przypadku ekstrapolacji poza przedział obserwacji istnieje istotny problem w zastosowaniu wspomnianych sieci. Dobre rezultaty można uzyskać rezygnując z bezpośredniego modelowania krzywej życia zawierającej trend (szereg niestacjonarny), zastępując go przekształceniem na szereg stacjonarny z zastosowaniem operatora różnicowego:

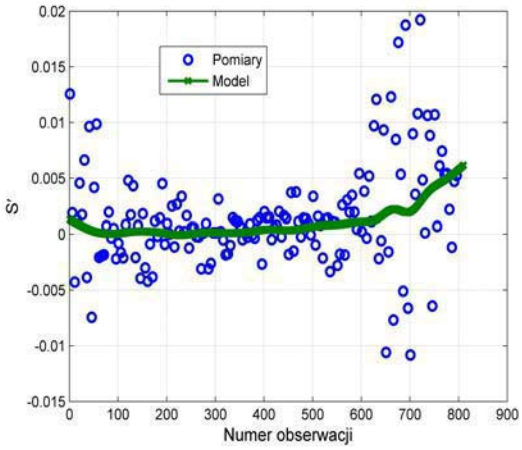
$$S_t' = S_{t+1} - S_t, \qquad (9)$$

gdzie: S_t' - wynikowy element szeregu czasowego, S_t, S_{t+1} - pierwotne realizacje szeregu czasowego, *t* = 1,2 … *N*-1.

Ważnym parametrem w tej sieci jest szerokość funkcji radialnej. W praktyce im jest ona większa tym można uzyskać bardziej wygładzony model. W celu rozróżnienia poszczególnych struktur i typów sieci przyjęto oznaczenia: E(n) – sieć Elmana z liczbą neuronów w warstwie ukrytej równą *n*, P(n) – sieć perceptronowa o *n* neuronach w warstwie ukrytej oraz G(s) – sieć GRNN zastosowana do szeregu poddanego działaniu operatora różnicowego z współczynnikiem rozszerzenia *s* bazowej funkcji radialnej. Im większa wartość parametru *s* tym neuron będzie odpowiadał większą wartością[3] dla większych odległości pomiędzy danym wektorem wejściowym, a wektorem wag.

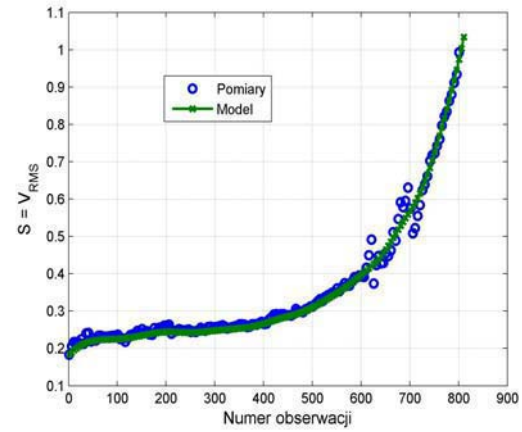
[3] Maksymalna wartość odpowiedzi takiego neuronu jest oczywiście jednością dla zerowego dystansu pomiędzy danym wektorem wejściowym, a wektorem wag.

Na rys. 1 zaprezentowano przykładową krzywą życia młyna wentylatorowego, tworzącą pierwotnie trend, poddaną działaniu operacji (9) oraz dopasowany model uzyskany dzięki zastosowaniu sieci GRNN. Można zauważyć, że poprawnie dobrany parametr *s* pozwala na wygładzenie fluktuacji w przyrostach krzywej życia.



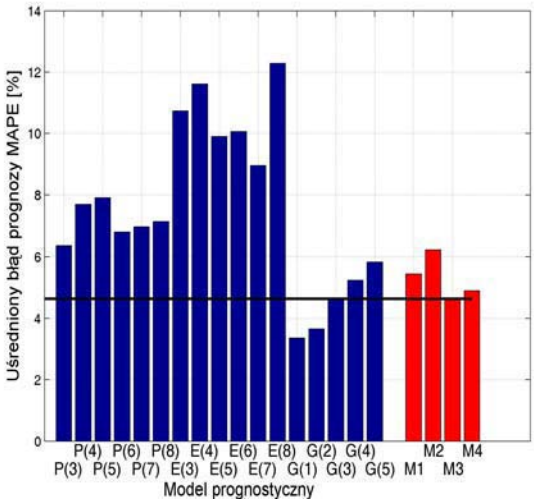
Rys. 1. Krzywa życia po poddaniu operacji określonej wzorem (9) oraz dopasowany model uzyskany dzięki zastosowaniu sieci GRNN

Z kolei na rys. 2. widoczny jest rezultat operacji odwrotnej polegającej na obliczeniu skumulowanej sumy wartości modelowych. Na omawianym rysunku przedstawiono także pierwotną krzywą życia. Jak widać za pomocą omawianej sieci można uzyskać dobrą generalizację danych wejściowych co skutkuje uchwyceniem właściwego trendu. Ekstrapolacja wspomnianego trendu stanowi prognozę wartości symptomów w przyszłości.



Rys. 2. Pierwotna krzywa życia i model z rys. 1 po wyznaczeniu odpowiedniej skumulowanej sumy wraz z prognozą krótkoterminową

Na rys. 3 zaprezentowano średni błąd prognozy MAPE związany z poszczególnymi metodami, oraz błędy uzyskane przy zastosowaniu algorytmu przeciwdziałania dezaktualizacji modelu prognostycznego opartego na ocenie *ex post* błędu MAPE. Uzyskiwany błąd prognozy w okresie poprzedzającym rozpatrywaną chwilę czasową determinował wybór modelu prognostycznego na te chwilę (metoda M1). Wyznaczone przez wybrany model prognozy stanowiły podstawę do porównań i oceny. W kolejnej metodzie decydowało średnie oszacowanie błędu prognozy z ostatnich 3 realizacji, każda z horyzontem 10 kroków (metoda M2). Metoda oznaczona jako M3 polegała na wyznaczeniu prognozy jako średniej ważonej prognoz generowanych przez wszystkie konkurujące modele. Wartości wag wyznaczane były jako odwrotność kwadratu błędów prognozy MAPE w poprzednim kroku. W ten sposób metody o dużych błędach miały najmniejsze znaczenie w kolejnej prognozie. Wreszcie metoda M4 działała analogicznie jak M3 z tym, że oszacowanie błędu prognoz uzyskano na podstawie 3 ostatnich serii prognoz. W każdym z omawianych przypadków kolejne prognozy budowano poruszając się z krokiem 10 pomiarów wzdłuż danej krzywej życia. Wspomniany błąd MAPE wyznaczano w oparciu o cały horyzont prognozy tzn. 10 kroków w przód. Aby ostatecznie ocenić metody, otrzymane oszacowania błędów uśredniane były po realizacjach (wielokrotne powtarzanie dla tego samego odcinka danej krzywej życia), oraz dokonywano uśrednień po wszystkich rozpatrywanych odcinkach krzywych życia.

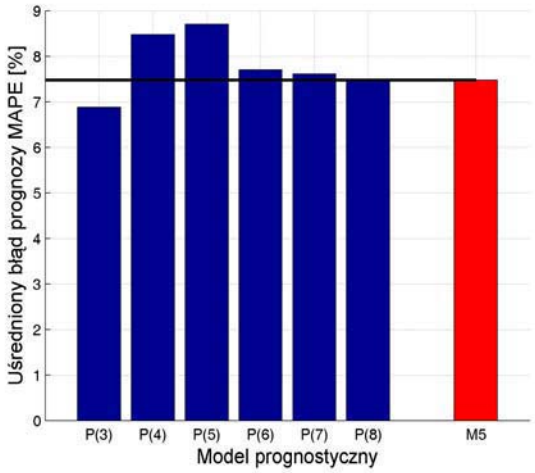


Rys. 3. Porównanie neuronowych modeli prognostycznych i metod przeciwdziałania narastaniu błędu prognozy w kategoriach błędu MAPE (metody oparte o oszacowanie błędu *ex post*)

Ogólnie można stwierdzić, że najlepsze rezultaty w kategorii błędu MAPE dla analizowanych danych uzyskuje się stosując sieć GRNN na danych poddanych operacji usuwania trendu z wykorzystaniem operatora różnicowego. Średni błąd prognozy dla przyjętego horyzontu jest mniejszy niż 4%, podczas gdy najlepsza sieć perceptronowa (MLP) osiągnęła średnio błąd ponad 6%, a najlepsza sieć Elmana rzędu 9%.

Należy zwrócić uwagę, że decydując się na określoną strukturę sieci nie mamy pewności czy sprawdzi się ona w przypadku określonych danych.

Przykładowo decydując się na sieć GRNN można było otrzymać także błąd średni rzędu 6%. Niestety kiedy uruchamiamy system diagnostyczny, trudno przewidzieć jaki model sprawdzi się najlepiej. Ma to szczególne znaczenie w automatycznych systemach diagnostycznych, które powinny być tak zaprojektowane aby nie wymagały wiedzy eksperta na etapie posługiwania się określonymi metodami. Warto więc zastosować mechanizm zabezpieczający przed stosowaniem modelu, który nie sprawdzi się w danych warunkach. Zastosowane metody doboru modelu prognostycznego pozwala na wprowadzenie takiego zabezpieczenia. Najlepiej sprawdziła się tutaj metoda ważonej prognozy (M3). Co prawda średni błąd jest na poziomie 4,5% ale metoda zabezpiecza nas przed złym doborem typu sieci i jej struktury co w najgorszym przypadku rozpatrywanego przykładu skutkowałoby błędem ponad 12%. Z porównania metod wynika także, że metoda uzgadniania prognoz poprzez zastosowanie średniej ważonej i wag statystycznych (metody M3 i M4) daje lepsze rezultaty niż poleganie na jednym modelu, który ostatnio spisywał się najlepiej (M1 i M2). Rysunek 4 przedstawia porównanie wyników uzyskanych za pomocą różnych struktur sieci neuronowych typu MLP oraz za pomocą metody oceny szerokości przedziału predykcji przy założeniu wiarygodności predykcji na poziomie 95% i wyliczonego za pomocą wzorów 5 i 6.



Rys. 4. Porównanie neuronowych modeli prognostycznych i metody przeciwdziałania narastaniu błędu prognozy z wykorzystaniem oszacowania przedziału predykcji

W omawianym algorytmie system wybierał model neuronowy, który charakteryzował się najmniejszą przewidywaną szerokością przedziału predykcji. Oczywiście szacowanie przedziału predykcji odbywało się na podstawie aktualnie dostępnych danych stąd jest to tylko przewidywanie, że rzeczywista zmienna prognozowana znajdzie się we wspomnianym przedziale. W prezentowanym porównaniu wybór odbywał się tylko z grupy sieci MLP gdyż tylko dla tych modeli daje się łatwo zaimplementować opisywaną w punkcie 2.2 metodę. Z rysunku 4 wynika, że dzięki wprowadzeniu metody doboru modelu poprzez szacowanie przedziału prognozy predykcji (M5) dla rozpatrywanych danych uzyskano błąd prognozy na poziomie 7,5% zabezpieczając się przed nadmiernym jego wzrostem w wyniku złego doboru modelu prognostycznego. Jest to gorszy wynik niż uzyskany w metodzie M3 ale należy pamiętać, że omawiana metoda mogła dokonywać wyboru z ograniczonego zbioru modeli. Dla porównania skuteczności metod przeciwdziałania dezaktualizacji, można zaproponować miarę wyrażoną jako względną różnicę pomiędzy uśrednionym błędem MAPE uzyskanym dzięki zastosowaniu określonej metody, a rezultatem uzyskanym dzięki zastosowaniu najlepszego z modeli sieci z rozpatrywanego zbioru. W przypadku M3 jest to ok. 34% , a dla metody M5 ok. 9%. Wynika stąd, że w świetle takiego kryterium metoda M5 jest skuteczniejsza i lepiej wykorzystuje zasób dostępnych modeli. Z drugiej jednak strony ograniczone możliwości jej zastosowania nie pozwalają na osiągnięcie błędów prognozy mniejszych niż 5% jak ma to miejsce w przypadku metody M3.

4. PODSUMOWANIE

Dzięki zastosowaniu proponowanych metod optymalizowanego doboru neuronowego modelu prognostycznego można zabezpieczyć się przed nadmiernym wzrostem błędu prognozy. Aby opisane metody były skuteczne konieczny jest dość szeroki zbiór konkurujących modeli. W przypadku analizowanych danych najlepiej spisywały się sieci GRNN z warstwą neuronów radialnych. W celu zastosowania takiej sieci konieczna była operacja obliczania przyrostów wartości symptomów, dopasowanie modelu i dokonanie prognozy, a następnie obliczenie skumulowanego szeregu czasowego na podstawie otrzymanego modelu. Najlepszą metodą optymalizacji modelu prognostycznego w kategoriach minimalnego błędu prognozy MAPE okazała się metoda prognoz oparta o średnią ważoną ze wszystkich rozpatrywanych modeli. Wagi wspomnianej średniej były odwrotnościami kwadratów błędu MAPE uzyskanego przez daną metodę w kroku poprzednim w stosunku do chwili, w której buduje się prognozę. Choć metoda ta działa z opóźnieniem (1 kroku czasowego) to jednak wystarczająco zabezpiecza przed narastaniem błędu prognozy. Przy zastosowaniu wspomnianej metody udało się zapewnić średni błąd prognozy na poziomie 4,5%. W omawianych badaniach zastosowano także średnią z trzech ostatnich kroków co jednak pogorszyło osiągane wyniki. Wydłużanie wspomnianego opóźnienia może więc pogorszyć sytuację. Zastosowanie metody śledzenia szerokości przedziału predykcji daje także obiecujące rezultaty. Niestety nie można tej metody łatwo zastosować

w przypadku sieci Elmana (ze sprzężeniem zwrotnym) oraz sieci GRNN stąd zbiór rozpatrywanych modeli uległ zawężeniu.

LITERATURA

[1] Cempel C., Bossak J., Żółtowski B.: *Proste metody prognozowania stanu maszyn*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, Zeszyt 3 (79), 1989.

[2] Batko W.: *Metody syntezy diagnoz predykcyjnych w diagnostyce technicznej,* Rozprawa habilitacyjna, AGH, Kraków 1984

[3] Kaźmierczak J.: *Zastosowanie liniowych modeli procesów losowych do prognozowania w diagnostyce maszyn*, Rozprawa habilitacyjna, Politechnika Śląska, Gliwice 1989.

[4] Baranow S., Kurawski L.: *Acoustic Vibrations – modeling, optimisation and diagnostics*, Russian Aviation Company, Moskwa 2006, r. 3 i 4.

[5] Wang Q., i inni: *Prognosis of machine health condition using neuro-fuzzy systems,* Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 18 (2004), 813-831.

[6] Pusey H. C., Roemer: *An assessment of turbomachinery condition monitoring and failure prognosis technology*, The Shock and Vibration Digest 31 (1991) 365-371.

[7] Y. Li, S. Billington, C. Zhang, T. Kurfess, S. Danyluk, and S. Liang: *Adaptive Prognostics for Rolling Element Bearing Condition,* Mechanical Systems and Signal Processing 13 (1999) 103-113,

[8] Roemer M. J., Kacprzynski G. J.,. Nwadiogbu E. O, and Bloor G.: *Development of diagnostic and prognostic technologies for aerospace health management applications*, Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, Montana, USA, 2001, 3139-3147.

[9] Tabaszewski M.: *Prognozowanie resztkowej miary eksploatacji młyna wentylatorowego z wykorzystaniem sieci neuronowych,* Diagnostyka , vol. 3/(39), Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Warszawa 2006, str. 149-154.

[10] Tabaszewski M.: *Diagnostyka, Wielosympto-mowa prognoza stanu i czasu do awarii z wykorzystaniem sieci neuronowych*, Diagnostyka, vol 2/(42), Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Warszawa 2007, str. 43-48.

[11] Morel J.: *Drgania maszyn i diagnostyka ich stanu technicznego*, tłum z franc. pod redakcją C. Cempla i Z. Orłowskiego, Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Warszawa 1994, str. 258.

[12] Baillie D. C., Mathew J.: *A comparison of autoregressive modeling techniques for fault diagnosis of rolling element bearings*. Mechanical Systems and Signal Processing, 1996, 10 (1), pp.1-17.

[13] Cholewa W., Kaźmierczak J.: *Diagnostyka techniczna maszyn. Przetwarzanie cech sygnałów,* Skrypt uczelniany Politechniki Śląskiej, Gliwice 1992, str 171.

[14] Cempel C.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*, PWN, Warszawa 1989, r. 4 i 5.

[15] Tylicki H.: *Optymalizacja procesu prognozowania stanu technicznego pojazdów mechanicznych*, Rozprawa habilitacyjna, ATR Bydgoszcz 1998.

[16] Gebraeel N., Lawley M., Liu R., and Parmeshwaran V.: *Residual life predictions from vibration-based degradation signals: a neural network approach*, IEEE Transactions on Industrial Electronics 51 (2004) 694- 700.

[17] Wang P. and Vachtsevanos G.: *Fault prognostics using dynamic wavelet neural networks*, Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing 15 (2001) 349-365.

[18] Cempel C., Tabaszewski M.: *Zastosowanie teorii szarych systemów do modelowania i prognozowania w diagnostyce maszyn*, Diagnostyka, vol 2/(42), Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Warszawa 2007, str. 11-18.

[19] Huang R., Xi L.,. Li X, Richard Liu C., Qiu H., and Lee J.: *Residual life predictions for ball bearings based on self-organizing map and back propagation neural network methods*, Mechanical Systems and Signal Processing 21 (2007) 193-207.

[20] Kohenen T.: *Self-Organizing Maps*. Thrid Edition. Springer 2001, r.6.

[21] Markowska-Kaczmar U., Kwaśnicka H.: *Sieci neuronowe w zastosowaniach*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005, str. 34.

[22] Osowski S.: *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000, r. 5.

[23] Demuth H, Beale M.: *Neural Network Toolbox*. For Use with MATLAB, User's Guide ver. 4, The MathWorks, 2001

[24] Lee J. H.: *Application of Neural Networks to Flank Wear Prediction*, Mechanical Systems and Signal Processing, (1996), 10(3), pp. 265-276

[25] Korbicz J., Kościelny J., M., Kowalczuk Z., Cholewa W., red.: *Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania*. WNT, Warszawa 2002, str. 335

[26] Cempel C., Tabaszewski M., Wojsznis J.: *Models for Condition Recognition and Forecasting*, Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, Proceedings of COMADEM 96, University of Sheffield, Sheffield 16-18 July 1996, str. 187-196.

[27] Cempel C.: *Pre-Breakdown Symptom Value for Vibration Condition Monitoring*, Bulletin of

The Polish Academy of Sciences, Technical Sciences Vol. 37, No 7-12, 1989.
[28] Jankowski N.: *Ontogeniczne sieci neuronowe*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2003, r.4 i 5.
[29] Cieślak M., i inni: *Prognozowanie gospodarcze*. PWN Warszawa 2002
[30] Zeliaś A.: *Prognozowanie ekonomiczne*, PWN, Warszawa 2003
[31] Załuska U.: *Błędy prognoz ex-post – wskazówki aplikacyjne*,. Prace Naukowe Akademii Ekonomicznej we Wrocławiu, nr 838, seria: Materiały konferencyjne
[32] Seber, G. A. F, and Wild, C. J.: *Nonlinear Regression*, Wiley, 2003, s. 193.
[33] Dryja M., Jankowscy J. M.: *Przegląd metod i algorytmów numerycznych*, cz. II, WNT Warszawa 1982, r. 6.7.

Dr inż. **Maciej TABASZEWSKI** jest adiunktem w Instytucie Mechaniki Stosowanej Politechniki Poznańskiej. Jego zainteresowania dotyczą metod prognozowania wartości symptomów, stanu maszyn oraz czasu resztkowego do awarii, a także wykorzystania metod sztucznej inteligencji w procesie prognozowania, modelowania miar sygnałów diagnostycznych
i pomiarów wielkości mechanicznych. Zajmuje się także programowaniem obiektowym dla potrzeb realizacji narzędzi cyfrowej analizy sygnałów i metod eksploracji danych.

PODEJŚCIE WIELOASPEKTOWE DO MODELOWANIA W DIAGNOSTYCE TECHNICZNEJ

Damian SKUPNIK

Politechnika Śląska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn
ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice
e-mail: Damian.Skupnik@polsl.pl

Streszczenie

W referacie przedstawiono podejście wieloaspektowe do modelowania w diagnostyce technicznej. Pojęcie „aspekt" rozumiane jest najczęściej jako punkt widzenia, z którego dany obiekt, zjawisko itp. są rozpatrywane, a zatem w odniesieniu do diagnostyki technicznej aspekt może być traktowany jako „widok" obiektu technicznego z określonego punktu widzenia. W literaturze diagnostycznej koncepcja zastosowania wieloaspektowego modelu diagnostycznego, w celu określenia stanu technicznego danego obiektu, jest znana. Jednak jak do tej pory nie zaproponowano metody identyfikacji relewantnych aspektów oraz sposobu ich reprezentacji. Niniejszy referat przedstawia rozwiązanie wspomnianych problemów, w odniesieniu do określonej klasy obiektów technicznych, za pomocą ujednoliconego języka modelowania (ang. *Unified Modelling Language*, UML).

Słowa kluczowe: diagnostyka techniczna, model diagnostyczny, aspekt, model wieloaspektowy, UML.

A MULTIASPECT APPROACH TO THE MODELLING IN TECHNICAL DIAGNOSTICS

Summary

The paper presents a multiaspect approach to the modelling in technical diagnostics. The term "an aspect" is most often understood as a point of view which a thing, a phenomenon etc. are considered. Thus in relation to the technical diagnostics, an aspect may be understood as "a view" of a technical object from a definite viewpoint. In diagnostic literature a possibility of the use of a multiaspect diagnostic model in order to determine a technical state of a considered object is known. However so far, there is not any description in what way identification of aspects and their representation should be done. Possible solution of these problems, in relation to the specific kind of technical objects, was shown in the paper. It consists in application of the Unified Modelling Language (UML).

Keywords: technical diagnostics, diagnostic model, aspect, multiaspect model, UML.

1. WPROWADZENIE

W wielu nowoczesnych obiektach technicznych można wyodrębnić kilka układów, z których każdy ma inną naturę fizyczną np.: mechaniczny, elektryczny, hydrauliczny, pneumatyczny itp. Zazwyczaj jeden z nich pełni rolę dominującą, co wynika z istoty działania obiektu.

Dla tego rodzaju obiektów technicznych opracowanie pojedynczego (globalnego) modelu diagnostycznego jest zazwyczaj zadaniem bardzo trudnym lub wręcz niemożliwym do zrealizowania. Na podstawie opublikowanych wyników wielu badań, np. [1], można stwierdzić, że w takim wypadku lepsze rezultaty uzyskuje się stosując zbiór modeli lokalnych. Wówczas, w celu rozpoznania stanu technicznego danego obiektu, należy wziąć pod uwagę informacje pochodzące ze wszystkich aktywnych modeli lokalnych. Jest to więc realizacja idei tzw. wielomodelu, którego skuteczność działania w dziedzinie diagnostyki technicznej została dowiedziona w [2].

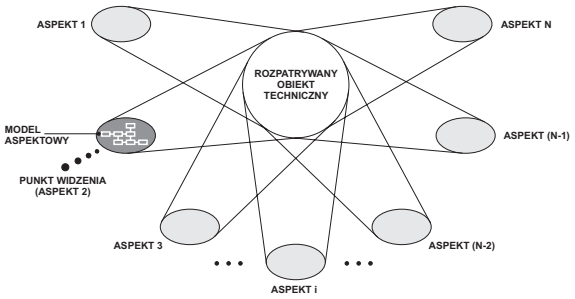
Problemem jest jednak sformułowanie metody wyodrębniania modeli lokalnych. Pomocne okazuje się tutaj podejście stanowiące analogię do określania postaci geometrycznej danego elementu. Zazwyczaj jednoznaczna identyfikacja dokonywana jest po obejrzeniu tego elementu z różnych stron, przy czym pewne części elementu widziane z jednego punktu widzenia determinują w jakimś stopniu to, co można zaobserwować po przyjęciu innego punktu widzenia.

Wobec powyższego można przyjąć, że diagnostyczne modele lokalne powinny odpowiadać „widokom" obiektu technicznego z różnych punktów widzenia.

2. ASPEKT JAKO „WIDOK" OBIEKTU TECHNICZNEGO

Pojecie „aspekt" najczęściej rozumiane jest jako punkt widzenia, z którego rozpatruje się jakąś rzecz

lub zjawisko. Wynika z tego, że podejście wieloaspektowe do modelowania w diagnostyce technicznej sprowadza się do przyjęcia, co najmniej dwóch różnych punktów widzenia na dany obiekt. Obrazuje to rys. 1.



Rys. 1. Podejście wieloaspektowe do modelowania w diagnostyce technicznej

Przyglądając się rys. 1 można stwierdzić, że aspekt może być traktowany jako „widok" obiektu. Ponadto można zauważyć, że każdemu aspektowi odpowiada jeden model aspektowy, tzn. model lokalny. Zatem identyfikacja i reprezentacja relewantnych aspektów powinna umożliwić rozwiązanie wspomnianego wcześniej problemu wyodrębniania modeli lokalnych.

3. IDENTYFIKACJA I REPREZENTACJA ASPEKTÓW

Na podstawie przeprowadzonych badań literaturowych stwierdzono, że zarówno do identyfikacji jak i reprezentacji aspektów użytecznym narzędziem powinien okazać się ujednolicony język modelowania (ang. *Unified Modelling Language*, UML).

3.1. UML

UML to język formalny przeznaczony przede wszystkim do tworzenia modeli zorientowanych obiektowo systemów informatycznych. Pozwala on, za pomocą ściśle określonej notacji (zestawu diagramów), przedstawić tworzony system z różnych punktów widzenia, czyli umożliwia rozpatrywanie różnych aspektów [3].

W wersji UML 2.0 wyróżniono trzynaście diagramów [3]. Sześć z nich przeznaczonych jest do opisu struktury. Są to: diagram klas (DKL), diagram obiektów (DO), diagram pakietów (DP), diagram komponentów (DKP), diagram rozlokowania (DR), diagram struktur połączonych (DSP). Pozostałe pozwalają opisać dynamikę (działanie) systemu. Są to: diagram przypadków użycia (DPU), diagram maszyny stanowej (DMS), diagram czynności (DC), diagram sekwencji (DS), diagram komunikacji (DKM), diagram harmonogramowania (DH), diagram sterowania interakcją (DSI).

Z punktu widzenia diagnostyki technicznej diagramy należące do drugiej z wymienionych grup są szczególnie interesujące.

3.2. Identyfikacja aspektów

Rozpatrywane w UML aspekty, reprezentowane w postaci odpowiednich diagramów, mogą stanowić podstawę do identyfikacji aspektów istotnych z punktu widzenia diagnostyki technicznej. Wyodrębniono następujące „widoki", na podstawie których można określać stan techniczny danego obiektu:

- *aspekt struktury obiektu* (AS) – opisuje budowę obiektu;
- *aspekt stanów funkcjonalnych obiektu* (ASF) – opisuje stan funkcjonalny obiektu w danej chwili czasu, np. rozruch, hamowanie itp.;
- *aspekt działania elementów obiektu* (ADE) – opisuje czynności wykonywane przez elementy obiektu, np. otwarcie kanału przez zawór, ogrzewanie cieczy przez grzałkę itp.;
- *aspekt oddziaływań zewnętrznych* (AOZ) – opisuje od jakich czynników zewnętrznych uzależnione jest działanie obiektu, np. energia elektryczna, sieć wodociągowa itp.;
- *aspekt historii obiektu* (AH) – opisuje historię obiektu, która dotyczy jego wcześniejszych stanów technicznych, przeprowadzonych remontów itp.;
- *aspekt harmonogramu działania obiektu* (AHD) – opisuje działanie obiektu w dziedzinie czasu (uwzględnianie tego aspektu jest szczególnie uzasadnione w odniesieniu do obiektów sterowanych programowo).

3.3. Reprezentacja zidentyfikowanych aspektów

Zidentyfikowane punkty widzenia (aspekty) można reprezentować za pomocą odpowiednich diagramów UML (tab. 1). Warto zauważyć, że część wiedzy o obiekcie, reprezentowana na jednym z diagramów, reprezentowana jest również, ale w innej postaci, na innych diagramach, co wynika z faktu występowania sprzężeń pomiędzy wyróżnionymi aspektami.

Tab. 1. Diagramy umożliwiające reprezentację zidentyfikowanych aspektów

Diagram / Aspekt	DKL	DO	DP	DMS	DC	DKM	DS	DH
AS	X	X	X					
ASF				X				
ADE					X	X	X	
AOZ						X	X	
AH						X	X	
AHD								X

4. WYMAGANIA STAWIANE OBIEKTOWI TECHNICZNEMU

Jak wspomniano wcześniej (punkt 3.1) UML przeznaczony jest przede wszystkim do modelowania złożonych systemów informatycznych, zatem idealnym do modelowania w tym języku obiektem technicznym wydaje się być

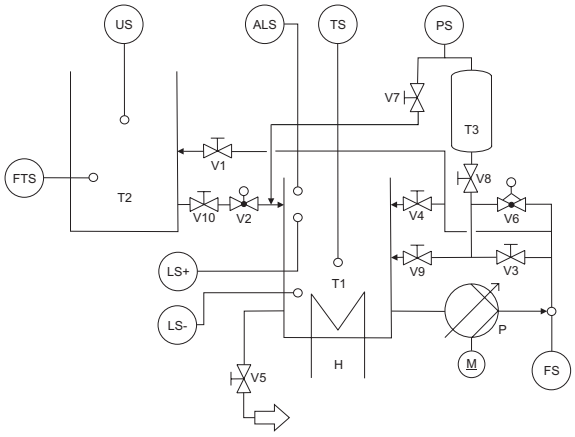
obiekt sterowany programowo (np. obrabiarka CNC, roboty przemysłowe, pralka automatyczna itp.). Dla takiego obiektu powinno być możliwe:

- stwierdzenie, czy realizuje on wymagane zadanie(a), a więc czy spełnia potrzebę, dla której został utworzony;
- wyodrębnienie w nim elementów (zespołów) o znanych wartościach parametrów i odpowiedzialnych za realizację określonych zadań, mających różną naturę fizyczną;
- naturalne rozgraniczenie stanów funkcjonalnych oraz jednoznaczne zidentyfikowanie elementu (zespołu) odpowiedzialnego za przejście pomiędzy tymi stanami;
- wyodrębnienie oraz obserwacja czynności realizowanych przez dany element (zespół);
- zidentyfikowanie czynników zewnętrznych wpływających istotnie na stan funkcjonalny obiektu, np. cykliczne dostawy jakiegoś czynnika zewnętrznego;
- określenie „historii" obiektu, szczególnie wtedy, gdy nie można prowadzić na nim czynnych eksperymentów diagnostycznych.

Działanie obiektu, który spełnia powyższe wymagania ma zazwyczaj charakter dyskretny i ściśle określony. W związku z tym możliwa jest obserwacja kolejnych etapów tego działania (tzn. stanów funkcjonalnych).

5. PRZYKŁAD

Przykład ilustrujący podejście wieloaspektowe do modelowania w diagnostyce technicznej dotyczy obiektu, którego budowę w sposób schematyczny przedstawiono na rys. 2.

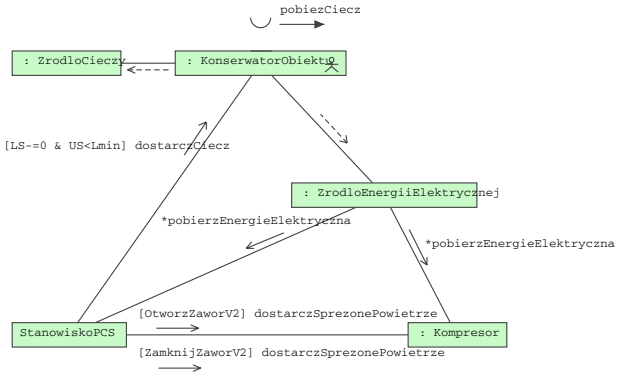


Rys. 2. Schemat rozpatrywanego obiektu technicznego

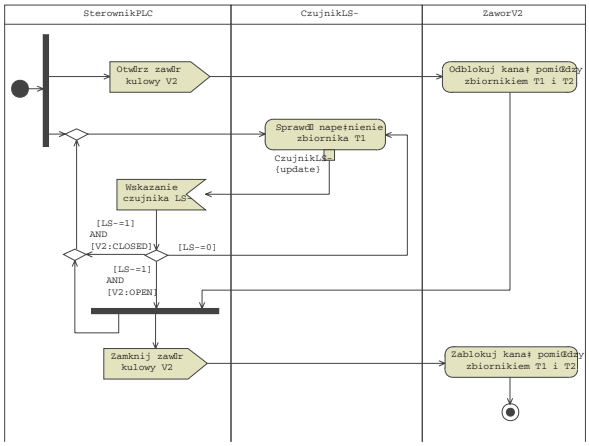
gdzie: ALS – przełącznik pływakowy poziomu alarmowego; FS – czujnik natężenia przepływu cieczy; FTS – przełącznik pływakowy; H – grzałka; LS- - czujnik zbliżeniowy dolny; LS+ – czujnik zbliżeniowy górny; M – silnik; P – pompa odśrodkowa; PS – czujnik ciśnienia; T1, T2 – odpowiednio zbiornik dolny i górny; T3 – zbiornik ciśnieniowy; TS – czujnik temperatury; US – ultradźwiękowy czujnik poziomu cieczy; V2 – zawór kulowy; V6 – zawór proporcjonalny; Vi (i=1, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10) – zawory ręczne.

Rozpatrywany jest stan funkcjonalny obiektu, który polega na pobraniu do zbiornika T1 ze zbiornika T2 minimalnej ilości cieczy, koniecznej do uruchomienia dolnego czujnika zbliżeniowego LS-.

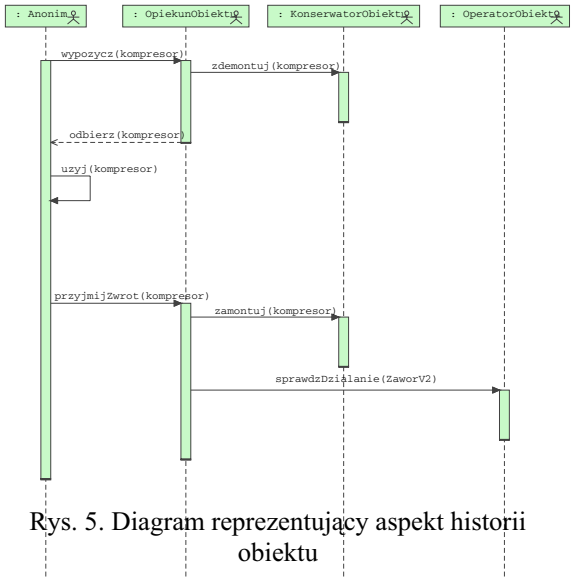
Rys. od 3 do 5 przedstawiają przykładowe „widoki" danego obiektu wybrane spośród zidentyfikowanych w punkcie 3.2 wszystkich aspektów.



Rys. 3. Diagram reprezentujący aspekt oddziaływań zewnętrznych



Rys. 4. Diagram reprezentujący aspekt działania elementów obiektu



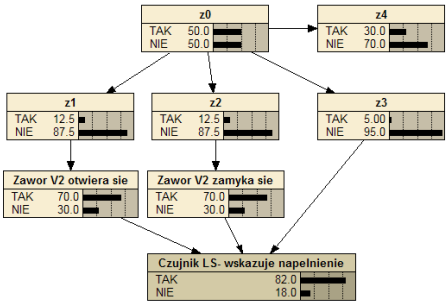
Rys. 5. Diagram reprezentujący aspekt historii obiektu

Na podstawie informacji zawartych na odpowiednich diagramach oraz po określeniu zbioru rozpatrywanych stanów technicznych (tab. 2), możliwe jest opracowanie diagnostycznych modeli lokalnych, które dotyczą analizowanych „widoków" obiektu.

Tab. 2. Zbiór rozpatrywanych stanów technicznych obiektu dla rozważanego stanu funkcjonalnego

KOD	STAN
z0	stan dopuszczalny
z1	zawór kulowy V2 zamknięty i zablokowany
z2	zawór kulowy V2 otwarty i zablokowany
z3	czujnik LS- nie działa
z4	kanał pomiędzy zbiorn. T1 i T2 przytkany

Przykład takiego modelu, reprezentowanego w postaci sieci przekonań, został przedstawiony na rys. 6.



Rys. 6. Lokalny model diagnostyczny reprezentujący aspekt działania elementów obiektu

6. WNIOSKI

Opracowanie modelu diagnostycznego w oparciu o model UML jest możliwe wtedy, gdy możliwe jest porównanie cech bieżącego procesu realizowanego przez rozpatrywany obiekt, z cechami opisującymi realizację tego procesu wtedy, gdy dany obiekt znajduje się w stanie technicznym dopuszczalnym. Warunek ten jest spełniony dla coraz powszechniej stosowanych obiektów, które działają w sposób automatyczny. W tym wypadku proponowana metoda powinna stanowić alternatywę lub uzupełnienie dla metod odnoszących się do analizy procesów resztkowych (np. drgania, hałas, temperatura itp.).

LITERATURA

[1] *Diagnostyka techniczna. Metody odwracania nieliniowych modeli obiektów.* Red. Cholewa W., Kiciński J., Zeszyt Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn nr 120, Gliwice, 2001.
[2] Wojtusik J.: *Wielomodele diagnostyczne maszyn wirnikowych*. Zeszyt Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn nr 128, Gliwice, 2006.
[3] Wrycza S., Marcinkowski B., Wyrzykowski K.: *Język UML 2.0 w modelowaniu systemów informatycznych*. HELION, Gliwice, 2005.

Mgr inż. **Damian SKUPNIK** ukończył z wyróżnieniem w 2003r. studia na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej. Jest uczestnikiem studiów doktoranckich w Politechnice Śląskiej. Zajmuje się głównie zagadnieniami dotyczącymi stosowania metod sztucznej inteligencji w diagnostyce technicznej.

DIAGNOZOWANIE UKŁADÓW TOROWYCH GÓREK ROZRZĄDOWYCH

Stanisław Janusz CIEŚLAKOWSKI

Instytut Systemów Transportowych, Politechnika Radomska
Wydział Transportu, ul. Malczewskiego 20A, 26-600 Radom
fax: (048) 361 77 24, email: janek26612@wp.pl

Streszczenie

Górki rozrządowe służą do wykonywania manewrów na stacjach rozrządowych i manewrowych.

Profil górki rozrządowej składa się z następujących elementów: strefy przejściowej zlokalizowanej za przeciwspadkiem górki, pierwszego pochylenia rozpędowego służącego do wytworzenia odstępów między wagonami o różnych wartościach ruchowych podczas przejeżdżania przez pierwszy rozjazd podziałowy, drugiego nachylenia pośredniego, na końcu którego lokalizuje się pierwszą strefę hamulców, trzeciego pochylenia, na którym leżą rozjazdy kolejowe, czwartego pochylenia, na początku torów kierunkowych, z drugą pozycją hamowania.

Długość strefy podziałowej jest jednym z głównych parametrów układu torowego górki rozrządowej. U wielu projektantów występują tendencje do niepotrzebnego wydłużania strefy podziałowej górki rozrządowej. Wpływa to negatywnie na bezpieczeństwo staczanych wagonów towarowych.

Należało więc opracować metodę, która na podstawie długości strefy podziałowej mogłaby zdiagnozować poprawność układu torowego górki rozrządowej.

Podstawą metody są obliczenia analityczne technologicznie niezbędnych: długości i kata nachylenia drogi zwrotnicowej oraz bezpiecznej prędkości wjazdu wagonu ciężkobieżnego nie hamowanego na drugą pozycję hamowania.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo, górka rozrządowa, wagon.

DIAGNOSTICS OF TRACK SYSTEMS OF THE HUMPS IN A GRAVITY YARDS

Summary

Humps serve manoeuvering purposes at marshalling and manoeuvering yards.

Profile of a hump consists of the following elements: transition zone down of the hump's counterslope, first acceleration slope to create distances between carriages of varying motion values in passage through the first division turnout; second intermediate slope ending with the first brake zone; third slope with rail turnout on it; fourth slope in the initial section of direction tracks with the second braking position.

Length of the division zone is one of the main parameters of the hump track system.

A number of designers tend to unnecessarily extend the hump's division zone. This adversely affects safety of rolling goods wagons.

A method needed to be developed, therefore, to diagnose correctness of the hump track system depending on the length of the division zone.

The method relies on analytical calculations of: length and gradient of switch path and safe initial speed of an unbraked heavy carriage entering the second braking position, which are necessary for engineering purposes.

Keywods: safety, hump in gravity yard, wagon.

1. WSTĘP

Stacje rozrządowe i manewrowe są to takie stacje, które rozrządzają i zestawiają składy pociągów towarowych. Dla wykonywania pracy manewrowej stacje rozrządowe i manewrowe muszą posiadać odpowiednie wyposażenie, obejmujące przede wszystkim dostateczną liczbę torów oraz określoną liczbę i jakość urządzeń manewrowych (górki rozrządowe, tory wyciągowe, drogi zwrotnicowe, lokomotywy manewrowe) [2].

Górki rozrządowe to główne obiekty tych stacji, decydujące o bezpieczeństwie wagonów kolejowych.

W pracy opracowano metodę diagnozowania układów torowych górek rozrządowych na podstawie ich długości strefy podziałowej.

2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

W celu skrócenia strefy rozgałęźnej obecnie często projektuje się górki rozrządowe z jednym torem na ich wierzchołku.

Zagadnieniem oceny i optymalizacji ukształtowania strefy rozgałęźnej górek rozrządowych zajmował się G. Potthoff [4]. Nie uwzględniał on jednak w swoich opracowaniach górek rozrządowych wyposażonych w drogi technologiczne, które są obecnie projektowane.

Gajda w pracy [2] podaje wzór Leibbrandta na długość strefy poddziałowej górki rozrządowej, określony na podstawie zależności geometrycznych. Również i w tym przypadku górki rozrządowe nie są wyposażone w niezbędne drogi technologiczne.

Z wytycznych projektowania stacji kolejowych [7] wynika, że układ torów i rozjazdów w strefie rozdzielczej torów kierunkowych wchodzącej w skład górki rozrządowej należy projektować przy zastosowaniu wiązek ośmiotorowych, rozjazdów o dużych skosach w granicach od 1:4,8 do 1:9, przy zastosowaniu możliwie małych promieni łuków torowych, lecz nie mniejszych niż 150 m.

W pracy [5] Sutarzewicz pisze, że najlepsze wyniki, przy projektowaniu górek rozrządowych, osiąga się, układając jako pierwszy rozjazd strefy podziałowej rozjazd symetryczny S49-215-1:48.

W pracy [7] można przeczytać, że długość górki rozrządowej oraz szczegółowe wielkości pochyleń i ich długości należy ustalać w oparciu o obliczenia kinetyczne górki rozrządowej.

Nie podano jednak metody obliczania długości strefy podziałowej, która mogłaby posłużyć do diagnozowania układów torowych górek rozrządowych.

Należy więc opracować metodę M pozwalającą obliczyć długość strefy podziałowej L na podstawie zależności geometrycznych ZG i obliczeń kinematycznych OK:

$$M : (ZG, OK) \rightarrow L \qquad (1)$$

3. METODA BADAWCZA I WYNIKI

Na ukształtowanie górki rozrządowej, będącej jednym z najważniejszych obiektów stacji rozrządowej, wpływa wiele czynników. Poznanie wszystkich okoliczności, mających wpływ na pracę górki rozrządowej, jest dla projektanta i eksploatatora nieodzowne.

Staczane wagony, zależnie od ich konstrukcji, a przede wszystkim od ładunku, maja różne prędkości i pod tym względem dzielą się na wagony lekkobieżne i ciężkobieżne. Do wagonów lekkobieżnych należą ciężkoładowane wagony z węglem, ruda i inne, a do wagonów ciężkobieżnych – wagony próżne i wagony z ładunkami pojedynczymi. W celu uniknięcia najeżdżania wagonów lekkobieżnych na wagony ciężkobieżne i dla zachowania między tymi wagonami odstępów czasu na nastawianie rozjazdów, konieczne jest regulowanie prędkości toczenia się poszczególnych wagonów lub odprzęgów. W tym celu wagony lekkobieżne muszą być hamowane za pomocą płozów hamulcowych lub hamulców.

Cel ten łatwiej może być osiągnięty, jeżeli zostaną zapewnione:

- możliwie jednakowa długość toczenia się wagonów przy kierowaniu ich na różne tory relacyjne,
- możliwie szybki rozdział staczanych wagonów na poszczególne tory grupy kierunkowej, a w związku z tym skrócenie wspólnego odcinka drogi przejeżdżanej przez odprzęgi o różnych relacjach,
- prawidłowe usytuowanie stanowisk hamowania,
- taki układ dróg zwrotnicowych i połączeń między nimi, który by wyłączał dodatkowe opory na łukach i nie wydłużał drogi toczenia się wagonów.

Wymienionym warunkom najbardziej odpowiada wiązkowy układ rozjazdów w grupie torów pod górką. Każda wiązka obejmuje 8 torów.

Projektowanie planu strefy podziałowej górki rozrządowej jest procesem heurystycznym. Ograniczeniami
w tym procesie są:

a) liczba torów na grzbiecie górki (jeden, dwa lub dwa w jeden),
b) rozstaw torów grupy kierunkowej (4,75÷6,00 m),
c) liczba torów w grupie kierunkowej (16, 24, 32, 48),
d) typy, promienie, i skosy przyjętych rozjazdów (1:9, 1:6, 6, 1:4, 8) [1].

W zależności od przyjętych ograniczeń i umiejętności projektowania, plan strefy podziałowej przybiera różne kształty.

W skład drogi zwrotnicowej strefy podziałowej zautomatyzowanej górki rozrządowej z 32 torami kierunkowymi wchodzą następujące elementy, licząc od wierzchołka: pierwszy rozjazd symetryczny o skosie 1:4,8, rozjazd zwyczajny o skosie 1:7,5 dla torów objazdowych górki, drugi rozjazd symetryczny o skosie 1:4,8, hamulec torowy odstępowy, trzeci rozjazd symetryczny o skosie 1:4,8, dwa rozjazdy zwyczajne o skosie 1:9. Rozjazdy rozdzielane są wstawkami prostymi toru o minimalnej długości 6m w celu zainstalowania odcinka izolowanego przediglicowego. Ostatni odcinek drogi zwrotnicowej stanowi styczna łuku poziomego . Odległość między osiami torów kierunkowych, ze względu na technologię pracy, przyjmuje się 5 m, natomiast między wiązkami 8 torowymi, 6m. Tak więc odległość między osią skrajnego toru kierunkowego, a osią symetrii strefy podziałowej wynosi 82 m.

Sumując długość poszczególnych elementów skrajnej drogi zwrotnicowej, otrzymamy wzór na jej minimalną długość L_{min}:

$$L_{min} = 207 + R \cdot \operatorname{tg}\frac{\alpha}{2} \quad [m] \qquad (2)$$

gdzie:

R – promień łuku poziomego przyjmowany dla skrajnego toru kierunkowego jako 160 m,

α – kąt środkowy łuku poziomego, równy kątowi nachylenia skrajnej drogi zwrotnicowej [°].

Rozpatrując trójkąt prostokątny, którego wierzchołki tworzą: środek geometryczny (A_1) pierwszego rozjazdu, punkt przecięcia stycznych łuku poziomego (A_2) oraz rzut tego punktu na oś symetrii torów kierunkowych (A_3), można ułożyć następujące równanie trygonometryczne:

$$\frac{A_2A_3}{A_1A_2}=\sin\alpha=\frac{82}{207+160\cdot \mathrm{tg}\frac{\alpha}{2}} \tag{3}$$

Wykorzystując wzór:

$$\sin\alpha=\frac{2\mathrm{tg}\frac{\alpha}{2}}{1+\mathrm{tg}^2\frac{x}{2}} \tag{4}$$

oraz podstawiając

$$\mathrm{tg}\frac{x}{2}=z \tag{5}$$

otrzymamy

$$119z2 + 207z – 41 = 0 \tag{6}$$

Rozwiązanie równania kwadratowego (6) jest następujące:

$$\mathrm{tg}\frac{\alpha}{2}=0{,}1795 \tag{7}$$

Stąd $\alpha_{min} = 20°$

Ze wzoru (2) można teraz obliczyć minimalną długość skrajnej drogi zwrotnicowej:

$$Lmin = 235{,}7 \text{ m} \tag{8}$$

Długość taka wystąpiłaby przy prostej drodze zwrotnicowej.

Jednak w rzeczywistości nie ma rozjazdów o tak dużych skosach.

W praktyce drogę tę zastępuje się stromą drogą zwrotnicową, tzn. że na każdym odcinku ma ona inny kąt odchylenia od osi symetrii.

Pierwszy rozjazd symetryczny o skosie 1:4,8 odchyla drogę zwrotnicową o połowę swojego kąta, czyli o 6°.

Współczesne układy torowe górek rozrządowych wyposażone są w technologiczne drogi kołowe.

Jedna z tych dróg zlokalizowana jest w osi symetrii strefy podziałowej. Droga ta kończy się przy hamulcach odstępowych. Służy ona do przejazdu wozów straży pożarnej i samochodów przewożących materiały i narzędzia do naprawy hamulców. Zakończenie tej drogi pełni rolę placu manewrowego. Jej szerokość w tym miejscu nie może być mniejsza niż 15m. Uwzględniając skrajnie budowli, pasy dla pieszych, pas bezpieczeństwa od drogi, można obliczyć, że odległość między początkami hamulców odstępowych, spowodowana istnieniem technologicznej drogi kołowej, powinna wynosić 25m. Tak więc odległość hamulca odstępowego od osi symetrii wynosi 12,5 m.

Wymusza to przedłużenie łuku kołowego rozjazdu symetrycznego o 4°, co wydłuży drogę zwrotnicy o 15 m [1].

Następne wydłużenie drogi zwrotnicowej o 4m spowodowane jest koniecznością wstawki prostej 5m między łukiem toru objazdowego górki a rozjazdem o skosie 1 i 7,5.

Utrzymanie odległości 5 m między początkami hamulców wymaga przedłużenia łuku kołowego drugiego rozjazdu symetrycznego o 3°, co wydłuża drogę zwrotnicową o 8 m.

Odchylenie ostatniego rozjazdu strefy podziałowej w kierunku środka głowicy, powoduje że ze względu na zachowanie skrajni budowli środki geometryczne sąsiednich ostatnich rozjazdów muszą być od siebie oddalone o 5 m. Wymusza to konieczność odsunięcia rozjazdu ostatniego od przedostatniego nie o 6 m, ale o 18 m.

Tak więc niezbędna technologicznie długość drogi zwrotnicowej L_n wydłużyła się o 39 m i wyniosła 274,7 m.

Natomiast niezbędna technologicznie suma kątów odchylenia od osi symetrii wyniosła α_n=25°.

Z powyższych rozważań wynikają następujące zależności:

$$L_n=\frac{L_{min}}{0{,}86} \tag{9}$$

$$\alpha_n=\frac{\alpha_{min}}{0{,}8} \tag{10}$$

Przeprowadźmy obliczenia kinetyczne staczanych wagonów po minimalnej drodze zwrotnicowej i po niezbędnej technologicznie drodze zwrotnicowej.

Prędkość wjazdu wagonu ciężkobieżnego na hamulec docelowy V można wyznaczyć z zależności podanej w pracy [1]:

$$V = f (H, D, wo, wp, \alpha, n, Vo) \tag{11}$$

gdzie:

H – wysokość górki rozrządowej [m],

D – odległość od wierzchołka górki do hamulców docelowych [m],

w_o – opór jednostkowy wagonu ciężkobieżnego,

w_p – opór jednostkowy od powietrza,

α – suma kątów łuków poziomych [°],

n – liczba rozjazdów w drodze zwrotnicowej,

V_o – prędkość napychania wagonów [m/s].

Prędkości te mają wartości 5,2 m/s oraz 4,57 m/s, odpowiednio dla minimalnej i niezbędnej technologicznie drogi zwrotnicowej. Prędkości te są prędkościami bezpiecznymi dla wagonów, gdyż nie przekraczają dopuszczalnej prędkości wjazdu na hamulec docelowy równy 5,5m/s.

Porównując prędkości wagonów wjeżdżających na hamulec docelowy z obydwu dróg zwrotnicowych, można znaleźć zależność:

$$Vn = 0{,}88 \cdot Vmin \tag{12}$$

gdzie:

V_n – prędkość wagonu zjeżdżającego z drogi zwrotnicowej o długości L_n [m/s],

V_{min} – prędkość wagonu zjeżdżającego z drogi zwrotnicowej o długości L_{min} [m/s],

4. WNIOSKI

Projektowanie i obliczanie górek rozrządowych rozpoczyna się zwykle od wyboru racjonalnego układu torów górki rozrządowej, w celu osiągnięcia bezpiecznych warunków ruchu staczanych wagonów i właściwego usytuowania hamulców torowych.

U mniej doświadczonych projektantów występują tendencje do niepotrzebnego wydłużania strefy podziałowej górki rozrządowej. Wpływa to negatywnie na bezpieczeństwo staczanych wagonów towarowych.

Jako wskazówka do diagnozowania zaprojektowanych układów torowych górek rozrządowych może posłużyć opracowana w niniejszej pracy metoda.

1. Znając liczbę torów grupy kierunkowej stacji oraz poziom automatyzacji na górce rozrządowej, można dobrać konieczną liczbę rozjazdów i hamulców instalowanych w skrajnej drodze zwrotnicowej.
2. Na podstawie ich długości i potrzebnych odstępów między nimi, można obliczyć minimalną długość prostej drogi zwrotnicowej L_{min} i jej kąt nachylenia do osi głowicy torów kierunkowych α_{min}.
3. Ze względu na konieczność budowy dróg technologicznych, budowę zbliżonych długości wszystkich torów kierunkowych oraz brak konstrukcji rozjazdów o małych skosach, rzeczywista droga zwrotnicowa jest drogą stromą o większym nachyleniu i dłuższą od obliczonej minimalnej.

Należy więc mówić o niezbędnej technologicznie długości drogi zwrotnicowej L_n oraz o niezbędnej technologicznie sumie kątów odchylenia drogi od osi symetrii α_n.

4. Wartości L_n oraz α_n można obliczyć ze wzorów (9) i (10). Jeżeli zaprojektowana wartość tych wielkości przekraczałaby te z obliczeń, to układ należałoby przeprojektować.
5. Należy również obliczyć prędkość wjazdu wagonu ciężkobieżnego nie hamowanego na drugą pozycję hamowania ze wzoru (12). Prędkość ta nie powinna przekraczać 5,5 m/s.

LITERATURA

[1] Cieślakowski St. J.: *Forming of hump track systems on the basis of simulated carriage rolling, 11TH International Conference "Computer Systems Aided Science, Industry And Transport",* Vol. 1, Zakopane, 3-6 December 2007.
[2] Gajda B.: *Stacje rozrządowe,* WKŁ, Warszawa 1966.
[3] *Instrukcja o technice pracy manewrowe,* Ir-9 (R-34); PKP PLK S.A., Warszawa 2005.
[4] Potthoff G.: *Verkehrsströmgslehre. Bd 2. Betriebstechnik des Rangierens,* Transpress, Berlin 1968.
[5] Sutarzewicz D.: *Układy torów stacji rozrządowych,* Drogi kolejowe, 12/84.
[6] Wegierski J.: *Układy torowe stacji,* WKŁ, Warszawa 1974.
[7] *Wytyczne projektowania. Stacje kolejowe,* WKiC, Warszawa 1972.

Dr inż. **Stanisław Janusz CIEŚLAKOWSKI** urodzony w 1951 roku we Wrocławiu, absolwent Kielecko-Radomskiej Wyższej Szkoły Inżynierskiej i Politechniki Warszawskiej. Uzyskał stopień naukowy doktora nauk technicznych na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej. Ukończył studia podyplomowe w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy w Wyższej Inżynierskiej Szkole Bezpieczeństwa i Organizacji Pracy w Radomiu oraz Studium Pedagogiczne w Kielcach. Uzyskał stopień nauczyciela dyplomowanego. Jest autorem 150 publikacji naukowych, wśród których znajdują się skrypt i książka (podręcznik akademicki wydany przez WKŁ). Jest członkiem Polskiego Towarzystwa Bezpieczeństwa i Niezawodności oraz Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji. Pracuje na stanowisku adiunkta na Politechnice Radomskiej, na Wydziale Transportu w Instytucie Systemów Transportowych, Zakładzie Organizacji i Techniki Transportu Kolejowego.

ZALEŻNOŚĆ MIĘDZY DESKRYPTOREM A_{rms} A ŁADUNKIEM POZORNYM DLA WYBRANYCH FORM WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

Barbara KUCHARSKA

Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Opolska
ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole; fax 077 400 05 73, e-mail: b.kucharska@po.opole.pl

Streszczenie

W artykule scharakteryzowano pojęcie deskryptora emisji akustycznej A_{rms} oraz ładunku pozornego wyładowań niezupełnych. Przedstawiono układ do generacji wybranych form wyładowań niezupełnych oraz pomiaru ładunku pozornego i emisji akustycznej. Pokazano przykładowe wyniki pomiarów. Oceniono przydatność mierzonego deskryptora do opisu zjawiska wyładowań niezupełnych.

Słowa kluczowe: ładunek pozorny, wyładowanie niezupełne, izolacja transformatora, deskryptor emisji akustycznej.

THE DEPENDENCE BETWEEEN A_{rms} DESCRIPTOR AND APPARENT CHARGE IN THE CHOSEN FORMS OF PARTIAL DISCHARGE

Summary

In the article the acoustic emission descriptor Arms and the apparent charge of partial discharge were characterized. The system generating the chosen forms of partial discharges and measuring apparent charge and acoustic emission was presented. The results of measurement were illustrated. Usefulness of the descriptor for the analysis of partial discharges was evaluated

Keywords: apparent charge, partial discharge, transformer isulation, acoustic emission descriptor.

1. WPROWADZENIE

Zapewnienie ciągłości dostaw energii elektrycznej wymaga ciągłej kontroli stanu izolacji kluczowych elementów systemu elektro-energetycznego, jakimi są transformatory energetyczne. Straty związane z niedostarczeniem energii ponosi się zarówno wówczas, gdy następuje awaryjne wyłączenie transformatora, jak również wtedy, gdy wiąże się ono z koniecznością przeprowadzenia odpowiednich pomiarów diagnostycznych. Dlatego dąży się do opracowania takich metod diagnostycznych, które mogą być stosowane podczas normalnego funkcjonowania urządzenia.

Bardzo często przyczyną uszkodzenia izolacji transformatora, a w rezultacie wyłączenia go z pracy, mogą być wyładowania niezupełne (WNZ). Do metod, które umożliwiają detekcję i lokalizację WNZ na pracującym transformatorze, zaliczyć można metodę emisji akustycznej (EA) [1, 2]. Jej główną zaletą jest stosunkowo mała wrażliwość na zakłócenia oraz prosta i dostępna aparatura pomiarowa. Prace nad metodą EA skupiają się na odpowiednim doborze wskaźników, umożliwiających zarówno detekcję i lokalizację występujących w układzie izolacyjnym wyładowań, jak również ocenę ich intensywności i stopnia zagrożenia izolacji [1, 2, 5]. Aparatura stosowana w metodzie EA umożliwia rejestrację mierzonych sygnałów oraz ich szybką analizę i porównanie z wynikami poprzednich badań.

Jednym z możliwych do zastosowania deskryptorów, jest pierwiastek ze średniej kwadratów sygnału elektrycznego przetworzonego z sygnału akustycznego - A_{rms}, który można zdefiniować jako [2]:

$$A_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2(t)dt} \qquad (1)$$

gdzie:
u(t) - wartość chwilowa sygnału napięciowego przetworzonego z sygnału akustycznego,
T - stała czasowa.

Deskryptor ten stanowi sumę energii mierzonego sygnału elektrycznego, stąd ma bezpośredni związek z poziomem emisji akustycznej mierzonych wyładowań niezupełnych. Można również na tej podstawie stwierdzić, że jest związany ze szkodliwością WNZ. Wartość deskryptora jest zdeterminowana przez przedział i stałą całkowania, jego zaletą jest niezależność od poziomu dyskryminacji i szumów własnych aparatury pomiarowej.

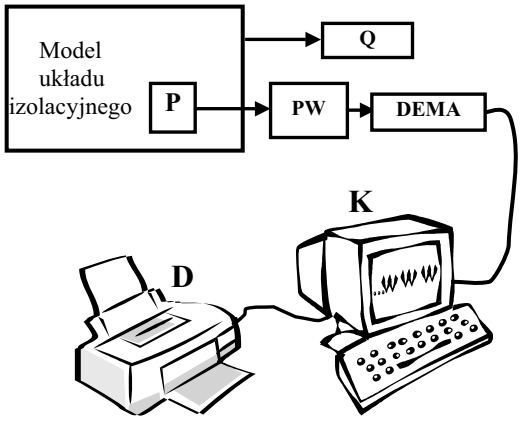
Ważnym wskaźnikiem szkodliwości WNZ jest ładunek pozorny Q, który definiuje się jako ładunek dopływający do układu izolacyjnego w wyniku wyładowania niezupełnego. Zmierzenie tego wskaźnika jest możliwe za pomocą metod elektrycznych, które ze względu na dużą wrażliwość

na zakłócenia, nie mogą być stosowane podczas eksploatacji urządzenia. Ładunek pozorny wyładowań pozwala na określenie stopnia zagrożenia izolacji, ze względu na to, istotne jest powiązanie badanego deskryptora akustycznego A_{rms} ze wskaźnikiem elektrycznym Q [3,5].

2. UKŁAD DO POMIARU WNZ

Wybrane formy wyładowań, najczęściej występujących w izolacji transformatorów, były generowane za pomocą specjalnie skonstruowanych iskierników umieszczonych w kadzi z olejem izolacyjnym. Do zasilania układu zastosowano wysokie napięcie o częstotliwości sieciowej, uzyskiwane z transformatora probierczego. Do odbioru sygnałów posłużył hydrofon firmy Brüel-Kjear. Sygnał z przetwornika był wstępnie wzmacniany przez przedwzmacniacz, a następnie przekazywany do analizatora emisji akustycznej DEMA. 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, Q-pomiar ładunku pozornego, K- komputer, D-drukarka

Równocześnie metodą elektryczną mierzono ładunek pozorny generowanych wyładowań niezupełnych.

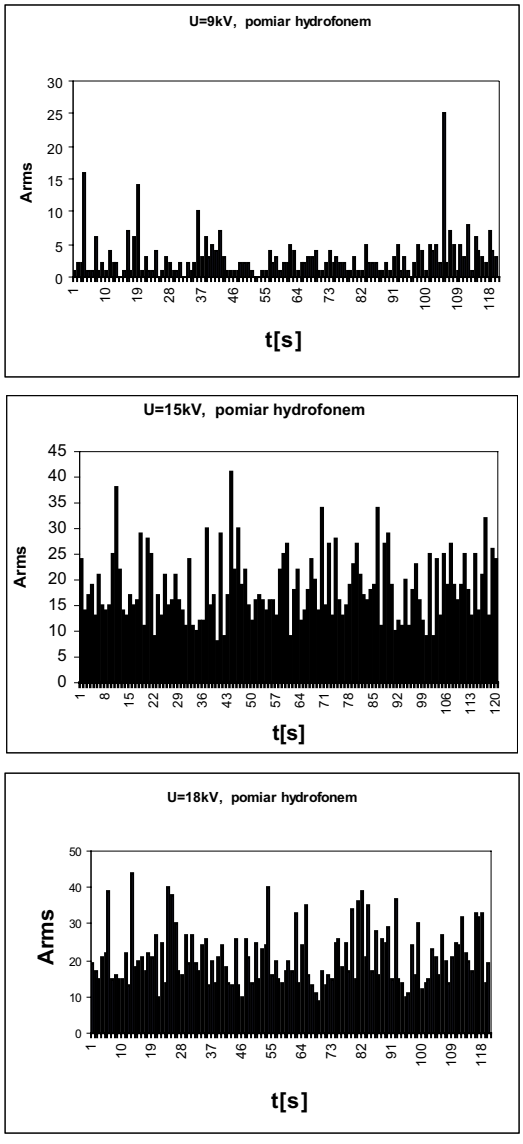
3. PRZYKŁADOWE WYNIKI POMIARÓW

W przedstawionym na rys.1 układzie, wykonano pomiary deskryptora A_{rms} dla dwóch wybranych form wyładowań niezupełnych występujących w układach izolacyjnych transformatorów:

- powierzchniowych na styku papier-olej,
- na cząstkach o nieokreślonym potencjale przemieszczających się w oleju.

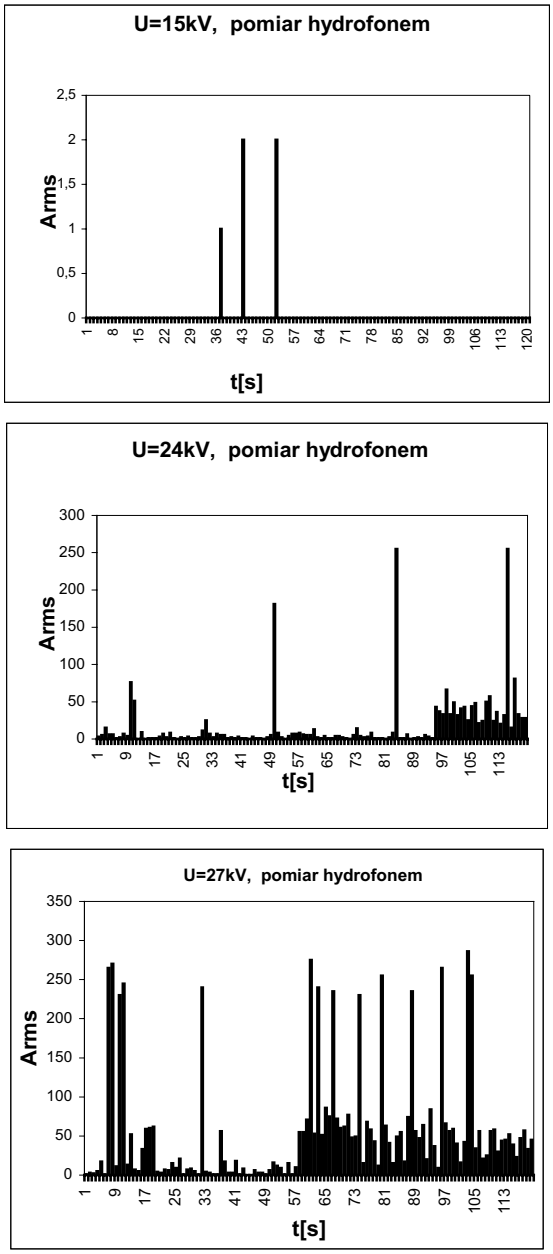
Pomiary wykonano dla zakresu napięć generacji WNZ - począwszy od napięcia początkowego U_o, aż do napięcia przebicia U_p (przy zmianie napięcia co 1kV). Dla wyładowań generowanych na cząstkach o nieokreślonym potencjale napięcia te wynosiły odpowiednio 7 i 19 kV. W przypadku wyładowań powierzchniowych napięcie początkowe było na poziomie 15 kV, natomiast napięcie przebicia wynosiło 28 kV. Czas trwania każdego pomiaru wynosił 1s, pomiary wykonywano w serii po 120. Każda seria pomiarów powtarzana była pięciokrotnie.

Na rys. 2 przedstawiono przykładowe przebiegi deskryptora A_{rms} dla wyładowań generowanych na cząstkach o nieokreślonym potencjale, otrzymane dla napięć 9, 15 i 18 kV. Wartości te odpowiadają odpowiednio 114, 167 i 257 % napięcia początkowego wyładowań U_o.



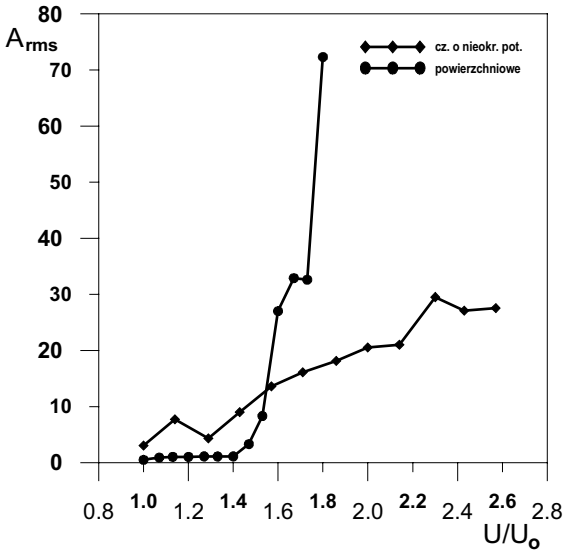
Rys. 2. Deskryptor A_{rms} WNZ na cząstkach o nieokreślonym potencjale

Na rys.3 zostały zaprezentowane przykładowe przebiegi deskryptora A_{rms} dla wyładowań powierzchniowych, otrzymane dla napięć 15, 24 i 27 kV. Wartości te wynoszą 100, 160 i 180 % napięcia początkowego wyładowań U_o.



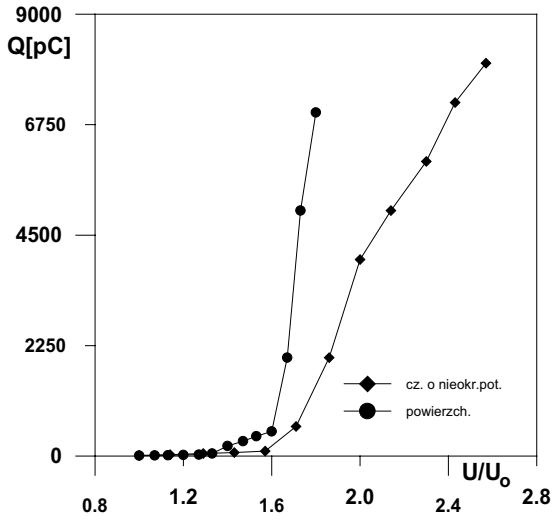
Rys. 3. Deskryptor A_{rms} WNZ powierzchniowych

Zależność wartości średnich deskryptora A_{rms} od napięcia względnego (obliczonego jako stosunek napięcia generowania WNZ do napięcia początkowego WNZ) dla obu typów badanych form WNZ zobrazowano rys.4.



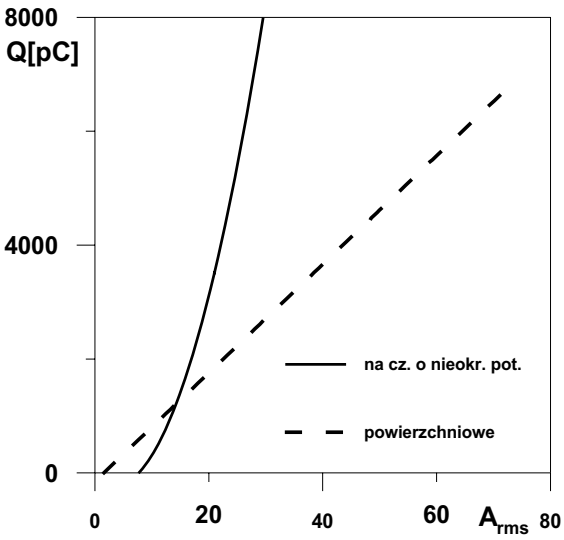
Rys. 4. Zależność wartości średnich deskryptora A_{rms} od wartości napięcia względnego dla badanych form WNZ

Równocześnie z deskryptorem A_{rms} dla obu generowanych rodzajów WNZ mierzono wartość ładunku pozornego. Na rys.5 przedstawiono zależność ładunku pozornego Q od wartości napięcia względnego.



Rys. 5. Zależność ładunku pozornego Q od wartości napięcia względnego dla wyładowań niezupełnych na cząstkach o nieokreślonym potencjale oraz powierzchniowych

Zależność obu mierzonych wskaźników zaprezentowano na rys. 6. Dla WNZ powierzchniowych wykres aproksymowano funkcją liniową, natomiast dla WNZ występujących na cząstkach o nieokreślonym potencjale wielomianem drugiego stopnia.



Rys. 6. Zależność ładunku pozornego Q od wartości deskryptora A_{rms} dla badanych form WNZ

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie pomiarów można stwierdzić, że deskryptor emisji akustycznej A_{rms} jest parametrem uzależnionym od napięcia działającego na badany układ izolacyjny (rys. 4). Deskryptor umożliwia ocenę intensywności wyładowań niezupełnych występujących w układzie izolacyjnym transformatora. Możliwe jest również stwierdzenie, na podstawie przebiegów czasowych (rys. 2 i 3), czy wyładowania mają charakter przejściowy, czy też występują w sposób stabilny i równomierny. Zaletą deskryptora jest również możliwość oceny energii wyładowań niezupełnych. Odbywa się to na w oparciu o wartości średnie parametru, dla zadanego czasu pomiaru.

Ładunek pozorny wyładowań występujących w badanych układach izolacyjnych, jest również ściśle zależny od napięcia, które oddziałuje na izolację (rys. 5). Niestety w warunkach technicznych nie jest możliwy pomiar tego wskaźnika. Określenie zależności miedzy deskryptorem A_{rms} i ładunkiem pozornym Q (rys. 6) pozwala na ocenę szkodliwości WNZ na podstawie pomiarów wykonanych metodą akustyczną

W technicznych układach izolacyjnych pomiary deskryptorów akustycznych są obarczone błędem wynikającym ze znacznego tłumienia sygnałów przez poszczególne elementy urządzenia. W tym przypadku ocena występujących wyładowań niezupełnych powinna odbywać się na zasadzie porównywania bieżących wyników z poprzednimi, wykonanymi np. na nowym obiekcie, bądź bezpośrednio po remoncie urządzenia.

LITERATURA

[1] Gacek Z, Witos F.: *Calibrated AE method as a conception regarding evaluation of PDs for diagnosis of insulation*, Acta Electrotechnica et Informatica, Vol. 3. No 2, pp.15-20 (2003) .

[2] Skubis J.: *Akustyczne techniki lokalizacji wyładowań niezupełnych*. Transformatory w eksploatacji. Energetyka zeszyt VI. 04.2005. s.73-76.

[3] Skubis J.: *Relationships between acoustic and electric descriptors of partial discharges*, Archives of Electrical Engineering, 1998 vol.47, nr 2, s.119-129.

[4] Witos F., Gacek Z.: *Badanie wyładowań niezupełnych w transformatorach elektro-energetycznych metodą kalibrowanej emisji akustycznej on-line*. Transformatory w eksploatacji. Energetyka zeszyt VI. 04.2005. s.78-81.

[5] Witos F.: *In search of AE desriptors correlated with apparent electric charge*, XIIIth Int. Symp. On High Voltage Engineering, Delft, August 25-29, 2003.

Dr inż. **Barbara KUCHARSKA** jest pracownikiem Instytutu Elektroenergetyki, Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej

WYBRANE ELEMENTY DIAGNOSTYKI SZCZELNOŚCI PŁYNOWYCH KONSTRUKCYJNIE ZAMKNIĘTYCH W PRZESTRZENIACH ROBOCZYCH

Szymon SALAMON

Katedra Systemów Technicznych i Zarządzania, Politechnika Częstochowska
Al. Armii Krajowej 19 B, 42-200 Częstochowa, salamon@zim.pcz.czest.pl

Streszczenie

Artykuł prezentuje podstawowe pojęcia związane z utratą szczelności płynowych konstrukcyjnie zamkniętych przestrzeni roboczych. Przedstawiono rodzaje nieszczelności: rzeczywistej i pozornej, zewnętrznej i wewnętrznej, pneumatycznej i hydraulicznej. Fizyczne podstawy zjawiska nieszczelności obiektów mechanicznych w szczególności dotyczą: rodzajów przepływów gazowych przez nieszczelności (wprowadzono pojęcie liczby *Kundsena* oraz warunków: lepkich, molekularnych i pośrednich) jak również rodzajów przepływów cieczowych (liczba *Reynoldsa*, przepływ laminarny i burzliwy, model przepływu *Hagena - Poiseiull'a*). Rozważano uwarunkowania badań szczelności obiektów mechanicznych.

Słowa kluczowe: diagnostyka szczelności, fizyczne podstawy zjawiska nieszczelności.

SELECTED ELEMENTS OF LEAK-TIGHTNESS DIAGNOSTICS OF FLUID WORKING VOLUMES CONFINED BY DESIGN

Summary

This article presents some basic concepts connected with loss of leak-tightness in fluid working volumes confined by design. It describes: actual and apparent, external and internal, and pneumatic and hydraulic leak models. In particular, the physical background of the phenomenon of mechanical objects' leaks pertains to: types of gas flow through leaks (the notions of the *Knudsen* number and of viscose, molecular and intermediate conditions were introduced), as well as fluid flow types (the *Reynolds* number, laminar and turbulent flow types, and the *Hagen-Poiseiulle* flow model). Various considerations of studying mechanical objects' leak-tightness were encompassed.

Keywords: leak-tightness diagnostics, physical background of phenomenon of mechanical objects' leaks.

1. RODZAJE NIESZCZELNOŚCI PŁYNOWYCH KONSTRUKCYJNIE ZAMKNIĘTYCH PRZESTRZENI ROBOCZYCH

1.1. Nieszczelność rzeczywista i pozorna

W każdym obiekcie mechanicznym w czasie jego wytwarzania, montażu czy eksploatacji występują określone nieciągłości materiałowe, niedoskonałości wykonania, wreszcie defekty ograniczające czy wręcz eliminujące obiekt z dalszej eksploatacji. Te nieciągłości, niedoskonałości i defekty powodujące przecieki medium roboczego, określa się jako *nieszczelności rzeczywiste* [3]. W badaniu szczelności obiektów funkcjonuje również pojęcie *nieszczelności pozornej*. określanej, jako powolne uwalnianie się cząstek gazu zaabsorbowanych i zaadsorbowanych przez materiały stykające się z czynną objętością badanego obiektu. Warto zaznaczyć, że *nieszczelność* to otwór, porowatość, przepuszczalność elementu lub struktura ścianki obiektu pozwalające na przepływ płynu poprzez ściankę w wyniku istniejącej różnicy ciśnień lub stężeń na obu stronach ścianki obiektu, zaś *przeciek* to przepływ płynu poprzez nieszczelności. Oba wyżej wymienione rodzaje nieszczelności mogą występować jednocześnie.

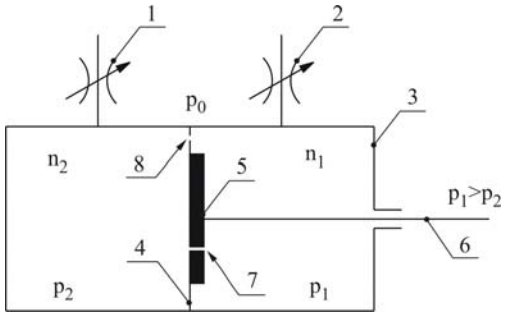
Nieszczelności rzeczywiste można podzielić na przewodnościowe i przenikalnościowe [4].

1.2. Nieszczelność wewnętrzna i zewnętrzna [6]

Nieszczelność wewnętrzna, oznacza przeciek gazu (powietrza) między komorami roboczymi, gdy przesłona między komorami zamknięta jest tłokiem (rys. 1).

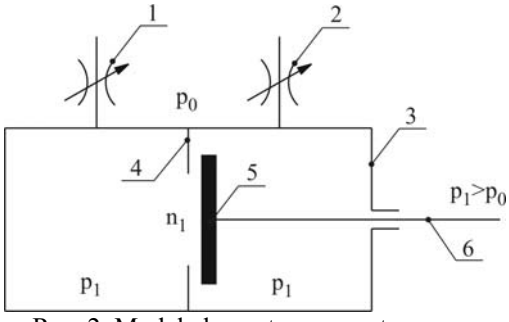
W komorach znajdują się różne ilości powietrza $n_1 \neq n_2$ (wyrażone w kilomolach) pod różnymi ciśnieniami. Jeżeli w tym elemencie, przesłona lub tłoczek posiadają wadę materiałową w postaci np. kapilarnego kanalika lub uszczelnienie między tłokiem i przesłoną jest niesprawne, wówczas powietrze z komory o wyższym ciśnieniu (prawa komora) przecieka do komory o niższym ciśnieniu (lewa komora). Jeżeli obiekt pneumatyczny posiada zamknięte zawory odcinające 1 i 2, wówczas przeciek między komorami istnieje do czasu

wyrównania się ciśnień w obu komorach, tzn. do czasu spełnienia warunku: $p_1' = p_2'$.



Rys. 1. Model elementu pneumatycznego z nieszczelnością wewnętrzną, gdzie: 1 i 2 – zawory dławiące nastawne, 3 – komora pneumatyczna, 4 – przesłona komory, 5 – tłok, 6 – tłoczysko, 7 – mikronieciągłość tłoka, 8 – mikronieciągłość przesłony

Nieszczelność zewnętrzna, oznacza przeciek gazu z komory roboczej (lub z obu komór) do otoczenia. Można to zobrazować, jak na rysunku 2.



Rys. 2. Model elementu pneumatycznego z nieszczelnością zewnętrzną, gdzie: 1 i 2 – zawory dławiące nastawne, 3 – komora pneumatyczna, 4 – przesłona komory, 5 - tłok, 6 – tłoczysko

Przy otwartej przesłonie pomiędzy komorami n_1 kilomoli powietrza przy ciśnieniu p_1 wypełnia obie komory robocze. Ciśnienie p_1 jest nadciśnieniem w stosunku do ciśnienia otoczenia p_0. Jeżeli zawory odcinające 1 i 2 są zamknięte a korpus obiektu pneumatycznego jest nieszczelny (mikronieciągłości i mikroszczeliny), wówczas następuje przeciek powietrza z komór roboczych do otoczenia. Przeciek ten trwa do momentu aż ciśnienie wewnątrz komór zrównoważy się z ciśnieniem otoczenia, tzn.: $p_1' = p_0$.

1.3. Szczelność pneumatyczna i hydrauliczna [3]

Szczelność pneumatyczna, to stan techniczny obiektu mechanicznego, polegający w szczególności na generowaniu symptomu diagnostycznego przez obiekt, w postaci przecieku pneumatycznego czynnika testującego (najczęściej powietrza), w określonych warunkach badania jego szczelności, najczęściej poprzez podanie: ciśnienia czynnika testującego i jego objętościowego natężenia przecieku.

Szczelność hydrauliczna, to stan techniczny obiektu mechanicznego, polegający w szczególności, na generowaniu symptomu diagnostycznego przez obiekt, w postaci przecieku czynnika testującego (najczęściej oleju pochodzenia mineralnego), w określonych warunkach badania jego szczelności, najczęściej poprzez podanie: wartości ciśnienia testującego i czasu trwania tego badania.

2. FIZYCZNE PODSTAWY NIESZCZELNOŚCI OBIEKTÓW MECHANICZNYCH

2.1. Rodzaje przepływów gazowych

Wyróżnia się [2], trzy charakterystyczne stosunki tych wielkości, określonych *liczbą Knudsena*. Wyraża ona stosunek miarodajnego w danych warunkach rozmiaru X wyodrębnionego obszaru pneumatycznego (np. średnicy przewodu, długości komory itd.), do średniej drogi swobodnej λ_0, tj.:

$$K = \frac{X}{\lambda_0} \qquad (1)$$

Jeżeli $K >> 1$ to zachodzą *warunki gazu lepkie*, co oznacza, że $\lambda_0 >> X$, cząsteczki gazu biorą udział w zjawisku fizycznym polegającym, na wzajemnym zderzaniu się, tzn. przekazywaniu energii ruchu, która odbywa się prawie wyłącznie między najbliższymi cząsteczkami.

Jeżeli $K << 1$ to zachodzą *warunki gazu molekularne*, co oznacza, że $\lambda_0 << X$, cząsteczki gazu biorą udział w zjawisku fizycznym polegającym, na zderzaniu się cząsteczek ze ściankami lub innymi powierzchniami znajdującymi się w wyodrębnionym obszarze pneumatycznym.

Jeżeli $K \approx 1$ to zachodzą *warunki gazu pośrednie*, co oznacza, że $\lambda_0 \approx X$, cząsteczki gazu biorą udział w zjawiskach, polegających zarówno na wzajemnym zderzaniu się jak zderzaniu się ze ścianami obiektu, z równym prawdopodobieństwem.

2.2. Rodzaje przepływów cieczowych

Jeżeli mamy do czynienia z przepływem w rurze o przekroju kołowym, to rozkład prędkości określony przez scałkowanie równania *Naviera - Stokesa* i związek między strumieniem objętości i różnicą ciśnień określony prawem *Hagena - Poiseuill'a* mają zastosowanie tylko do przepływów charakteryzowanych liczbą Reynoldsa mniejszą od pewnej jej krytycznej wartości [1]:

$$\mathrm{Re}_{kr} = V_{śr} D_h / \nu \approx 2340 \qquad (2)$$

gdzie: $V_{śr}$ – średnia prędkość przepływu;
ν – kinematyczny współczynnik lepkości;
D_h – średnica hydrauliczna.

Biorąc pod uwagę krytyczną wartość liczby *Reynoldsa*, rozróżnia się zasadniczo dwa rodzaje przepływów cieczowych: *laminarny (uwarstwiony)*

i *burzliwy (turbulentny)*, czasem wyróżnia się jeszcze przepływy pośrednie, dla których dwa rodzaje przepływów wcześniej wymienionych, są przepływami granicznymi. Ważnym pojęciem jest zatem liczba *Reynoldsa*. Jeżeli liczba *Reynoldsa* jest mniejsza od krytycznej liczby *Reynoldsa* Re_{kr} *(*$Re < Re_{kr}$*)*, to w układzie występuje przepływ laminarny. Jeżeli liczba *Reynoldsa* jest większa od krytycznej liczby *Reynoldsa* Re_{kr} *(*$Re > Re_{kr}$*)*, to w układzie występuje przepływ burzliwy. Warto zaznaczyć, że te dwa rodzaje przepływów, wyróżnionych dla przepływu cieczy, wyróżnia się również dla przepływu gazu w warunkach lepkich.

3. UWARUNKOWANIA W BADANIU SZCZELNOŚCI OBIEKTÓW PNEUMATYCZNYCH

3.1. Zakłócenia wynikające ze zmian temperatury czynnika testującego

Z ogólnego równania stanu gazu $p \cdot V = m \cdot R \cdot T$ można wyznaczyć teoretyczny wpływ zmiany temperatury na wynik pomiaru. Z tego równania dla określenia pozornych strat w objętości powietrza można wyprowadzić zależność, będącą funkcją zmian temperatury powietrza w tej kontrolowanej objętości.

Ostatecznie, po przekształceniach [6] wyrażenie opisujące zależnością matematyczną, wpływ temperatury na zmianę kontrolowanej objętości, można otrzymać w postaci:

$$V^{T}_{poz.} = \Delta V = \frac{p_k V}{\rho R T}\left(1 - \frac{T}{T + \Delta T}\right) \qquad (3)$$

gdzie: $V^{T}_{poz.}$ – pozorna strata objętości powietrza, uchodząca przez nieszczelność (jako wynik zmiany temperatury powietrza w badanej przestrzeni w fazie pomiaru);
p_k – ciśnienie kontrolne,
V – badana objętość,
p – właściwa gęstość powietrza,
R – uniwersalna stała gazowa,
T – temperatura powietrza kontrolnego,
ΔT – zmiana temperatury powietrza w badanej objętości podczas fazy pomiaru.

Jeżeli [5] np. całkowita ilość powietrza w badanej objętości równej 1 l zmieni temperaturę o 0,1C przy (założonym) nadciśnieniu badawczym równym 1 bar, wyjściowej temperaturze powietrza równej 20C i czasie trwania pomiaru równym 10s, to zgodnie z powyższym równaniem pozorna nieszczelności wyniesie 4,06 cm^3/min. Niniejszy wynik uzyskano przy danych jak wyżej oraz przy założeniu, że R = 286,99 J/kg K, ρ = 1,205 kg/m^3 i ciśnieniu bezwzględnym równym (1 bar + 1013,25 hPa). Przykład ten jest wprawdzie teoretyczny i w tej postaci raczej w praktyce nie występuje, pozwala jednak na uzmysłowienie skali wpływu temperatury na wynik pomiaru wielkości przecieku i stanowi przesłankę do utrzymywania stabilnej temperatury wszystkich elementów układu pomiarowego.

3.2. Zakłócenia wynikające ze zmian objętości badanego obiektu

Zmiana objętości badanej przestrzeni roboczej w czasie pomiaru może albo skompensować przeciek albo ją wykazać mimo jej braku. Zależność pozornej zmiany przecieku od zmiany objętości można także wyprowadzić z ogólnego równania stanu gazu, a mianowicie: zakłócenia wynikające ze zmian objętości kontrolowanego obszaru pneumatycznego, tj. konstrukcyjnie zamkniętej przestrzeni roboczej, rozpatrzono przy założeniu, że: $p = const$ i $T = const$. Pamiętając, że $m = pV/RT$ i $\Delta V = \Delta m/\rho$ i po przekształceniach [6] można otrzymać wyrażenie na zakłócenia w objętości badanego obszaru pneumatycznego, jako efektu odkształceń jego elementów:

$$V^{V}_{poz.} = \Delta V = \frac{p_k V}{\rho R T}\left(1 - \frac{V}{V + \Delta V}\right) \qquad (4)$$

gdzie: $V^{V}_{poz.}$ – zmiana objętości kontrolowanej przestrzeni w fazie pomiaru (inne oznaczenia jak we wzorze wyżej).

Zależność wykorzystano do wykonania niżej przytoczonych obliczeń. Przyjęto [5], że wymieniony w punkcie 3.1 badany obiekt posiada konieczny do uszczelnienia otwór o średnicy 50 mm, zakładając, że uszczelniający ten otwór korek przemieści się w fazie pomiaru o 0,1mm, (co daje zmianę objętości ΔV = 1,96 x 10^{-7} m^3), co powoduje teoretyczny przeciek powietrza równy 2,3 cm^3/min. Przy nadciśnieniu równym 3 bar wartość ta wzrasta do 4,7 cm^3/min. Przytoczone obliczenia wykonano przy pozostałych danych jak we wcześniejszych obliczeniach dla wpływu temperatury na zmianę objętości.

LITERATURA

[1] Bukowski J., Kijkowski P.: *Kurs mechaniki płynów*. PWN, Warszawa 1980.
[2] Groszkowski J.: *Technika wysokiej próżni*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1972.
[3] Groszkowski J.: *Zagadnienia próżni w nauce, technice i przemyśle*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1983.
[4] Hlebowicz J.: *Badanie szczelności. Poradnik*. Wydawnictwo: Biuro Gamma, Warszawa 1996.
[5] Meurer K. H.: *Automatisches Lecktesten mit Luft*. J. W. Frochlich Testtechnik. Sonderdruch aus Technische Uberwachung 1982, 23, 2.
[6] Salamon S.: *Diagnostyka szczelności płynowych konstrukcyjnie zamkniętych przestrzeni roboczych*. Seria Mechanika, Monografia 333. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006.

dr hab. inż. **Szymon SALAMON.** Kierownik Katedry Systemów Technicznych i Zarządzania. Autor monografii, pt.: „*Diagnostyka szczelności płynowych konstrukcyjnie zamkniętych przestrzeni roboczych".* Współautor książki, pt.: „*Efektywność Eksploatacji maszyn i urządzeń*". Autor ponad 130 publikacji krajowych i zagranicznych z zakresu budowy i eksploatacji maszyn.

PROGOWA METODA DIAGNOZOWANIA W SYSTEMIE TRANSMISJI INFORMACJI

Marcin BEDNAREK[*], Lesław BĘDKOWSKI[**], Tadeusz DĄBROWSKI[**]

[*]Katedra Informatyki i Automatyki, Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Rzeszowska, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, fax: 017 854 29 10, e-mail: bednarek@prz.rzeszow.pl
[**]Instytut Systemów Elektronicznych, Wydział Elektroniki
Wojskowa Akademia Techniczna, ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, fax: 022 683 91 25,
e-mail: lbedkowski@wel.wat.edu.pl, tdabrowski@wel.wat.edu.pl

Streszczenie

Przedmiotem rozważań zawartych w artykule jest przykład implementacji odpornej na zakłócenia sygnału diagnostycznego metody diagnostyczno-terapeutycznej opartej na progowych układach pomiarowych do układu, w którym realizuje się przesył komunikatów w systemie dwóch stacji diagnostycznych: lokalnej i odległej połączonych przy pomocy sieci komputerowej.

Słowa kluczowe: system transmisji informacji, progowy układ pomiarowy, diagnozowanie, dozorowanie.

DIAGNOSIS THRESHOLD METHOD IN DATA TRANSFER SYSTEMS

Summary

An example of an implementation of diagnostic-therapeutic method (disturbance-proof of diagnosing signal) based on thresholded measuring systems in a system with messages transmission is presented. System consists of a local diagnostic station and remote one, which are connected by computer network.

Keywords: data transfer system, threshold measurement system, diagnosing, supervision diagnosing.

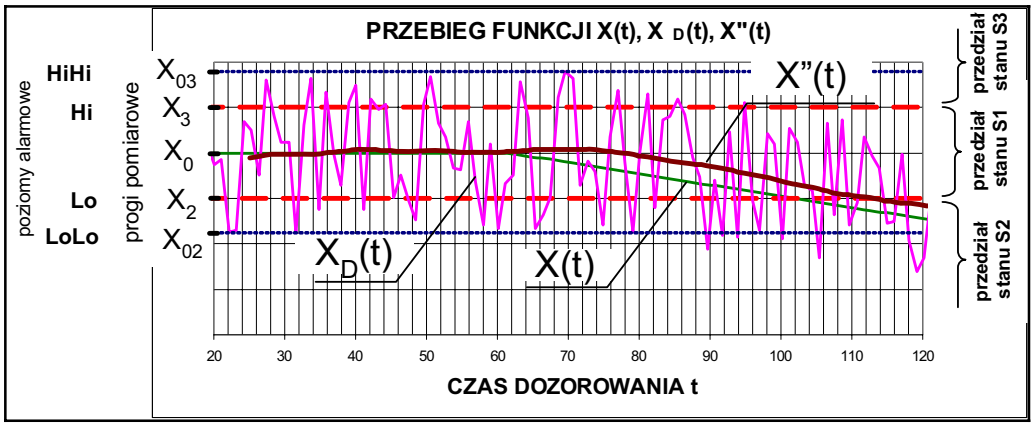
1. WPROWADZENIE

Przedmiot rozważań przedstawionych w artykule charakteryzują poniższe założenia:

a) Obiekt poddany dozorowaniu stanu traktowany jest – w celu uproszczenia rozważań – jako jeden niepodzielny diagnostycznie moduł.
b) Dozorowanie oparte jest – przykładowo – na obserwacji wartości jednej wielkości diagnostycznej X(t) opisującej stan modułu.
c) Rzeczywisty przebieg wielkości opisującej X(t) **nie jest znany**; w procesie dozorowania, w efekcie operacji pomiarowo-obliczeniowych tworzony jest przybliżony obraz X"(t) tej wielkości.
d) Informacja o wartościach obrazu X"(t) wielkości opisującej oraz o trendzie zmian tych wartości w określonym przedziale czasu (w tzw. oknie dozorowania) stanowi podstawę prognozy o ewentualnej tendencji przejścia obiektu do niepożądanego stanu.
e) Na podstawie przebiegu funkcji X"(t) podejmuje się działania terapeutyczne aktywnie utrzymujące wymagany stan obiektu.
f) Zakłada się, że w obiekcie i w układzie dozorująco-terapeutycznym istnieją znaczne zakłócenia, a w konsekwencji [1, 2]:
   – zakłócenia te mogą zaburzać funkcjonowanie układu dozorująco-terapeutycznego;
   – zakłócenia te mogą powodować błędne przerwanie funkcjonowania obiektu (pomimo pozostawania obiektu w stanie zdatności);
   – wielkość opisująca X(t) jest zakłócana nakładającym się na nią symetrycznie sygnałem zakłócającym $X_Z(t)$ o określonym rozkładzie (np. o rozkładzie równomiernym f_z);
   – **wielkość opisująca zakłócona** $X_D(t)$ monitorowana przez układ pomiarowy ma postać:

$$X_D(t) = X(t) \pm X_Z(t) \qquad (1)$$

g) W celu uproszczenia układu dozorującego stosuje się **pomiarowy układ progowy** do monitorowania zakłóconej wielkości diagnostycznej $X_D(t)$.
h) Nie rozpatruje się ewentualnych zakłóceń w magistrali komunikacyjnej (rys. 2), która zabezpieczona jest przed przejściem w stan niezdatności zadaniowej odpowiednimi działaniami osłonowymi i interwencyjnymi [3].
i) Komunikat o stanie obiektu przesyłany jest w postaci informacji o przekroczeniach progów pomiarowych przez wielkość diagnostyczną $X_D(t)$ przy czym, dla skonkretyzowania rozważań, przyjmuje się, że (rys. 1):



Rys. 1. Ilustracja przebiegu niezakłóconej, rzeczywistej funkcji X(t) opisującej stan obiektu, zakłóconej wielkości mierzonej $X_D(t)$, obrazu X"(t) funkcji opisującej X(t) oraz ilustracja progów pomiarowych i proponowanych poziomów alarmowych

– wartość X_3 oznacza „górny" próg pomiarowy **zakłóconej** wielkości $X_D(t)$ – a zarazem poziom alarmowy wysoki *Hi* (ang. *High*) odpowiadający dopuszczalnej „górnej" wartości wielkości opisującej X(t) (a w rzeczywistości jej obrazu X"(t)) w przypadku stanu zdatności (tj. stanu S_1);
– wartość X_2 oznacza „dolny" próg pomiarowy **zakłóconej** wielkości $X_D(t)$ – a zarazem poziom alarmowy niski *Lo* (ang. *Low*) odpowiadający dopuszczalnej „dolnej" wartości wielkości opisującej X(t) (a w praktyce jej obrazu X"(t)) w przypadku stanu zdatności.

j) W ramach zapasu (rezerwy) czasu może być przesyłana magistralą komunikacyjną także dodatkowa informacja o osiągnięciu przez **zakłóconą** wielkość opisującą $X_D(t)$:
– poziomu alarmowego bardzo wysokiego *HiHi* (ang. *High High*) oznaczającego fizycznie możliwą maksymalną wartość X_{03} zakłóconej wielkości opisującej w określonym stanie obiektu (np. w stanie zdatności S_1);
– poziomu alarmowego bardzo niskiego *LoLo* (ang. *Low Low*) oznaczającego fizycznie możliwą minimalną wartość X_{02} zakłóconej wielkości opisującej w określonym stanie obiektu.

Dozorowanie stanu obiektu z wykorzystaniem progowych układów pomiarowych [1] opiera się na testowaniu z określoną częstotliwością (zależną od dynamiki procesów funkcjonalnych i ewentualnych procesów destrukcyjnych toczących się w obiekcie) zakłóconej wielkości diagnostycznej $X_D(t)$ w celu rejestracji ewentualnych przekroczeń przez tę wielkość założonych wartości progowych. Podstawę wnioskowania diagnostycznego stanowi obraz X"(t), rzeczywistej **nieznanej** funkcji X(t), utworzony w oparciu o następujące zależności [1]:

$$p_2 = \frac{L_2}{L}; \qquad p_3 = \frac{L_3}{L} \tag{2}$$

gdzie:

L – „długość" okna dozorowania (tj. liczba kolejnych pomiarów, na których oparte jest wyznaczanie bieżącej wartości X(t));
L_2 – liczba wyników pomiarów wielkości $X_D(t)$ (uzyskana w oknie dozorowania o długości L) o wartościach zawierających się w przedziale $[X_{02}, X_2]$ (tj. poniżej „dolnego" progu przedziału stanu zdatności S_1);
L_3 – liczba wyników pomiarów wielkości $X_D(t)$ (uzyskana w oknie dozorowania o długości L) o wartościach zawierających się w przedziale $[X_3, X_{03}]$ (tj. powyżej „górnego" progu przedziału stanu zdatności S_1).

Wskaźniki p_2 i p_3 przekroczeń przez wielkość monitorowaną $X_D(t)$ wartości progowych X_2 oraz X_3 umożliwiają wyznaczenie **pierwszego** obrazu X'(t) poszukiwanej funkcji opisującej X(t):

$$[p_2 \geq p_3] \Rightarrow \left[X'(t) = \frac{X_2 f_Z - p_2 + a}{f_Z} \right] \tag{3}$$

$$[p_2 < p_3] \Rightarrow \left[X'(t) = \frac{X_3 f_Z + p_3 - a}{f_Z} \right]$$

gdzie:

f_z – rozkład amplitudowy zakłóceń; dla przyjętego rozkładu równomiernego:

$$f_Z = \frac{1}{X_{03} - X_{02}} \tag{4}$$

a – wskaźnik symetryczności rozkładu zakłóceń względem wielkości X(t); dla rozkładu symetrycznego a = 0,5.

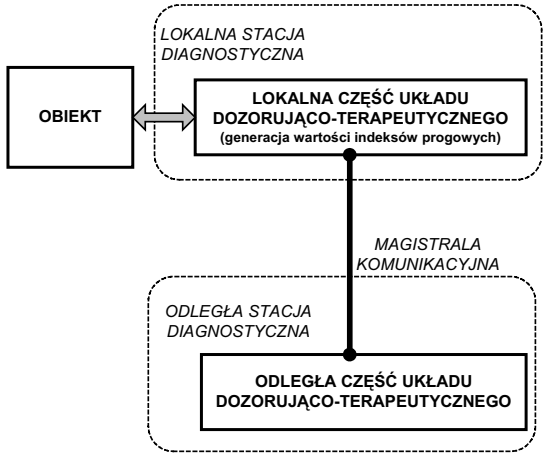
Wyznaczony w ten sposób obraz X'(t) wykazuje na ogół dość znaczne odchylenia od rzeczywistej funkcji X(t) opisującej stan obiektu. Dlatego wskazane jest wyznaczenie **drugiego** obrazu X"(t) funkcji X(t) poprzez operację uśredniania uzyskanych wartości X'(t), np. w przedziale o długości okna dozorowania L:

$$X''(t_k) = \frac{\sum_{t_n=t_p}^{t_n=t_k} X'(t_n)}{L} \quad (5)$$

gdzie: t_n – kolejny numer wyniku pomiaru; t_p – pierwszy numer wyniku pomiaru w oknie dozorowania o długości L; t_k – ostatni numer wyniku pomiaru w oknie dozorowania o długości L.

2. UKŁAD Z SYSTEMEM TRANSMISJI KOMUNIKATÓW

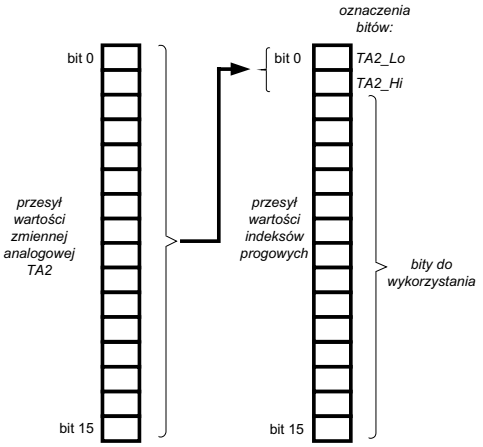
Zastosowanie układu progowego, oprócz wspomnianego uproszczenia układu pomiarowego, ma także pozytywny wpływ na obciążenie magistrali komunikacyjnej w przypadku rozproszonego układu dozorująco-terpeutycznego. Przyjmijmy, że taki układ składa się z 2 części:
– lokalnej – odpowiedzialnej za pierwsze dwa ogniwa procesu diagnozowania tj. badanie diagnostyczne i wnioskowanie pomiarowe – umieszczonej w pobliżu dozorowanego obiektu;
– odległej – spełniającej pozostałe funkcje łańcucha działań diagnostyczno-terapeutycznych – znajdującej się w oddalonej stacji diagnostycznej, połączonej z lokalną stacją magistralą komunikacyjną (rys. 2).



Rys. 2. Układ z systemem transmisji informacji diagnostycznej i decyzji terapeutycznych

W rozproszonym systemie diagnostyczno-terapeutycznym przesyłanie komunikatu-efektu w postaci wartości funkcji opisującej stan obiektu skutkuje znacznie większym obciążeniem magistrali komunikacyjnej niż przesyłanie wartości indeksów funkcji progowej. Wynika to z faktu, że wartość analogowa zajmuje kilka (kilkanaście) bitów części znaczącej komunikatu, natomiast wartość progowa to wartość binarna informująca o przekroczeniu (lub nie) wartości progowych. Korzyści z zastosowania przesyłu wartości binarnych ilustruje rys. 3. Zamiast przesyłu np. jednej wartości dozorowanej zmiennej analogowej 16-to bitowej można przesłać informację dotyczącą przekroczenia (lub nie) wartości progowych 8-u innych dozorowanych wartości. Przynosi to istotne korzyści w przypadku dużego obciążenia magistrali, powodując powstanie pewnego zapasu czasu. W przykładzie na rys. 3 pierwsze dwa bity zmiennej 16-to bitowej oznaczają:
- bit 1 (*TA2_Hi*): wartość 1 – przekroczenie przez funkcję opisującą X"(t) górnego dopuszczalnego poziomu Hi (X_3); wartość 0 – brak przekroczenia;
- bit 0 (*TA2_Lo*): wartość 1 – przekroczenie przez funkcję opisującą X"(t) dolnego dopuszczalnego poziomu Lo (X_2); wartość 0 – brak przekroczenia.

Pozostałe niewykorzystane bity (3÷15) można wykorzystać do umieszczenia w nich wartości indeksów progowych kolejnych funkcji (dozorowanych wielkości) opisujących np. inne dozorowane moduły obiektu.



Rys. 3. Porównanie przesyłu wartości zmiennej dozorowanej (wartości funkcji opisującej) i wartości indeksów progowych

3. CHARAKTERYSTYKA APLIKACJI UKŁADU PROGOWEGO W PAKIECIE *INTOUCH*

Oprogramowanie *InTouch* służy m.in. do wizualizacji zachodzącego procesu na stacji operatorskiej oraz oddziaływania operatorskiego. Jest częścią składową większego pakietu *WonderWare Factory Suite*. Może być zainstalowane zarówno w części lokalnej (realizacja układu progowego) rozproszonego układu diagnozowania jak i odległej (wizualizacja, oddziaływanie diagnozera, terapia i zwrotna informacja do części lokalnej). Za pomocą funkcji oraz pól zmiennych oferowanych przez oprogramowanie zrealizowano odpowiednie skrypty generujące wartości indeksów progowych. Do tego celu wykorzystano m.in. pola [4]:
- *.HiLimit* – monitoring pierwszej górnej wartości progowej funkcji diagnostycznej;
- *.HiStatus* – detekcja przekroczenia górnej wartości progowej;

- *.LoLimit* – monitoring pierwszej dolnej wartości progowej funkcji diagnostycznej;
- *.LoStatus* – detekcja przekroczenia dolnej wartości progowej.

Utworzone skrypty dla układów progowych realizują następnie wysyłanie odpowiednio „upakowanych" danych poprzez magistralę komunikacyjną. Należy pamiętać o zachowaniu determinizmu czasowego poprzez zastosowanie odpowiedniego protokołu sieci przemysłowej. Możliwy jest także przesył informacji niezbędnej dla określenia odpowiednich „pieczęci czasowych" odczytanych wartości zmiennych. Ten ostatni zabieg zwiększa jednak znacznie obciążenie magistrali.

4. PODSUMOWANIE

Należy podkreślić pewne aspekty implementacji progowej metody pomiarowej w rozproszonych systemach z transmisją efektu w postaci komunikatów diagnostyczno-terapeutycznych:

1. Koszt układu przekształcającego wartość zmierzoną na wartości progowe nie zwiększa kosztu lokalnej stacji diagnostycznej pod warunkiem stosowania jej (i oprogramowania) także w tradycyjnym układzie pomiarowym. Realizację funkcji niezbędnych dla procesu dozorowania progowego przeprowadza się wykorzystując możliwości już istniejącego oprogramowania stacji.
2. Dużo ważniejsze od kosztu układu pomiarowego (**z punktu widzenia telekomunikanta**) dla układów z transmisją efektu jest zaoszczędzenie czasu i zmniejszenie obciążenia magistrali komunikacyjnej. Odbywa się to m.in. poprzez przesył wartości progowych (1-no bitowych) zamiast kilku lub kilkunastu bitów reprezentujących wartość zmiennej.
3. Zwolnione dzięki przedstawionym tu procedurom bity można wykorzystać i zdefiniować jako progi dla kolejnych dozorowanych funkcji opisujących.
4. Zamiast przesyłu wartości analogowej zmiennej istnieje możliwość zawarcia w komunikacie kilku wartości indeksów progowych. Tym samym otwiera się możliwość zastosowania wyżej przedstawionych rozważań nie tylko do metody 2-progowej ale i wieloprogowej. Wprowadzając liczbę progów należy zawsze konfrontować ją z liczbą bitów zajmowanych przez zmienną analogową przesyłaną przy dozorowaniu „tradycyjnym" (opłacalność operacji).
5. W układzie zaproponowanym w pracy (por. rys. 3) można też wprowadzić dodatkowe działania osłonowe np. detekcję błędu układu progowego lub komunikacji poprzez rejestrację przez układ osłonowy pojawienia się np. dwóch „jedynek" na polach oznaczonych indeksem górnym i dolnym.

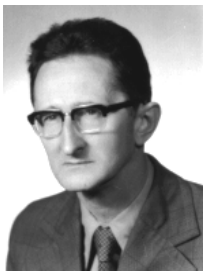
LITERATURA

[1] Będkowski L., Dąbrowski T.: *Aktywne utrzymywanie niezawodności efektu 2-progową metodą diagnostyczno-terapeutyczną.* XXXVI Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk, 7÷12.01.2008, ss. 38÷49.

[2] Bednarek M., Będkowski L., Dąbrowski T.: *Wybrane aspekty implementacji aktywnego utrzymywania niezawodności efektu metodą 2-progową.* XXXVI Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk, 7÷12.01.2008, s. 29÷37.

[3] Bednarek M., Będkowski L., Dąbrowski T.: *Wieloprocesowe ujęcie eksploatacji układu komunikacji*, Diagnostyka, nr 34/2005.

[4] Dokumentacja techniczna pakietu *Wonderware InTouch.*



Prof. dr hab. inż. **Lesław BĘDKOWSKI** pracuje na Wydziale Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Jest specjalistą w zakresie teorii diagnostyki technicznej, diagnostyki systemów antropotechnicznych, teorii użytkowania w ujęciu wieloprocesowym oraz diagnostyki systemów bezpieczeństwa.

Dr hab. inż. **Tadeusz DĄBROWSKI** jest profesorem nadzwyczajnym i pełni funkcję dyrektora Instytutu Systemów Elektronicznych Wydziału Elektroniki WAT. Zainteresowania naukowe koncentruje w obszarze teorii eksploatacji - a w tym głównie na zagadnieniach diagnostyki technicznej obiektów i systemów antropotechnicznych.

Dr inż. **Marcin BEDNAREK** jest adiunktem w Katedrze Informatyki i Automatyki Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej. Specjalizuje się głównie w diagnostyce systemów komunikacji oraz w przemysłowych sieciach komputerowych.

METODY I UKŁADY PRZECIWDESTRUKCYJNE ORAZ DIAGNOSTYCZNE W SYSTEMACH TRANSMISJI INFORMACJI

Marcin BEDNAREK[*], Lesław BĘDKOWSKI[**], Tadeusz DĄBROWSKI[**]

[*]Katedra Informatyki i Automatyki, Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Rzeszowska, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, fax: 017 854 29 10, e-mail: bednarek@prz.rzeszow.pl
[**]Instytut Systemów Elektronicznych, Wydział Elektroniki
Wojskowa Akademia Techniczna, ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, fax: 022 683 91 25,
e-mail: lbedkowski@wel.wat.edu.pl, tdabrowski@wel.wat.edu.pl

Streszczenie

W pracy scharakteryzowano rozproszony system diagnostyczny. Przedstawiono wieloprocesowe ujęcie i sposoby diagnozowania systemu z transmisją komunikatów. Objaśniono metodę diagnozowania komparacyjnego i progowego systemu z transmisją informacji.

Słowa kluczowe: system transmisji, diagnozowanie komparacyjne, diagnozowanie progowe.

ANTI-DESTRUCTIVE AND DIAGNOSTIC METHODS IN TRANSMISSION SYSTEMS OF INFORMATION

Summary

The distributed diagnostic system is briefly characterized. A multiprocess approach and methods of diagnosing of messages system transmission are given. The methods of comparative diagnosing and threshold diagnosing of messages transmission system are described.

Keywords: transmission system, comparative diagnosing, threshold diagnosing.

1. WPROWADZENIE

W użytkowej fazie eksploatacji dowolnego obiektu technicznego, oprócz procesu użytkowania, prowadzącego do zrealizowania zadania użytkowego można wyróżnić dwa towarzyszące sobie procesy [1, 2]:

- proces destrukcyjny, prowadzący do utraty zdatności i przeciwdziałający zrealizowaniu zadania;
- proces przeciwdestrukcyjny, obejmujący pozyskiwanie informacji i wszelkie działania hamujące lub przerywające proces destrukcyjny oraz naprawiające jego negatywne skutki.

W procesie destrukcyjnym można wyodrębnić trzy podprocesy składowe: proces inicjujący, uszkodzeniowy i awaryjny.

Procesem inicjującym jest uaktywnianie się wewnętrznych lub zewnętrznych czynników wyzwalających proces uszkodzeniowy. Czynniki wewnętrzne związane są przede wszystkim z procesem użytkowania. Mogą to być np. błędy operatora (błędy sterowania), przeciążenia elektryczne itp. Zazwyczaj czynniki zewnętrzne związane są z niesprzyjającym oddziaływaniem otoczenia (np. wpływ silnych pól elektromagnetycznych itp.).

Kolejnym podprocesem procesu destrukcyjnego jest proces uszkodzeniowy, który poprzedza i prowadzi do stanu braku możliwości zrealizowania lub dokończenia zadania użytkowego – czyli do stanu niezdatności.

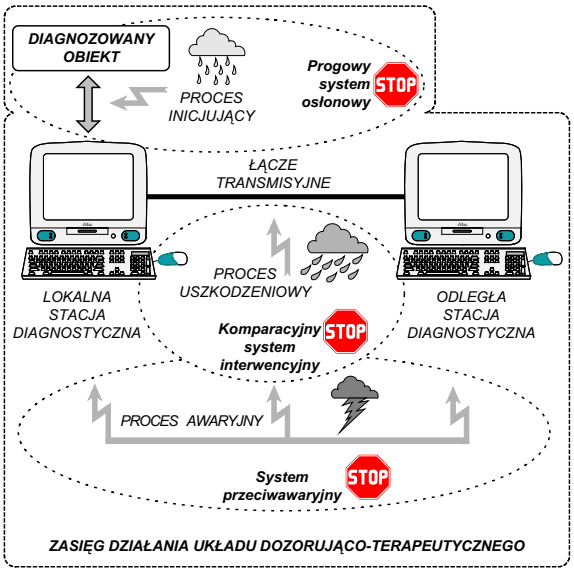
Po osiągnięciu pewnego poziomu proces uszkodzeniowy może zatrzymać się samoczynnie (stan niezdatności stabilnej) lub trwać nadal (stan niezdatności niestabilnej). Proces uszkodzeniowy przechodzi w proces awaryjny od chwili, w której przerwanie procesu staje się już niemożliwe.

Dlatego bardzo ważnym czynnikiem staje się wyposażenie obiektów w systemy dozorująco-terapeutyczne, które powinny dawać możliwość wykrycia i przerwania procesu uszkodzeniowego w wystarczająco wczesnej fazie rozwoju (rys. 1). Ich zadaniem jest generacja odpowiednich procesów: osłonowego, interwencyjnego i przeciwawaryjnego – tj. procesów antagonistycznych do procesów uszkodzeniowych. Funkcje te realizują odpowiednio podsystemy:

- osłonowy PO – określany jako zespół metod i środków zapobiegających uaktywnianiu się czynników wyzwalających procesy uszkodzeniowe;
- interwencyjny PI – definiowany jako zespół działań i środków aktywizujących czynniki interwencyjne (wszystkie działania, które spowalniają, zatrzymują lub nawet odwracają proces uszkodzeniowy);
- przeciwawaryjny PPA – traktowany jako zespół działań i środków aktywizujących czynniki ratunkowe ograniczające skutki awarii.

Należy podkreślić, że we wszystkich podsystemach systemu dozorująco-terapeutycznego istotną rolę odgrywają układy dozorujące.

Rozpatrzmy układ pokazany na rys. 1. System diagnostyczny składa się z lokalnej i odległej stacji diagnostycznej. W lokalnej stacji odbywa się pierwszy z etapów łańcucha działań diagnostycznych, czyli badanie diagnostyczne, natomiast w odległej – pozostałe etapy związane z wnioskowaniem diagnostycznym. Stacje wymieniają pomiędzy sobą informacje przy pomocy systemu transmisji komunikatów. Może to być np. zwykła lokalna sieć komputerowa albo sieć przemysłowa.

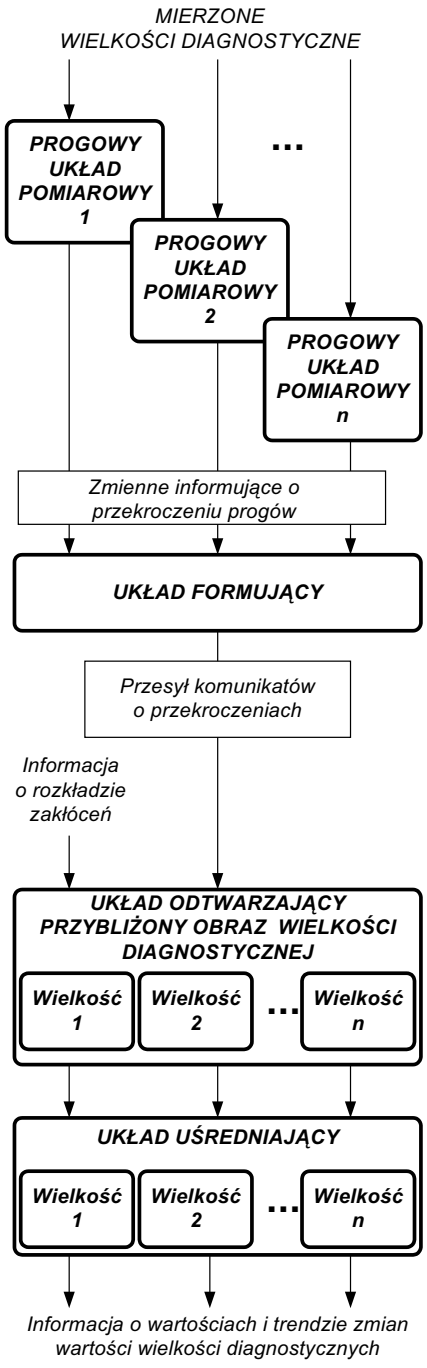


Rys. 1. Zasięg działania systemów przeciwdestrukcyjnych

Utrzymanie obiektu technicznego w stanie zdatności zależy istotnie od procedur dozorowania i terapii, wykorzystywanych w procesie przeciwdestrukcyjnym. Propozycja odpowiedniej metody dozorowania spełniającej wymagania systemu osłonowego i interwencyjnego w obiekcie z transmisją informacji jest zasadniczym tematem niniejszych rozważań. W konsekwencji w dalszej części opracowania scharakteryzowano rozwiązanie ***osłonowego systemu progowego*** (dla części lokalnej) oraz ***komparacyjnego systemu interwencyjnego*** (dla komunikacji pomiędzy stacjami). Na rys. 1 zaznaczono miejsca podatne na zakłócenia w rozproszonym systemie diagnostycznym. Spośród trzech podsystemów zapewniających poprawność komunikacji w artykule rozpatruje się głównie system interwencyjny zabezpieczający niezawodność transmisji informacji. Przyjęto, że działania osłonowe bierne i czynne (np. sprawdzanie parzystości, sumy kontrolne, itp.) oraz przeciwawaryjne (np. przełączenie na alternatywny tor komunikacyjny, emisja informacji dla operatora) dotyczące toru transmisyjnego dostarcza normalny protokół komunikacyjny oferując standardowe mechanizmy zabezpieczające [8].

2. OSŁONOWY SYSTEM PROGOWY

Na rys. 1 przedstawiono schemat działania osłonowego systemu progowego. Ze względu na obszerność opisu metody diagnozowania opartej na progowych układach pomiarowych tu podajemy jedynie jej zgrubną charakterystykę. Szerzej temat diagnozowania progowego przedstawiony jest w pracach [3, 4].



Rys. 2. Zasada działania osłonowego systemu progowego

Działanie osłonowe systemu wyposażonego w mechanizmy diagnozowania progowego polega na braku reakcji (na wyjściu systemu) na pojawiające się zakłócenia zaburzające funkcjonowanie układu dozorująco-terapeutycznego ale niezaburzające funkcjonowania obiektu. W konsekwencji unika się błędnego przerywania funkcjonowania obiektu.

Jeśli stan obiektu opisywany jest dużą liczbą wielkości wymagających dozorowania oraz konieczne jest dozorowanie wszystkich elementów systemu użytkowania, to układ dozorujący staje się złożony i kosztowny. Przemawia to za stosowaniem najprostszych układów pomiarowych - układów progowych. Opracowana metoda „dozorowania progowego" czyni osłonowy system dozorująco-terapeutyczny odpornym nawet na silne zakłócenia. W zależności od liczby poziomów-progów rozróżnianych przez system progowy można wyróżnić diagnozowanie dwuprogowe (2 progi) lub n-progowe (n progów).

Metoda pozwala na obserwację zmian wielkości opisującej stan obiektu na podstawie dozorowania zakłóconej wielkości z określoną niepewnością i dokładnością.

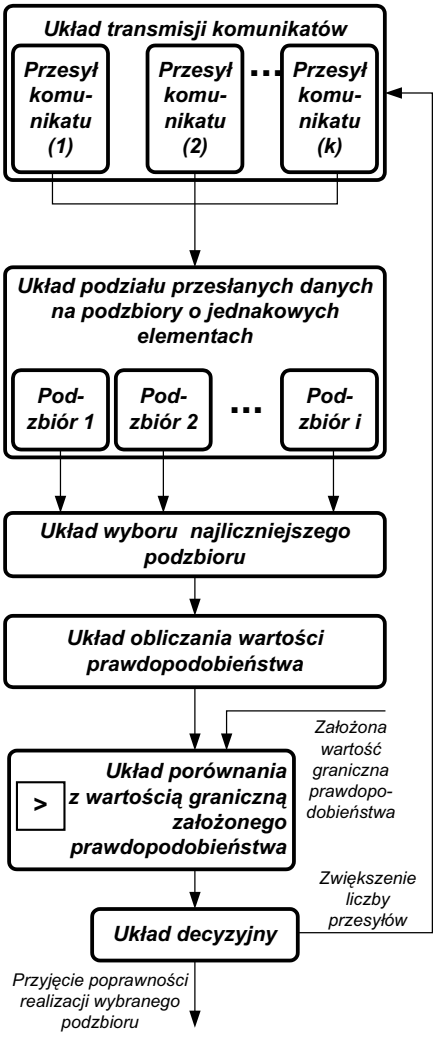
Dozorowanie opiera się na obserwacji wartości wielkości opisujących stan (tj. wartości wielkości diagnostycznych) $X_1(t), X_2(t), \ldots, X_n(t)$. Informacja o stanie obiektu przesyłana jest w postaci komunikatów o przekroczeniach progów pomiarowych przez dozorowane wielkości diagnostyczne, przy czym nieznany jest rzeczywisty przebieg wartości $X_i(t)$, (indeks i oznacza numer monitorowanej wielkości opisującej). Przygotowaniem informacji do przesyłu zajmuje się układ formujący, dokonujący niezbędnego „upakowania" danych przeznaczonych do wysłania do stacji odległej (rys. 2). W wyniku operacji obliczeniowych, wykorzystujących przesłane informacje oraz przybliżoną znajomość rozkładu nakładających się zakłóceń, tworzone są podstawowe obrazy wielkości opisujących stan, odpowiednio: $X'_1(t), X'_2(t), \ldots, X'_n(t)$. W niektórych przypadkach (przy dużej wariancji zakłóceń) uzasadnione jest tworzenie wtórnych, uśrednionych obrazów wielkości opisujących $X''_1(t), X''_2(t), \ldots, X''_n(t)$.

Informacja o wartościach poszczególnych wielkości opisujących $X_i''(t)$ oraz o trendzie zmian tych wartości w określonym przedziale czasu stanowi podstawę prognozy o ewentualnej tendencji przejścia obiektu do niepożądanego stanu.

Dzięki procedurom działań osłonowych standardowych oraz diagnostycznego systemu progowego następuje osłabienie (a niekiedy nawet eliminacja) wpływu czynników inicjujących procesy destrukcyjne (zakłócające) już na samym początku łańcucha działań diagnostyczno-terapeutycznych. Procedury osłonowe są realizowane zarówno w stacji lokalnej jak i odległej.

3. KOMPARACYJNY SYSTEM INTERWENCYJNY

Informacje pochodzące od stacji lokalnej są przesyłane do stacji odległej. Wśród nich znajdują się komunikaty zawierające indeksy progowe, które stanowią podstawę działań obliczeniowych progowego systemu osłonowego w stacji odległej. Podczas przesyłu narażone są one na destrukcyjne oddziaływanie ze strony czynników inicjujących procesy uszkodzeniowe, niewychwycone przez mechanizmy zawarte w samym protokole komunikacyjnym. Algorytmy stacji odległej na ogół nie posiadają wzorca przesyłanej informacji. W takim przypadku odpowiednim rozwiązaniem jest użycie komparacyjnego systemu interwencyjnego, którego zadaniem jest m.in. diagnozowanie komparacyjne [5, 6, 7].



Rys. 3. Zasada działania interwencyjnego systemu komparacyjnego

Diagnozowanie komparacyjne opiera się na porównaniu (komparacji) efektów (tj. zawartości kolejnych komunikatów) wytwarzanych sekwencyjnie przez obiekt (tj. przez system transmisji komunikatów). Algorytm tego działania ilustruje rys. 3.

Układ transmisji komunikatów ma możliwość wielokrotnego powtarzania procesu wytwarzania efektu, czyli wielokrotnego przesyłu komunikatów. W przypadku zakłóceń pojawiających się podczas transmisji zawartość wyjściowa poszczególnych komunikatów może się różnić. Stacja odległa „nie wie", która z realizacji jest zgodna z pobudzeniem sterującym (tj. odpowiada rzeczywistemu stanowi procesu). Wybór właściwej realizacji dokonywany jest przez układ „większościowego" wyboru czyli w oparciu o wynik komparacji.

W procesie tym otrzymany zbiór komunikatów dzielony jest na podzbiory zawierające komunikaty o identycznej postaci. Zbiór zawierający największą liczbę elementów uważa się za reprezentatywny i na tyle wiarygodny by przyjąć, że zawiera komunikaty prawdziwe.

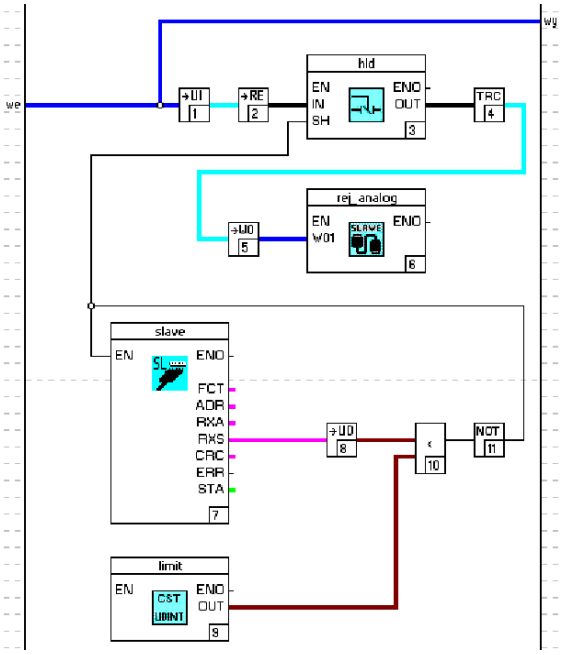
W kolejnych krokach tej procedury obliczane są wartości prawdopodobieństw bezbłędności elementów wybranego podzbioru. W przypadku, gdy kryterialna wartość graniczna prawdopodobieństwa uzasadniająca prawdziwość hipotezy, że wybrany podzbiór zawiera bezbłędne komunikaty, jest mniejsza niż wyliczona dla danego podzbioru to układ decyzyjny podejmuje działania polegające na zwiększaniu liczby przesyłanych komunikatów i na powtarzaniu procesu komparacyjnego. Postępowanie to kończy się z chwilą osiągnięcia kryterialnego poziomu wiarygodności otrzymywanych komunikatów.

4. IMPLEMENTACJA KOMPARACYJNEGO SYSTEMU INTERWENCYJNEGO

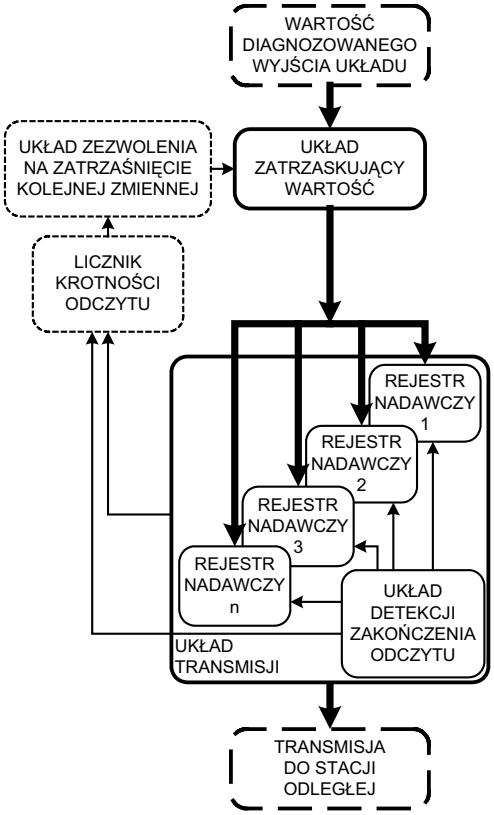
Proponowana implementacja komparacyjnego systemu interwencyjnego dotyczy systemu transmisji komunikatów w stacji lokalnej. System musi gwarantować możliwość kilkakrotnego przesyłu tych samych komunikatów mimo zmieniającej się wartości funkcji opisującej stan. Można to osiągnąć poprzez:

1. Zapis przesyłanej wartości do jednego rejestru nadawczego (tj. do miejsca w pamięci, z którego pobierane są dane do wysłania) i „zatrzaśnięcie" przesyłanej wartości funkcji opisującej na czas trwania kilku przesyłów tej wartości.

Realizację odczytu tylko jednej wartości w wyżej przedstawiony sposób zilustrowano na rys. 4. Schemat wykonano w języku bloków funkcyjnych (FBD) sterownika Digimatik. Wartość wejściowa (*we*) po odpowiedniej konwersji podawana jest na wejście bloku zatrzaskującego (blok ekstrapolatora *hld*), a potem do wejścia bloku reprezentującego rejestr nadawczy (*rej_analog*). Informacja o liczbie dokonanych odczytów uzyskiwana jest z odpowiedniego wyjścia (*RXS*) bloku reprezentującego system nadawczy stacji lokalnej (*slave*). Ta z kolei porównywana jest z zadaną wartością (blok *limit*) wyrażającą wymaganą krotność odczytu tej samej wartości w celu zmiany wartości rejestru oraz wyzerowania licznika powtórzeń (po dokonaniu wszystkich założonych przesyłów).



Rys. 4. Schemat układu systemu komparacyjnego stacji lokalnej złożonego z bloków funkcyjnych – wariant 1



Rys. 5. Szkic sposobu implementacji systemu komparacyjnego stacji lokalnej – wariant 2

2. Zapis wartości do kilku rejestrów nadawczych i dokonanie z nich odczytu przez stację odległą za pomocą kilku kolejnych komunikatów (każdy odczyt dotyczy innego rejestru).

Sposób implementacji drugiego wariantu przedstawiono szkicowo na rys. 5. Tutaj podobnie: układ detekcji zakończenia odczytu wszystkich rejestrów steruje licznikiem odczytów, a ten z kolei wyznacza liczbę odczytów. Przez czas trwania tych odczytów przesyłana wartość jest „zatrzaśnięta". Odczytu można dokonać za pomocą komunikatów zawierających pojedyncze wartości kolejnych rejestrów lub zapytania o kilka wartości rejestrów w jednym komunikacie.

5. PODSUMOWANIE

W artykule zaproponowano autorskie, wieloprocesowe ujęcie eksploatacji systemu z transmisją komunikatów. Zaproponowano zastosowanie podsystemu komparacyjnego jako generatora działań interwencyjnych i progowego układu pomiarowo-przetwarzającego jako elementu wzmacniającego osłonę przed czynnikami destrukcyjnymi. Warto podkreślić, że obydwa przedstawione podsystemy dozorująco-terapeutyczne uzupełniają się wzajemnie w działaniach przeciwdestrukcyjnych. Wskazując zalety i wady poszczególnych systemów można kierować się danymi zamieszczonymi w tab. 1, w której zamieszczono zestawienie porównawcze wybranych cech metod diagnozowania wykorzystywanych przez systemy przedstawione w artykule. Posłużono się w nim trójwartościową skalą oceny poszczególnych własności systemu przeciwdestrukcyjnego.

Tab. 1. Zestawienie porównawcze metod diagnozowania

Cecha charakterystyczna	Komparacyjna	Progowa
Skomplikowanie układu pomiarowego	S	N
Skomplikowanie układu formującego	T	S
Wykorzystanie stand. funkcji oprogram.	N	T
Odporność na zakłócenia sygnału pomiar.	S	T
Działanie osłonowe	N	T
Działanie interwencyjne	T	N
Znajomość wartości odniesienia	N	T
Odporność na zakłócenia transmisji	T	N
Znajomość typu i param. rozkładu zakłóceń	N	T

Ozn.: „T" – tak; „N" – nie; „S" – w pewnym stopniu

LITERATURA

[1] Dąbrowski T.: *Diagnozowanie systemów antropotechnicznych w ujęciu potencjałowo-efektowym.* Wyd. WAT, Warszawa 2001, s. 247

[2] Bednarek M., Będkowski L., Dąbrowski T.: *Wieloprocesowe ujęcie eksploatacji układu komunikacji*. Diagnostyka, PTDT, Vol. 34, 2005, str. 31÷36.

[3] Będkowski L., Dąbrowski T: *Aktywne utrzymywanie niezawodności efektu 2-progową metodą diagnostyczno-terapeutyczną.* Materiały XXXVI Zimowej Szkoły Niezawodności, Szczyrk, 7÷12.01.2008, str. 38÷49

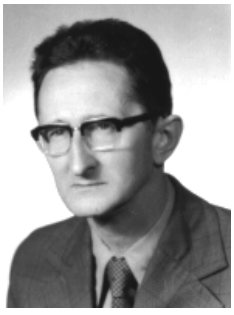
[4] Bednarek M., Będkowski L., Dąbrowski T: *Wybrane aspekty implementacji aktywnego utrzymywania niezawodności efektu metodą 2-progową.* Materiały XXXVI Zimowej Szkoły Niezawodności, Szczyrk, 7÷12.01.2008, str. 29÷37

[5] Będkowski L., Dąbrowski T.*: Wpływ komparacyjnego diagnozowania efektu na niezawodność systemu*. Materiały XXXIV Zimowej Szkoły Niezawodności, Szczyrk 9÷14 stycznia 2006, ss.10.

[6] Bednarek M. Będkowski L., Dąbrowski T: *Komparacyjne diagnozowanie układu komunika-cji.* Diagnostyka, PTDT, Vol 42, 2007, str. 69÷74.

[7] Będkowski L.: *Diagnozowanie z dwupoziomową komparacją niepewnych symptomów i syndromu stanu obiektu.* Diagnostyka, PTDT, Vol. 38, 2006. str. 109÷114.

[8] Bednarek M., Będkowski L., Dąbrowski T.: *Wybrane funkcje systemu dozorująco-terapeutycznego w układzie komunikacji*. Diagnostyka, PTDT, Vol. 34, 2005.



Prof. dr hab. inż. **Lesław BĘDKOWSKI** jest nauczycielem akademickim na Wydziale Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Zainteresowania naukowe Profesora skupiają się głównie wokół następujących problemów: teoria diagnostyki technicznej, optymalizacja procedur diagnostycznych, diagnostyka systemów antropotechnicznych, diagnostyka w ujęciu potencjałowo-efektowym, teoria użytkowania w ujęciu wieloprocesowym, wielopoziomowe systemy dozorująco-terapeutyczne, diagnostyka bezpieczeństwa.

Dr hab. inż. **Tadeusz DĄBROWSKI** jest zatrudniony na stanowisku profesora nadzwyczajnego i pełni funkcję dyrektora Instytutu Systemów Elektronicznych Wydziału Elektroniki WAT. Zainteresowania naukowe koncentruje w obszarze teorii eksploatacji – zwłaszcza diagnostyki 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** 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.

PROGNOZOWANIE STANU OBRABIAREK NA PODSTAWIE BADAŃ ICH DOKŁADNOŚCI

Michał STYP-REKOWSKI

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Mechaniczny
al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, msr@utp.edu.pl

Streszczenie

W artykule przeprowadzono analizę struktury obrabiarek w aspekcie diagnozowania ich stanu. Zaproponowano wielkości charakterystyczne jako symptomy stanu obrabiarek. Przedstawiono także podstawy badania dokładności obrabiarek w oparciu o ocenę rezultatów obróbki przedmiotów próbnych. Wykazano, że wyniki badań dokładności obrabiarek można wykorzystać do opracowania prognozy dotyczącej ich stanu. Umożliwia to przedstawiona w artykule procedura wykorzystująca rezultaty cyklu badań dokładności obrabiarki.

Słowa kluczowe: badania dokładności obrabiarek, diagnozowanie, prognozowanie.

FORECASTING OF MACHINE-TOOLS STATE ON THE BASE OF THEIR ACCURACY

Summary

In this paper analysis of machine-tools in the diagnostics aspects was conducted. Some charcteristic quantities as symptom of their state, were proposed. One introduced also basic of accuracy tests of machine toools on the ground of estimation of results of tentative object machining. It was demonstrated that results of cycle of machine tools accuracy tests one can use to work out of forecast of considering machine tools' state. Presented in this paper procedure, in which one used results of cycle of accuracy tests, makes it possible

Key words: machine tools accuracy test, diagnostic routine, forecasting.

1. WPROWADZENIE

W przemyśle wszelkich praktycznie branż obrabiarki skrawające stanowią jedną z najliczniejszych grup maszyn technologicznych. Zadania jakie one spełniają czyni ich diagnozowanie istotnym zagadnieniem technicznym i ekonomicznym. Z tego powodu badania dokładności maszyn powinny być zasadniczym elementem diagnostyki obrabiarek. Przytoczone argumenty spowodowały, że maszyny z tej grupy stanowią obiekty licznych badań i analiz technicznych.

Badania diagnostyczne wszelkich obiektów technicznych, w tym maszyn technologicznych, mają na celu przede wszystkim określenie ich bieżącego stanu technicznego. Powinny one ponadto umożliwiać ustalenie przyczyn tego stanu (genezy) oraz wnioskowanie odnośnie jego przyszłości (prognozowanie). Ta ostatnia faza wymaga znajomości historii wielkości diagnostycznych przyjętych jako symptomy stanu. Dzięki niej możliwe jest oszacowanie czasu dalszego niezawodnego użytkowania maszyny i/lub wartości wykonanej przez nią w przyszłości pracy w przyjętych jednostkach (liczba sztuk, ich wartość, objętość, itp.). Prognozowanie jest więc bardzo istotnym elementem diagnostyki, niezbędnym do podejmowania decyzji o dającej się przewidzieć przyszłości maszyny.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono rozważania dotyczące wykorzystania znormalizowanych badań dokładności obrabiarek w prognozowaniu ich stanu. Wiele elementów wspólnych występujących w diagnozowaniu (wraz z prognozowaniem) i wspomnianych badaniach potwierdza hipotetyczne możliwości praktycznego zastosowania omawianych badań obrabiarek w szeroko pojętej ich diagnostyce eksploatacyjnej.

2. WIELKOŚCI DIAGNOSTYCZNE STANU OBRABIARKI

Rozpatrując obrabiarkę jako całość (jeden obiekt techniczny), w jej strukturze można zidentyfikować szereg zespołów funkcyjnych [9]. Stan techniczny zespołów determinuje rezultaty działania obrabiarki, które najczęściej rozpatrywane są w aspektach: technicznym (dokładność obróbki, powtarzalność) i ekonomicznym (wydajność). W zależności od takich czynników, jak np.: rodzaj obrabiarki, złożoność jej budowy, wpływ ten jest zróżnicowany. Funkcje i zadania podstawowych zespołów obrabiarek wyznaczają hierarchię ich znaczenia. Stosując kryteria diagnostyczne można przyjąć, że jest ona następująca:

- zespół nośny – korpus, rama,
- wrzeciennik,
- zespół przemieszczania narzędzi.

Wymienione zespoły występują w strukturze wszystkich rodzajów obrabiarek i mają bezpośredni wpływ na rezultaty ich pracy, w tym na dokładność wykonania obrabianego elementu. W konsekwencji więc - determinują one jakość produktu finalnego.

Ze względu na zróżnicowane zadania, dla każdego z wymienionych zespołów inne są wielkości służące do opisu ich bieżącego stanu technicznego, przyjmowane w procesie diagnozowania obrabiarek oraz poszczególnych ich zespołów jako symptomy stanu.

Pierwszym z wymienionych jest zespół nośny. W obrabiarkach występuje on najczęściej w formie korpusu, ramy lub płyty podstawy. Podstawowymi cechami wymaganymi od dobrze skonstruowanego korpusu są:

- sztywność statyczna rozumiana jako odporność na działanie zdeterminowanych sił zewnętrznych; wyrażana jest ona umownym wskaźnikiem sztywności,
- niezmienność wymiarów czyli odporność na działanie czynników termicznych i czasu (np. w rezultacie pełzania lub samoistnego odprężania bądź sezonowania), oraz zewnętrznych sił o charakterze losowym.

Przedstawione powyżej cechy korpusów wszelkich maszyn technologicznych stanowią podstawowe czynniki, które determinują dokładność wytwarzanych na nich elementów, a tym samym wyznaczają jakość maszyn, w których strukturze występują. Ponieważ ich dobór odbywa się w fazie projektowania i konstruowania zatem wielkości opisujące cechy można uznać za elementy diagnostyki konstrukcyjnej [13].

Drugi z wymienionych zespołów funkcyjnych obrabiarki – wrzeciennik, to zespół o bardzo dużym znaczeniu, przede wszystkim dla jej możliwości technologicznych.

Realizowane przez zespół wrzecionowy zadania określają wielkości istotne dla prawidłowego działania wrzeciennika. W aspekcie diagnozowania dokładności obrabiarek za istotne cechy diagnostyczne wrzeciennika należy uznać:

- prędkość obrotową wrzeciona,
- jego dokładność ruchową,
- sztywność zespołu.

Kształtuje się je w fazie konstruowania obrabiarek. Wielkości charakteryzujące te cechy można więc uznać za kolejne elementy diagnostyki konstrukcyjnej.

Do zaistnienia obróbki na obrabiarkach skrawających niezbędne jest przemieszczanie się narzędzia względem obrabianego przedmiotu. W zależności od rodzaju obrabiarki ruch wykonuje narzędzie lub przedmiot obrabiany. W szczególnych przypadkach obydwa ruchy występują jednocześnie. Z kinematyki wynika istotność zespołu przemieszczającego narzędzie lub/i obrabiany przedmiot w procesie obróbki. W diagnostycznej ocenie parametrów ruchu przydatne mogą być następujące cechy:

- stałość prędkości (jej równomierność),
- dokładność ruchu po założonej trajektorii,
- opory ruchu.

W obecnie wytwarzanych obrabiarkach najczęściej stosuje się prowadnice toczne. Oprócz satysfakcjonującego poziomu wymienionych cech ruchowych charakteryzują się one dużą sztywnością i większą niż prowadnice ślizgowe trwałością.

Analizując działanie zespołu przemieszczania narzędzi lub/i przedmiotu obrabianego w aspekcie diagnozowania obrabiarki jako całości, za sygnały diagnostyczne można przyjąć odchyłki rzeczywistego toru przemieszczeń od nominalnego. Funkcjonowanie tego właśnie zespołu oraz wrzeciennika determinuje bardzo silnie końcowy rezultat obróbki, a więc stan produktu finalnego.

3. DIAGNOZOWANIE OBRABIAREK

Stan zespołów roboczych obrabiarek bezpośrednio wpływa na rezultaty obróbki, zarówno zakresie dokładności obrabianych elementów jak i wydajności obróbki. Szczególnie istotny jest pierwszy z wymienionych aspektów, stąd też duża waga, jaką przykłada się do badań obrabiarek w tym zakresie. W przypadku diagnozowania stanu obrabiarek bardzo przydatne okazują się badania dokładności obrabiarki. Polegają one na obróbce przedmiotu próbnego o ściśle zdefiniowanej postaci konstrukcyjnej i porównaniu uzyskanych wartości geometrycznych cech konstrukcyjnych z ich wartościami nominalnymi. Porównanie takie pozwala wnioskować o aktualnym stanie technicznym obrabiarki i jej zespołów funkcyjnych.

Aby umożliwić porównanie obrabiarek wytwarzanych przez różnych producentów stawiane im wymagania ujednolicono a procedury badań dokładności znormalizowano. Normy dotyczą poszczególnych rodzajów obrabiarek i zawarte są w dokumentach krajowych, np. [5, 6] i międzynarodowych, np. [4, 7].

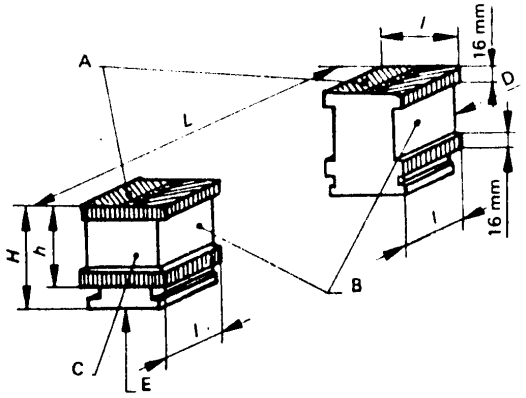
W celu pełnego zdiagnozowania obrabiarki skrawającej należy określić standardowe cechy jej stanu:

- parametry geometryczne obrabiarek jako całości,
- dokładność przemieszczeń poszczególnych ruchowych zespołów funkcyjnych obrabiarek,
- parametry stereometryczne przedmiotów obrabianych w określonych warunkach i porównanie ich z wartościami nominalnymi (tzw. próba pracą).

Pierwsze dwie grupy pomiarów geometrycznych dotyczą samej obrabiarki i polegają na sprawdzaniu wymiarów, kształtów, położeń oraz względnych ruchów zasadniczych jej zespołów i części składowych w odniesieniu do nominalnych linii i powierzchni teoretycznych. Wyniki tych badań mogą niewątpliwie stanowić element oceny jakości obrabiarki. Dla celów diagnostycznych w aspekcie dokładności obróbki, rezultaty te mają jednak

mniejsze znaczenie gdyż nie muszą bezpośrednio przekładać się na dokładność obrabianych przedmiotów - odchyłki mogą się sumować lub odejmować, zniekształcając ocenę.

Ostatnia, trzecia grupa badań obrabiarki – próba pracą – ma odmienny charakter. Podczas tych badań obróbce poddaje się przedmioty próbne a następnie ocenia się jej rezultaty. Sprawdza się zgodność uzyskanych wartości geometrycznych cech konstrukcyjnych z wartościami nominalnymi. Liczba i kształt przedmiotów próbnych dla poszczególnych rodzajów obrabiarek są różne i zależą od zakresu możliwości obróbkowych maszyny. Przy małej liczbie potencjalnie możliwych operacji technologicznych są one prostsze, przy większej – bardziej złożone. Porównanie przedstawionych na rys. 1 i 2 geometrycznych cech konstrukcyjnych przedmiotów próbnych do badań dokładności frezarki i frezarskiego centrum obróbkowego potwierdzają to spostrzeżenie.



Rys. 1. Geometryczne cechy konstrukcyjne przedmiotu próbnego do badania dokładności frezarek pracą [5]

Część wymiarów przedmiotów próbnych nie jest w normach ściśle określona. Podane są w nich zwykle przedziały wymiarów, w których powinny się one zawierać. Dla różnych odmian wymiarowych obrabiarek wartości poszczególnych wymiarów przytoczonych na rysunku mają różne wartości; różne są także ich wzajemne relacje. Normy zawierają także dopuszczalne wartości odchyłek wymiarów uzyskanych w rezultacie obróbki

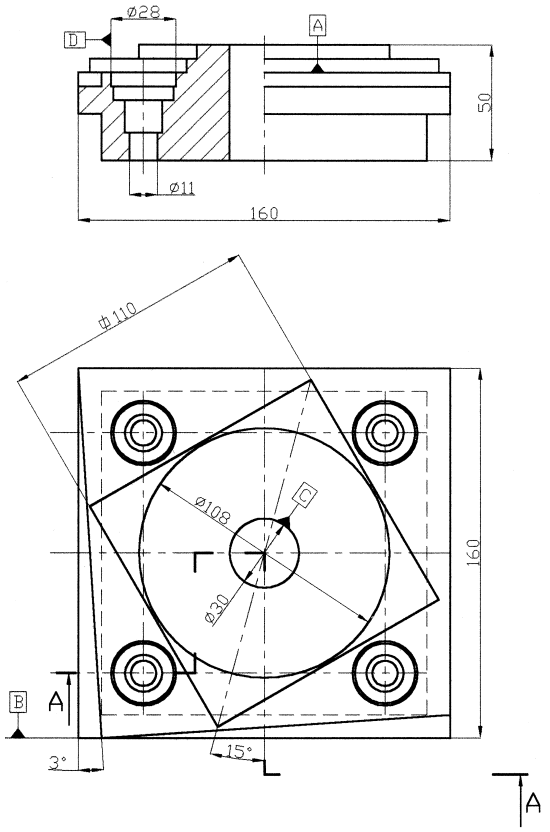
Pomiary niezbędne do sprawdzenia geometrycznych cech konstrukcyjnych przedmiotów próbnych obrobionych na frezarskim centrum obróbkowym zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Zestawienie pomiarów obrobionych fragmentów przedmiotu próbnego, wg [7]

Lp.	Mierzony fragment przedmiotu	Rodzaj pomiaru
1.	Otwór środkowy	- walcowość - prostopadłość osi otworu do bazy A
2.	Kwadrat zewnętrzny	- prostoliniowość boków - prostopadłość przylegających boków do bazy B - równoległość przeciwległego boku do bazy B
3.	Kwadrat górny (15^o)	- prostoliniowość boków - dokładność kąta 75o w stosunku do bazy B
4.	Okrąg	- okrągłość - współosiowość okręgów: zewnętrznego i wewnętrznego
5.	Powierzchnie skośne (3^o)	- prostoliniowość czół - dokładność kąta w stosunku do bazy B
6.	Otwory pogłębione	- położenie otworów w stosunku do bazy C - współosiowość otworów pogłębionych i otworu wewnętrznego

Ten rodzaj maszyn technologicznych coraz częściej występuje w parkach maszynowych przedsiębiorstw wszelkich gałęzi przemysłu gdyż łączą możliwości obróbkowe kilku obrabiarek różnego typu. Z tego powodu struktura centrów obróbkowych jest rozbudowana a trajektorie względnych ruchów narzędzi i przedmiotu obrabianego – złożone. Wymienione czynniki powodują, że przedmiot próbny jest geometrycznie bardziej skomplikowany niż dla obrabiarek realizujących jeden podstawowy typ operacji technologicznych (tokarki, frezarki itp.). Powinny one umożliwić pomiar wszystkich wielkości istotnych dla oceny dokładności obróbki realizowanej na centrum.

Uzyskane wyniki pomiarów powinny być przydatne także do wnioskowania diagnostycznego dotyczącego różnych obrabiarek o możliwościach obróbkowych równoważnych centrum.



Rys. 2. Postać konstrukcyjna i najistotniejsze wymiary przedmiotu próbnego do badania dokładności centrów obróbkowych z zaznaczonymi bazami obróbkowymi [7]

Cytowane normy przedmiotowe dla różnych typów obrabiarek, np. [5, 6, 7] zawierają warunki obróbki przedmiotów próbnych. W normie [4] podano ponadto informacje dotyczące przygotowania obrabiarki do prób oraz sposób przeprowadzania pomiarów. Taki zbiór informacji, łącznie z wynikami pomiarów, jest niezbędny do wnioskowania o aktualnym stanie obrabiarki a więc do realizacji podstawowego zadania diagnostyki operacyjnej (*PZDO*) [8]. Prognozowanie odnośnie dalszej pracy obrabiarki wymaga dodatkowo zbioru informacji o przebiegu zachodzących zjawisk, tzw. historii sygnału [1, 11]. Im ten zbiór będzie liczniejszy, tym większe prawdopodobieństwo trafności prognozy.

Uzyskane wyniki badań dokładności analizuje się w układzie dwuwartościowym: dobre – złe, przy czym pierwszy przypadek zachodzi, gdy między odchyłką stwierdzoną (rzeczywistą) $\boldsymbol{T_{rzecz}}$ a odchyłką dopuszczalną $\boldsymbol{T_{dop}}$ zachodzi relacja:

$$T_{rzecz} \leq T_{dop} \qquad (1)$$

W przypadku, gdy zachodzi przypadek odmienny, a więc gdy:

$$T_{rzecz} > T_{dop} \qquad (2)$$

mamy do czynienia z błędem wykonania a więc z przedmiotem wadliwym.

Wyniki badań dokładności można wykorzystać do celów diagnostycznych – na podstawie uzyskanych rezultatów możliwe jest bezpośrednie wnioskowanie o stanie technicznym obrabiarki [8]. W pierwszym z przytoczonych przypadków, przy spełnionym warunku (*1*), obrabiarka jest w stanie zdatnym, natomiast w drugim, wg (2) – w stanie niezdatnym do realizacji postawionych zadań. Należy jednak nadmienić, że stwierdzenie to jest prawdziwe o ile nie zidentyfikowano innych przyczyn niewłaściwych cech wykonanego elementu próbnego, np. złe zamocowanie obrabianego elementu.

Zmierzone wartości odchyłek wykonawczych przedmiotów próbnych mogą świadczyć o stanie poszczególnych zespołów funkcyjnych obrabiarek. Dla przykładu, stwierdzone po obróbce na centrum obróbkowym duże wartości odchyłki prostopadłości płaszczyzn przedmiotu próbnego – rys. 2 – wskazywać będą na niesprawności występującą w zespole przemieszczania narzędzi względem przedmiotu obrabianego. Ich przyczyną mogą być np. luzy w prowadnicach wymagające wykasowania.

Nadmierne odchyłki prostoliniowości krawędzi lub płaskości powierzchni świadczyć będą o zużyciu elementów prowadnicowych.

Przytoczone przykłady wnioskowania diagnostycznego nie wyczerpują oczywiście możliwości diagnostycznych, w których można wykorzystać rezultaty badań dokładności. Na ich podstawie można jednak stwierdzić, że do pełnego i trafnego diagnozowania niezbędna jest dobra znajomość rozwiązań konstrukcyjnych zastosowanych w badanej obrabiarce oraz zasad jej funkcjonowania. W analizie rezultatów pomiarów, niezbędnej do celów diagnostycznych należy uwzględnić dynamiczne cechy zespołów funkcyjnych obrabiarek oraz procesów na nich realizowanych gdyż mogą one mieć istotny wpływ na uzyskiwane wartości mierzonych wielkości [3, 10].

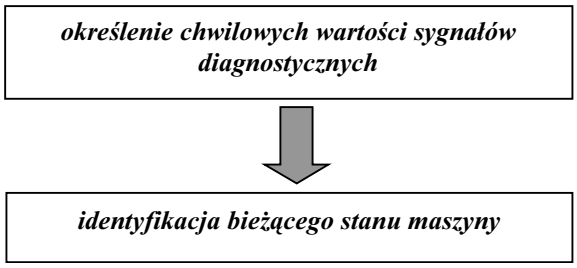
Wyniki cyklu takich badań, przeprowadzonych w pewnych odstępach czasowych proponuje się wykorzystać do prognozowania stanu obrabiarki.

4. PROGNOZOWANIE STANU OBRABIARKI

Działania diagnostyczne, poza określeniem aktualnego (chwilowego) stanu maszyny, powinny obejmować także elementy prognostyczne odnośnie dwóch podstawowych zagadnień:

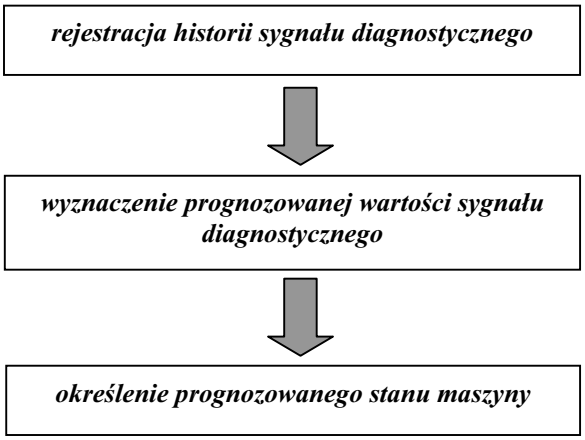
- czasu dalszej skutecznej pracy maszyny.
- terminu kolejnych badań diagnostycznych,

O ile więc zadanie diagnostyczne stanowi następującą sekwencję działań (rys. 3):



Rys. 3. Sekwencja działań niezbędnych dla realizacji PZDO

to uwzględnienie w diagnostyce zadań prognostycznych powoduje rozszerzenie powyższej sekwencji o kolejne elementy - rys. 4:



Rys. 4. Sekwencja diagnostycznych działań prognostycznych, wg [11]

Realizacja działań według powyższych sekwencji jest możliwa wykorzystując przedstawione wyżej badania dokładności obrabiarek skrawających. Pierwsza z sekwencji – diagnozowanie, wymaga przeprowadzenia jednego zestawu badań natomiast w drugim przypadku (prognozowaniu) niezbędne jest przeprowadzenie cyklu badań, przy wyznaczonej ich częstotliwości tak, aby na podstawie analizy wyników można było ekstrapolować wnioskowanie diagnostyczne. Algorytm działań umożliwiających prognozowanie stanu obrabiarek przy wykorzystaniu serii *PZDO*, stanowiących w tym algorytmie ogniwo elementarne, przedstawiono na rys. 5.

Różnorodność wymuszeń zewnętrznych oddziałujących na obrabiarki powoduje, że dla każdego rodzaju obrabiarek skrawających (tokarki, szlifierki itp.) częstotliwość ta będzie inna.

Na podstawie znajomości mechanizmów typowych procesów zużywania można ponadto przyjąć, że częstotliwość ta będzie zróżnicowana: mniejsza w początkowej fazie procesu eksploatowania obrabiarki, większa) – w fazie końcowej. Zachodzi więc relacja:

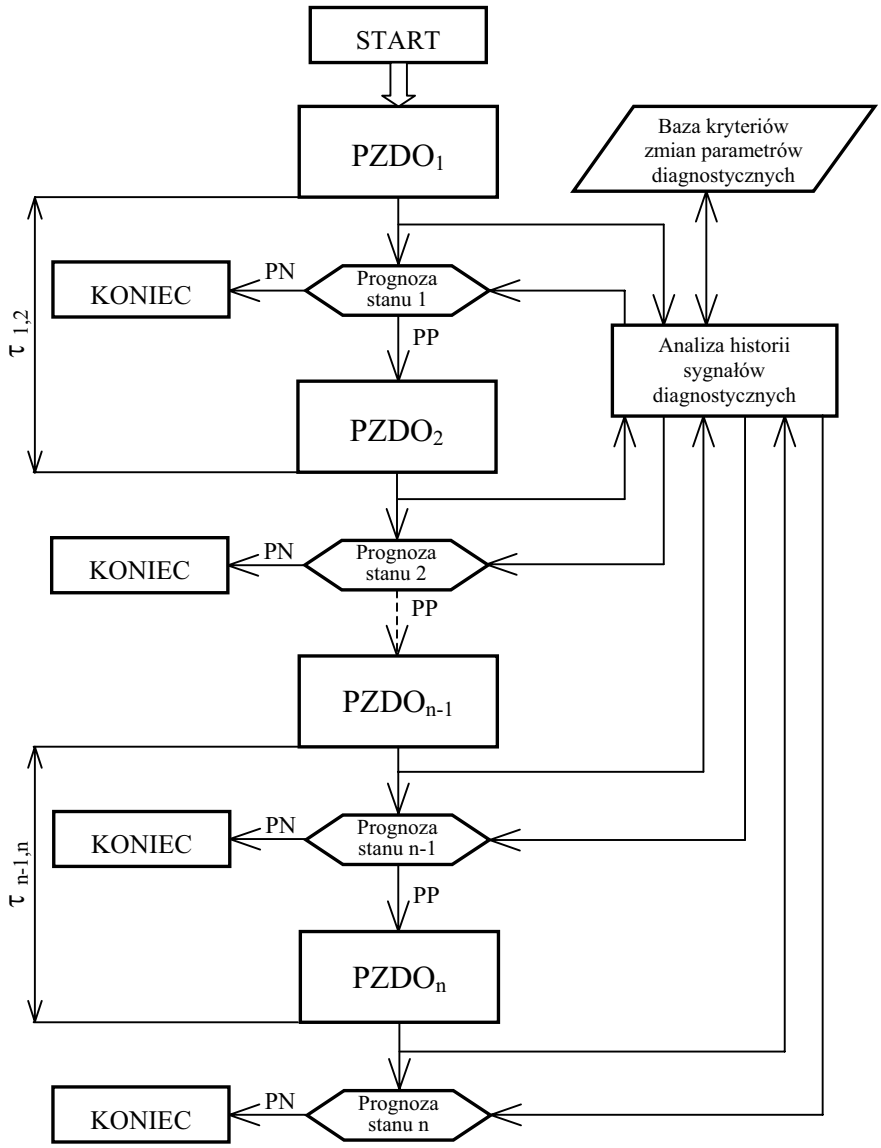
$$\tau_{1,2} > \tau_{(n-1),n} \qquad (3)$$

Czas między kolejnymi *PZDO* wyznacza się na podstawie analizy historii sygnałów diagnostycznych, w której wykorzystuje się kryteria zmian wielkości przyjętych jako sygnały diagnostyczne. Przyjmuje się go w ten sposób aby po wyznaczonym czasie τ_i przewidywane wartości badanych parametrów nie przekraczały wartości dopuszczalnych, a więc aby spełniony był warunek (*1*). Jeżeli po technicznie i ekonomicznie uzasadnionym czasie τ_i przewidywana wartość monitorowanego parametru będzie większa niż dopuszczalna to wówczas prognoza stanu jest negatywna (*PN*) i następuje zakończenie fazy użytkowania obrabiarki (*KONIEC*). W takim przypadku pozostaje podjęcie decyzji odnośnie dalszych jej losów: przekazać do naprawy lub złomować. W przeciwnym przypadku, tzn. przy prognozie pozytywnej (*PP*) następuje dalsze użytkowanie obrabiarki aż do czasu realizacji kolejnego *PZDO*.

W przypadku, gdy wartość pojedynczego analizowanego parametru nieznacznie przekracza wartość dopuszczalną, celowe może być skrócenie czasu τ_i do tego stopnia aby wspomniany warunek był spełniony.

W diagnostyce, w tym także w zakresie prognozowania, widoczny jest znaczny postęp. Opracowuje się nowe metody, ulepsza się już istniejące, wykorzystując w nich nowoczesne narzędzia analityczne, np. elementy sztucznej inteligencji, sieci neuronowe, itp. [1, 2]. Zastosowanie takich narzędzi pozwala na eliminowanie subiektywnych działań człowieka a także na lepsze interpretowanie uzyskanych sygnałów diagnostycznych.

Prognozę opracowuje się według określonej procedury, na podstawie analizy zmian sygnałów diagnostycznych. Wykorzystanie w prognozowaniu nowych narzędzi umożliwia lepsze dopasowanie metody do rodzaju maszyny [8] oraz trafniejsze wnioskowanie prognostyczne [1, 2, 12]. W prognozowaniu, przy wykorzystaniu proponowanej metody dysponuje się, zwłaszcza w początkowym okresie pracy maszyny, wektorem obserwacji o małej liczbie elementów. W takim przypadku szczególnie przydatna jest teoria szarych systemów. Wykorzystanie jej pozwala na wnioskowanie odnośnie dalszej pracy maszyny na podstawie niewielkiej ilości niepełnych i niepewnych danych [2], uzyskując przy tym prognozę z odchyłką na satysfakcjonującym poziomie ok. 5%.



Rys. 5. Algorytm działań prognostycznych z wykorzystaniem PZDO (PP – prognoza pozytywna, PN – prognoza negatywna)

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone rozważania wykazały przydatność opisanych wyżej standardowych badań dokładności obrabiarek skrawających do diagnostyki operacyjnej. Zawarte w normach dopuszczalne wartości odchyłek geometrycznych cech konstrukcyjnych, które można przyjąć jako graniczne wartości symptomów stanu obrabiarek, umożliwiają bezpośrednie wnioskowanie o bieżącym stanie obrabiarki.

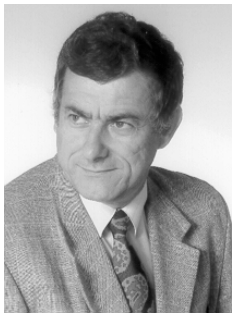
Jednolite warunki, w jakich prowadzone są badania dokładności, pozwalają obserwować i porównywać zmiany stanu w czasie, co jest jednym z niezbędnych czynników do prognozowania dalszego procesu eksploatowania. Wraz ze zbiorem kryteriów zmian obserwowanych symptomów stanowi podstawę diagnostyki holistycznej.

Praktyczna weryfikacja zaproponowanej procedury wymaga czasu dlatego też przedwcześnie jest jeszcze aby na tej podstawie oceniać jej przydatność. Rezultaty pierwszych zrealizowanych etapów pozwalają jednak przypuszczać, że ocena ta będzie pozytywna.

Podsumowując, można stwierdzić, że przedstawione procedury rozszerzają zbiór narzędzi diagnostycznych dla istotnej i licznej grupy maszyn technologicznych jakimi są niewątpliwie obrabiarki skrawające. Pozwala to na optymalne wykorzystanie obrabiarek przy kryteriach dokładnościowych a pośrednio - także ekonomicznych.

LITERATURA

[1] Batko W.: *Prognozowanie stanu maszyny.* W: Żółtowski B., Cempel Cz. (redakcja): Inżynieria diagnostyki maszyn. Wydawnictwo ITE, Radom 2004.
[2] Cempel Cz., Tabaszewski M.: *Zastosowanie teorii szarych systemów do modelowania i prognozowania w diagnostyce maszyn.* Materiały XXXIV Ogólnopolskiego Sympozjum *Diagnostyka Maszyn*. Katowice – Węgierska Górka 2007, s. 7-16.
[3] Marchelek K.: *Dynamika obrabiarek*. WNT, Warszawa 1991.
[4] Norma ISO 230-1:1996 – *Test code for machine tools – Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or finishing conditions.*
[5] Norma PN-94/M-55667-2. *Warunki odbioru frezarek wspornikowych. Badania dokładności.*
[6] Norma PN-81/M-55678. *Szlifierki do płaszczyzn z poziomą osią wrzeciona. Sprawdzanie dokładności.*
[7] Norma PN-ISO 19791-7:2000 – *Warunki badania centrów obróbkowych. Dokładność obrobionego przedmiotu próbnego.*
[8] Styp-Rekowski M.: *Metody diagnozowania obrabiarek na podstawie dokładności obróbki.* ZEM nr 3/2006, s. 102-114.
[9] Styp-Rekowski M.: *Zagadnienia tribologiczne w budowie obrabiarek skrawających.* Wydawnictwa Uczelniane ATR, Bydgoszcz 2004.
[10] Szwengier G.: *Modelowanie i obliczenia projektowe układów prowadnicowych obrabiarek.* Prace naukowe Politechniki Szczecińskiej nr 512, Instytut Technologii Mechanicznej z.13, Szczecin 1994.
[11] Tylicki H.: *Optymalizacja procesu prognozowania stanu technicznego pojazdów mechanicznych.* Wydawnictwa Uczelniane ATR, seria Rozprawy nr 96. Bydgoszcz 1998.
[12] Zhang H., Li Z., Chen Z.: *Application of Grey Modelling Method to Fitting and Forecasting Wear Trend of Marine Diesel Engines*. Tribology International, vol. 36, 2003, pp. 753-756.
[13] Żółtowski B.: *Podstawy diagnostyki maszyn.* Wydawnictwa Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1996.



Dr hab. inż. **Michał STYP-REKOWSKI** ukończył studia na Wydziale Budowy Maszyn PG. Od 1972 roku jest pracownikiem Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy. Aktualnie zatrudniony jest na stanowisku profesora nadzwyczajnego UTP jako kierownik Zakładu Obrabiarek i Robotów. Zajmuje się badaniem stanu obiektów technicznych oraz procesami zużywania tribologicznego maszyn, głównie obrabiarek skrawających i ich zespołów funkcyjnych, szczególnie w aspekcie wpływu zużycia na rezultaty procesu obróbki skrawaniem. W swoim dorobku ma ponad 130 publikacji z tego zakresu, zamieszczonych w źródłach krajowych i zagranicznych oraz 4 monografie a także szereg opracowań konstrukcyjnych wdrożonych w praktyce przemysłowej. Członek m.in.: Polskiego Towarzystwa Tribologicznego, Środowiskowego Zespołu Sekcji Podstaw Eksploatacji KBM PAN w Gdańsku, Polskiego Naukowo-Technicznego Towarzystwa Eksploatacyjnego.

ZASTOSOWANIE TECHNIK NIENISZCZĄCYCH DO BADANIA FUNDMENTOWAŃ

Piotr KUROWSKI

Katedra Robotyki i Mechatroniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
kurowski@agh.edu.pl

Streszczenie

Ocena stanu fundamentowań na różnym etapie ich użytkowania dokonywana jest od dawna, jednakże rozwój elektroniki, informatyki nauk materiałowych itp. jaki dokonał się w ciągu ostatnich kilkunastu lat dostarcza nowych narzędzi pozwalających na łatwiejsze, tańsze oraz bardziej wiarygodne testowanie konstrukcji tego typu. Niniejsza praca stanowi przegląd najczęściej stosowanych w tym zakresie technik.

Słowa kluczowe: metody eksperymentalne, analiza i przetwarzanie sygnałów, badanie fundamentowań.

USING NONDESTRUCTIVE METHODS FOR FOUNDATIONS INVESTIGATION

Summary

The issue of foundation state assessment at various stages of wear is known for years. Nevertheless, development of electronics, informatics and material sciences that has taken place recently provides new tools for easier, more economical and convenient testing of such structures. In the paper there is presented the survey of the most popular techniques used in this field of diagnostics.

Keywords: experimental methods, signal processing and analysis, foundations investigations.

1. WPROWADZENIE

Zagadnienia związane z zastosowaniem nieniszczących technik badań do wnioskowania o stanie dynamicznym konstrukcji mechanicznych zawsze odgrywały bardzo istotną rolę. Szczególnie duże znaczenie mają one w odniesieniu do konstrukcji budownictwa lądowego, a zwłaszcza do badania i oceny stanu fundamentowań. Fundamentowanie jest szczególnym rodzajem konstrukcji, na którym spoczywają wyjątkowe obostrzenia. Z racji swojej funkcji fundamentowanie w sposób bezpośredni oddziaływuje na poprawność pracy zbudowanej na nim konstrukcji, może mieć wpływ na zmianę jej parametrów, trwałość oraz stabilność działania. Jest elementem mającym pierwszoplanowy wpływ na parametry pracującej na nim konstrukcji i dlatego niezwykle istotne jest, aby spełniało poprawnie rolę, dla której zostało utworzone. W czasie użytkowania fundamentowania podlegają wielu procesom mającym podstawowe znaczenia dla ich działania. Korozja, zużycie materiałów, zmiany geologiczne to tylko niektóre z niezależnych czynników bezpośrednio wpływających na ich funkcjonowanie. Niniejsza praca stanowi przegląd technik nieniszczących najczęściej stosowanych w zakresie badań i monitorowania stanu głębokich fundamentowań.

2. TESTY WYKORZYSTUJĄCE DUŻE OBCIĄŻENIA FUNDAMENTOWAŃ

Testy wykorzystujące duże obciążenia stosowane są przede wszystkim na etapie tworzenia fundamentowania. Wymagają one dużych i ciężkich narzędzi oraz odpowiedniego przygotowania konstrukcji do badań. Metody badania często związane są bezpośrednio z metodą osadzania słupów fundamentowania. W praktyce najczęściej stosowanymi metodami są:

- wbijanie słupów fundamentowania w grunt
- wiercenie otworów oraz późniejsze wypełnianie ich materiałem
- wiercenie otworów z jednoczesnym ich wypełnianiem (metoda CFA lub ACIP) [1, 2].

Wybór techniki monitorowania zależy tutaj od wybranej metody wykonania.

2.1. Badania wbijanych słupów fundamentowych

Wbijanie słupów w grunt jest jedną z najprostszych metod osadzania fundamentowania, posiada jednak wiele ograniczeń. Wbijany słup, poddawany jest dużym obciążeniom impulsowym dlatego konieczne jest odpowiednie przygotowanie jego głowy (dodatkowe zbrojenie, odpowiednia gładkość powierzchni). W samym procesie osadzania słupa konieczne jest monitorowanie i sterowanie dostarczaną do elementu siłą oraz monitorowanie własności gruntu. Stosowane w tym zakresie metody monitorowania (CASE, TNO) bazują na interakcji wykonywanych w trakcie wbijania pomiarów odkształceń oraz przyspieszeń drgań z założonym modelem numerycznym układu słup-grunt w postaci układu o jednym stopniu swobody. Celem stosowania metod jest sprawdzenie, jakie maksymalne obciążenie można będzie zadać dla wbijanego słupa fundamentowego, monitorowanie siły dostarczanej do układu lub monitorowanie parametrów gruntu. Do użycia tych metod konieczne jest zastosowanie układu

pomiarowego dokonującego pomiaru akceleromertycznego oraz tensometrycznego w jednym z przekrojów na wysokości słupa. Na podstawie pomiaru odkształcenia dokonuje się wyznaczenia siły dostarczanej do układu (mnożąc wyznaczone odkształcenia przez pole powierzchni przekroju słupa oraz moduł elastyczności). Z drugiej strony budowany jest prosty model numeryczny opisujący dynamiczne zachowanie układu słup-grunt. W modelu tym prędkość (wyznaczona na podstawie pomiaru akcelerometrycznego) jest parametrem koniecznym do wyznaczenia siły przy czym zakładane są arbitralnie parametry gruntu. Jeśli siła wyznaczona na podstawie pomiaru jest różna od siły uzyskanej numerycznie zmieniane są parametry gruntu i w procedurze iteracyjnej dokonuje się obliczeń ponownie.

2.2. Badanie słupów wierconych oraz wykonanych techniką ACIP

W przypadku badania słupów wbijanych w grunt wykorzystywane są założenia o ich jednorodności oraz stałym przekroju. Założenia te są zazwyczaj spełnione z uwagi na to, iż słupy takie muszą być przygotowane wcześniej. Dla słupów zalewanych w miejscu ich montowania często takie założenia prowadzą do zbyt dużych błędów. Z tego powodu techniki badania przedstawione powyżej musiały doczekać się modyfikacji.

2.3. Metoda SIMBAT - słupy wiercone

Metoda SIMBAT, podobnie jak poprzednio omawiane metody zakłada, że uderzenie spadającej masy w głowę wbijanego słupa wywołuje w nim falę naprężeń przemieszczającą się wzdłuż od wierzchołka do stopy słupa. Następnie fala jest odbijana i powraca z powrotem do wierzchołka. Taki model dobrze przybliża sytuację w przypadku jednorodnego słupa swobodnego o określonym stałym przekroju. W rzeczywistości kształty słupów mogą zmieniać się na jego długości oraz są one otoczone przez grunt. Powoduje to, iż część fali będzie powracała do głowy słupa z każdego punktu na jego długości. Informacja niesiona przez odbite części fali będzie związana zarówno z niejednorodnościami gruntu, niejednorodnościami słupa, jak i zmianami jego pola przekroju. W metodzie SIMBAT dokonywane jest wyznaczenie sił dostarczanych do wbijanego słupa oraz odpowiedzi układu. Otrzymane wartości sił porównuje się z wielkościami modelowymi uzyskanymi na podstawie modelu numerycznego. W przypadku metody SIMBAT model numeryczny zawiera dwa stopnie swobody. Na podstawie porównania wnioskuje się o parametrach dynamicznych gruntu. Układ pomiarowy związany z tą metodą składa się z dwóch tensometrów pozwalających na wyznaczenie odkształcenia słupa, dwóch akcelerometrów umożliwiających wyznaczenie prędkości względnej oraz elektronicznego teodolitu w celu wyznaczenia bezwzględnej prędkości wbijania elementu.

2.4. Metody STATNAMIC oraz FUNDEX

Dużym problemem w trakcie wykonywania testów wykorzystujących spadającą masę jest konieczność specjalnego przygotowania głowy słupa. Wymuszenia impulsowe ze swej natury działają na układ dużą siłą w krótkim okresie czasu. Wydłużenie czasu działania siły pozwala na zmniejszenie jej wartości przy zachowaniu tych samych warunków związanych z przepływem energii. Na tej zasadzie oparto metody STATNAMIC oraz FUNDEX. W Metodzie FUNDEX zastosowano klasyczną metodę wymuszenia wykorzystującego spadającą masę. W przypadku tej metody wydłużenie czasu działania siły na badany słup fundamentowy uzyskiwane jest poprzez zastosowanie zestawu sprężyn spiralnych jako elementu pośredniego.

Wymuszenie w metodzie STATNAMIC nie jest dostarczane do układu poprzez spadającą masą ale poprzez reakcję układu na przyspieszenie nadawane masie referencyjnej. Układ wymuszający zbudowany jest w ten sposób iż na badanym słupie umieszczany jest układ z tłokiem poruszającym się w cylindrze. Na części tłokowej umieszczana jest masa referencyjna. Działanie układu wywoływane jest przez odpalenie ładunku wybuchowego w komorze cylindra. Dokonując odpowiedniego wyboru materiału wybuchowego można mieć wpływ na parametry ruchu masy referencyjnej, a przez to także na obciążenia, jakim poddawany jest badany element fundamentowy.

Parametry wybuchu dobierane są w taki sposób, aby okres wymuszenia był dłuższy od okresu drgań własnych słupa. Takie warunki oznaczają, iż słup w czasie pomiaru cały czas jest ściśnięty, co skutkuje brakiem sygnału echa w rejestrowanym przebiegu pomiarowym.

Na układ pomiarowy składa się oczujnikowanie słupa w sposób identyczny z poprzednio omawianymi metodami oraz dodatkowo pomiar siły i przemieszczenia masy referencyjnej.

3. TESTY WYKORZYSTUJĄCE MAŁE WYMUSZENIA IMPULSOWE

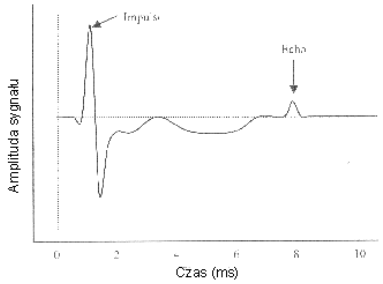
3.1. Metoda echa

Metoda echa jest jedną pierwszych technik jakie były używane do testowania fundamentowań. Jest ona bezpośrednio związana z poprzednio opisywanymi technikami badań dynamicznych związanych z użyciem dużych obciążeń konstrukcji. Podstawowe różnice wynikają z wielkości siły koniecznej do wymuszenia badanej konstrukcji. Układ pomiarowy dla potrzeb metody echa składa się z młotka modalnego pozwalającego na wymuszenie obiektu oraz czujnika.

W większości przypadków wystarczające jest, aby masa stosowanych dla potrzeb metody echa młotka modalnego była na poziomie 1 kg, chociaż czasem dobre wyniki daje jej zwiększenie. Odpowiedź układu zbierana jest za pomocą czujnika akcelerometrycznego lub czujnika prędkości. W przypadku pomiaru przyspieszenia jednym z pierwszych kroków, jakie należy podjąć

w procesie przygotowania sygnału do analizy, jest jego całkowanie.

Zasada pomiaru jest identyczna jak w przypadku metod wykorzystujących duże obciążenia dynamiczne. Uderzenie generuje falę propagującą się od wierzchołka badanego słupa do jego stopy. Tam następuje odbicie fali, która następnie powraca do głowy słupa. Pomiar kształtu odpowiedzi oraz zależności czasowych daje pogląd na parametry badanego słupa (jego długość, zmiany pola przekroju, parametry materiałowe) oraz parametry otaczającego go gruntu. Przykładowy przebieg zebranego sygnału odpowiedzi pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Przykładowy przebieg odpowiedzi na uderzenie

Z uwagi na grunt otaczający badany słup fundamentowy zbierany sygnał jest silnie tłumiony. Często stosowaną techniką w tego typu pomiarach jest mnożenie zbieranej odpowiedzi przez okno wykładnicze. Okno takie powoduje wzmocnienie sygnału zbieranego z głębszych partii badanego słupa.

Metoda echa posiada wiele modyfikacji wynikających ze szczególnych warunków pomiarowych lub szczególnych wymagań. Jedną z trudności, jakie można napotkać w trakcie stosowania metody jest brak lub utrudniony dostęp do głowy badanego słupa. W takim przypadku stosowana jest modyfikacja metody polegająca na pomiarze odpowiedzi układu na bocznej powierzchni badanego słupa. W takim przypadku konieczne jest zastosowanie co najmniej dwukanałowego pomiaru odpowiedzi oraz odpowiedniego rozłożenia czujników. Fala generowana poprzez uderzenia młotkiem modalnym detektowana jest bezpośrednio przez czujniki, następnie zbierane są jej odbicia od dna słupa. Wykorzystując zależności czasowe i kształty odpowiedzi możliwe jest w takim przypadku wyznaczenie parametrów układu.

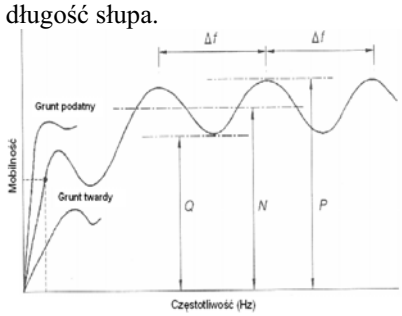
3.2. Metoda odpowiedzi impulsowej

W odróżnieniu od metody echa, metoda odpowiedzi impulsowej zakłada pomiar zarówno siły dostarczanej do badanego układu jak i jego odpowiedzi [1,4]. Na podstawie zebranych przebiegów budowane są estymaty funkcji mobilności mechanicznej. Typowy przebieg funkcji pokazany jest na rys. 2.

Z rozważań teoretycznych [1] wynika iż dla cylindrycznego słupa o długości L spoczywającego na elastycznym podłożu można zaobserwować wystąpienie częstotliwości rezonansowych występujących w odległościach równych:

$$\Delta f = \frac{v_c}{2 \cdot L}$$

gdzie:
- v_c – prędkość rozchodzenie się fali w wzdłuż słupa;
- L – długość słupa.



Rys. 2. Przebieg funkcji odpowiedzi impulsowej

W przypadku nieskończenie sztywnego podłoża najniższa z częstotliwości rezonansowych wystąpi dla $\frac{v_c}{4 \cdot L}$ zaś w przypadku nieskończenie elastycznego podłoża częstotliwość ta wystąpi w okolicy 0 Hz. Dla przypadku rzeczywistego pierwsza z częstotliwości rezonansowych powinna wystąpić w wyspecyfikowanym przedziale. Dodatkowo w warunkach rzeczywistych słup otoczony jest przez grunt, co wprowadza dodatkowe tłumienie do układu. Rzeczywista charakterystyka przyjmuje wówczas kształt przedstawiony na rys. 2. Na podstawie zebranej charakterystyki możliwe jest wyznaczenie parametrów materiałowych układu wraz z parametrami gruntu.

3.3. Metoda Impedance-Log

Metoda logowania impedancji wykorzystuje dwie poprzednio omówione metody echa oraz odpowiedzi impulsowej. Jej główną zaletą jest możliwość przybliżonego zobrazowania kształtu badanego słupa w zależności od głębokości. Uzyskiwany na podstawie metody obraz słupa jest ograniczony do jednego wymiaru i jest symetryczny względem jego osi.

Idea metody polega na obserwacji zmian impedancji na długości badanego słupa. Informacja taka może być wyseparowana na podstawie obserwacji przebiegu fal dochodzących do głowy słupa po jego wymuszeniu impulsem. Z teorii wynika [3] iż każda zmiana impedancji powoduje iż część fali przechodzi dalej w głąb badanego słupa jednak pozostała część jest odbijana i powraca do głowy słupa. Do wyznaczenia profilu badanego słupa konieczna jest jednoczesna rejestracja zarówno odpowiedzi czasowej jak i odpowiedzi częstotliwościowej. Odpowiedź częstotliwościowa konieczna jest w tym przypadku do korekcji otrzymanego profilu wynikających ze zmian parametrów gruntu.

4. METODY ZWIĄZANE Z INSPEKCJĄ WGŁĄB

Kolejna grupa metod badania fundamentowań związana jest z metodami inspekcyjnymi. Metody te wymagają wcześniejszego przygotowania fundamentowania, np. poprzez zatopienie rurek dostępowych, najczęściej na etapie jego wytwarzania.

4.1. Metoda ultrasonograficznego zapisu echa

Metoda wymaga aby w badanym fundamentowaniu dostępne były kanały w które możliwe jest wprowadzenie sond. Badanie polega na tym iż do jednego z dwóch kanałów wprowadzony zostaje nadajnik ultradźwiękowy, natomiast do drugiego odbiornik. Sygnał emitowany przez nadajnik porównywany jest ze sygnałem detektowanym na odbiorniku. Wszystkie anomalie występujące w strukturze badanego obiektu są obrazowane zmianami sygnału detektowanego przez odbiornik. Test wykonywany jest najczęściej w ten sposób, iż obie sondy są równocześnie wpuszczane w głąb badanego fundamentowania. W ten sposób wyznaczany jest profil struktury we funkcji głębokości. W momencie zaobserwowania anomalii możliwe jest np. detekcja jej objętości poprzez planową zmianę głębokości penetracji nadajnika i odbiornika. Metoda ma ograniczony zakres działania jedynie do obszaru pomiędzy zabudowanymi kanałami dostępowymi. W celu uzyskania pełnego obrazu struktury badanego obiektu konieczne jest zabudowanie wielu kanałów dostępowych oraz powtórzenie eksperymentu dla każdej pary. W niektórych przypadkach metoda może być zastosowana do badania słupów w których zabudowano tylko jeden kanał dostępowy. W takim przypadku głowice nadajnika i odbiornika są wpuszczane w jeden kanał w pewnej odległości od siebie. Działanie takiego układu oparte jest na prawie odbicia Snell'a.

4.2. Metoda zapisu gamma-gamma

Kolejna metoda wykorzystuje właściwości eletromagnetycznego promieniowania Gamma do detekcji niejednorodności w budowie słupów fundamentowych. Metoda wymaga jednego kanału dostępowego, w który wpuszczone zostaje źródło promieniowania oraz detektor. Zasada działania urządzenia oparta jest o zjawisko Compton'a. Polega ono na tym, iż różne materiały w różny sposób absorbują, rozpraszają oraz odbijają promieniowanie elektromagnetyczne. Nadajnik promieniowania podczas wsuwania go do kanału napromieniowuje swoje otoczenie. Następnie do kanału wprowadzany jest odbiornik rejestrujący napromieniowanie. Zmiana własności materiałowych lub zmiana struktury otoczenia (pustki, wtrącenia) powodują lokalne zmiany natężenie detektowanego pola promieniowania.

4.3. Metoda testowania równoległego

Metoda testowania równoległego została zaprojektowana do badania fundamentowań pod istniejącymi konstrukcjami. Wymaga ona przygotowania kanału dostępowego, do którego wprowadzany jest hydrofon. Kanał dostępowy zalewa się wodą w celu uzyskania dobrego sprzężenia akustycznego z gruntem. Badanie polega na impulsowym wymuszaniu konstrukcji za pomocą młotka z czujnikiem siły. Za pomocą hydrofonu na różnych głębokościach bada się czasy detekcji sygnału. Zakłada się, iż nieproporcjonalne wydłużenie czasu detekcji sygnału wymuszającego jest spowodowane uszkodzeniami fundamentowania.

5. INNE METODY

Przedstawione powyżej metody są używane najczęściej w badaniach oraz inspekcji fundamentowań. Znacznie rzadziej można jednak natknąć się na wykorzystanie innych technik np. elektrycznych, czy też optycznych. Ponieważ utrwalony beton jest dobrym izolatorem, techniki elektryczne najczęściej związane są z monitorowaniem przepływu prądu pomiędzy zbrojeniem fundamentowania oraz otaczającym fundamentowanie gruntem. W stanie nieuszkodzonym przepływ prądu dla takiego układu jest minimalny. W momencie propagacji uszkodzenia fundamentowania może dojść do odsłonięcia zbrojenia i jego bezpośredniego kontaktu z warstwami o lepszym przewodnictwie elektrycznym. W takim przypadku możliwy jest zwiększony przepływ ładunku pozwalający na detekcję uszkodzenia.

6. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Przedstawione metody pokazują, iż niedestrukcyjne badanie stanu głębokich fundamnetowań nie jest zadaniem trywialnym. Dla każdej z pokazanych technik można podać szereg ograniczeń związanych z czasem wykonania, jakością uzyskiwanych wyników, jak i ekonomicznych. Z dokonanego przeglądu wynika, iż najbardziej uniwersalne wydają się techniki związane z zastosowań niewielkich wymuszeń impulsowych. Wydaje się także, iż w chwili obecnej metody te mogą stanowić kompromis pomiędzy jakością uzyskiwanych wyników oraz nakładami czasowymi i ekonomicznymi.

PODZIĘKOWANIE

Praca wspierana przez Komitet Badań Naukowych w ramach grantu nr: R 03 015 02.

LITERATURA

[1] Hartlein B., Davis A.: *Nondestructive Testing of Deep Foundation,* John Willey&Sons, Ltd, England, 2006.

[2] Charue N., *Loading rate effects on pile load-displacement behaviour derived from back-analysis of two load testing procedures* – praca

doktorska, Université catholique de Louvain, Belgium, 2004.
[3] Paquet J.: *Pile Integrity Testing – the CEBTP Reflectogram,* Proceedings of the Conference of the Institution of Civil Engineers, 7-9 Kwiecień 1992, pp. 177-188, London UK, 1992.
[4] Pkirsh F., Plassman B.: *Dynamic methods in Pile Testing: Developments in Measurements and Analysis,* Proceedings of the Intermational Deep Foundation Congress, 14-16 Luty 2002, Orlando, USA, 2002.

Dr inż. **Piotr KUROWSKI.** Jest adiunktem w Katedrze Robotyki i Mechatroniki, Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie. Jego zainteresowania naukowe skupiają się na zagadnieniach przetwarzania sygnałów, problemów dynamiki konstrukcji oraz prototypowaniu algorytmów klasycznej i operacyjnej analizy modalnej. Jest autorem kilkunastu publikacji związanych z podanymi tematami.

DIAGNOZOWANIE PRZEBIEGU CIŚNIENIA W KOMORACH SPALANIA OKRĘTOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH Z WYKORZYSTANIEM SYGNAŁU DRGANIOWEGO

Jan MONIETA*, Piotr WALERIAŃCZYK

*Akademia Morska, Instytut Technicznej Eksploatacji Siłowni Okrętowych, Zakład Siłowni Okrętowych, ul. Wały Chrobrego 2, 70−500 Szczecin, fax: (091) 480 95 75, email: jmonieta@am.szczecin.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań zastosowania sygnałów przyspieszeń drgań do diagnozowania przebiegu ciśnienia spalania w średnio-obrotowych silnikach wysokoprężnych. Badania wstępne przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych na średnio-obrotowym okrętowym silniku wysokoprężnym z wykorzystaniem eksperymentu czynnego. Badano wpływ obciążenia względnego zespołu prądotwórczego na wartości wykorzystywanych parametrów diagnostycznych. Przetwarzane sygnały diagnostyczne przyspieszeń drgań za pomocą toru pomiarowego, analizowano z wykorzystaniem technik komputerowych w dziedzinie czasu, amplitudy i częstotliwości. Starano się wyselekcjonować symptomy diagnostyczne skorelowane z obciążeniem względnym silnika. Wybrano symptomy diagnostyczne ściśle skorelowane z obciążeniem względnym, które powinny być skorelowane również ze stanem technicznym.

Słowa kluczowe: silniki okrętowe, przebieg ciśnienia spalania, diagnozowanie.

DIAGNOSIS OF COURSE OF PRESSURE IN COMBUSTION CHAMBERS OF MARINE DIESEL ENGINES WITH UTILIZE OF VIBRATION SIGNALS

Summary

In article have been presented of investigations values utilize of vibration acceleration for diagnosis of course of combustion pressure in medium-speed high-pressure engines. The researches has make in laboratory conditions on the medium speed marine diesel engines driven a generator, with utilization of effective experiment. There have been investigated influence of relative loads of generator set on the values of utilized diagnostic parameters.

Processed of diagnostic signals of acceleration vibration oscillations behind assistance of measuring line, have been analyzed with utilization computer techniques in sphere of time, amplitudes and frequencies. It tries to select of diagnostic symptoms with relative load of engine correlated. Have been selected of diagnostic symptoms strictly correlated with relative load. These parameters should been correlated with technical state.

Keywords: marine diesel engines, course of combustion pressure, diagnosis.

1. WSTĘP

Obiekty techniczne podczas eksploatacji ulegają zużyciu i uszkodzeniom. Zużycie elementów obiektów technicznych zmienia ich charakterystyki eksploatacyjne, jak również zmienia ich sprawność oraz zmniejsza niezawodność. Kumulowanie skutków powodujących ten proces prowadzi do zaburzenia eksploatacji. Trudno jest określić czynniki i ich wpływ na proces zużycia, zatem należy przyjąć, że mają one różne przebiegi. Wynika stąd konieczność przeprowadzania okresowych kontroli stanu obiektów, które umożliwią ustalenie terminu i zakresu wykonania obsługi technicznej.

Na statkach morskich występują tendencje do ciągłej redukcji załogi maszynowej, wraz z rozwojem techniki oraz zwiększeniem stopnia zautomatyzowania maszyn i urządzeń. Wzrastają jednocześnie wymagania stawiane nowoczesnym okrętowym silnikom spalinowych, podyktowane aspektami bezpieczeństwa i ekologicznymi, co prowadzi do tego, że coraz większego znaczenia nabiera konieczność stałego utrzymania silników w stanie zdatności. W tym celu, obok doskonałości konstrukcji i technologii wytwarzania, przy stałym dążeniu do obniżenia kosztów eksploatacji, coraz więcej uwagi poświęca się silnikom spalinowym.

Głównym procesem roboczym silników spalinowych jest proces spalania, od którego zależą parametry pracy i oddziaływanie na otoczenie [3, 4, 5]. Ocenę procesu roboczego w spalinowych silnikach okrętowych realizuje się przez monitorowanie temperatur spalin wylotowych oraz okresowe pomiary parametrów ciśnienia w cylindrach silnika. Zmiany temperatur spalin

wylotowych są nie duże przy wystąpieniu zmian stanu technicznego silnika [6], a wyniki pomiarów parametrów przebiegu ciśnienia spalania obarczone są istotnymi błędami przy odbiorze sygnałów z zaworów indykatorowych [1, 3, 6, 10]. Postanowiono, więc oceniać proces przebiegu ciśnień w komorach spalania z wykorzystaniem sygnałów drganiowych, o większej pojemności informatycznej.

2. CEL PRACY

Celem pracy było opracowanie metody diagnozowania procesu przebiegu ciśnień w cylindrach w fazie eksploatacji okrętowego silnika spalinowego z wykorzystaniem sygnałów drganiowych. Postanowiono to zrealizować przez opracowanie sposobu oceny pracy silnika, opierając się na badaniach drgań generowanych i propagowanych przez elementy silnika w okolicy komory spalania, a także wpływ umieszczenia czujnika na relacje diagnostyczne. Ma to dotyczyć fazy eksploatacji, ponieważ najszersze pole do działania dla diagnozowania stanu obiektu występuje podczas jego eksploatacji. Zadaniem diagnozowania w tej fazie istnienia jest określenie, czy obiekt funkcjonuje prawidłowo oraz wyznaczenie prognozy dotyczącej oczekiwanego okresu zdatności obiektu [12]. Potrzeba diagnozowania w fazie eksploatacji wynika z prawdopodobnej możliwości uszkodzenia silnika okrętowego, jak również zapewnienia mu odpowiedniej niezawodności.

Główny etap pracy polegał na badaniu procesu roboczego, rejestrowane były również dodatkowo główne parametry pracy silnika i określano ich przydatność do możliwości diagnozowania silnika. W związku z powyższym przyjęto następującą tezę pracy:

Możliwe jest wyselekcjonowanie symptomu diagnostycznego sygnału drganiowego skorelowanego z parametrami procesu roboczego silnika spalinowego.

3. PROGRAM I WYNIKI BADAŃ

3.1. Metoda badań

Zachodzące w obiekcie zmiany fizyczne są dobrze odzwierciedlane w modelu, ujmującym te procesy w całym cyklu istnienia. Procesy takie określane są mianem czynników wymuszających. W badaniach silnika spalinowego należy zastosować podejście systemowe, a więc takie, w którym można łącznie rozpatrywać problemy wynikające z jego działania i oddziaływującego na niego systemu sterującego oraz współdziałania systemu diagnozującego, który w rzeczywistych warunkach eksploatacji dostarcza niezbędnych informacji do racjonalnego sterowania procesem eksploatacji [2].

W badaniach został wykorzystany czujnik przyspieszeń drgań, który był zamontowany na śrubie mocującej głowicę oraz dodatkowej śrubie wkręconej w otwór do demontażu głowicy cylindrowej. Diagnozowanie eksploatacyjne silnika poprzez analizę sygnału drganiowego przeprowadzone zostało z wykorzystaniem eksperymentu czynnego.

Eksperyment czynny polegał na pomiarze parametrów diagnostycznych przy zmianie jednej wielkości wejściowej (obciążenia względnego) i dążeniu do ustalenia poziomów pozostałych wielkości wejściowych w warunkach laboratoryjnych. Stopniowe obciążanie silnika realizowano przez obciążanie opornikiem wodnym prądnicy. Parametry wyjściowe zależą od pewnej liczby wielkości wejściowych, przy jednoczesnym oddziaływaniu wielkości zakłócających.

W takim planie eksperymentu, przy zastosowaniu statystycznych technik opracowania wyników badań, można uzyskać wiarygodne podstawy do wyrażenia relacji „stan – symptom" oraz wyznaczenia wartości granicznych dla dwu- lub więcej stanowej klasyfikacji stanu obiektów [11].

3.2. Opis stanowiska pomiarowego

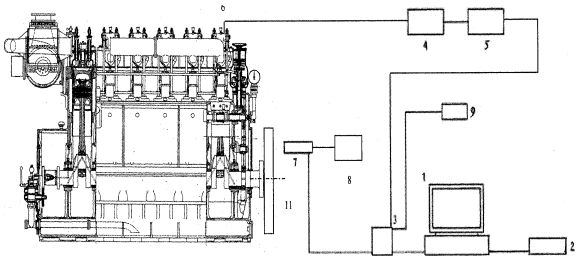
Zbudowano tor pomiarowy, który podłączono do silnika 5BAH22 znajdującego się w Laboratorium Siłowni Okrętowych Akademii Morskiej w Szczecinie (rys. 1). Przy kole zamachowym umieszczono czujnik fotoelektryczny. Sygnały drganiowe przetwarzane były za pomocą czujnika przyspieszeń drgań firmy Brüel & Kjaer oraz wzmacniane za pomocą przedwzmacniacza tej samej firmy.

Charakterystyczne dane badanego silnika są następujące:

- przeznaczenie – napęd generatora synchronicznego 3-fazowego,
- sposób pracy – czterosuwowy,
- liczba cylindrów – 5,
- średnica cylindra – 220 mm,
- skok tłoka – 320 mm,
- moc nominalna – 220 kW,
- prędkość obrotowa nominalna – 500 obr/min,
- zużycie paliwa – 230 g/kWh + 5%,

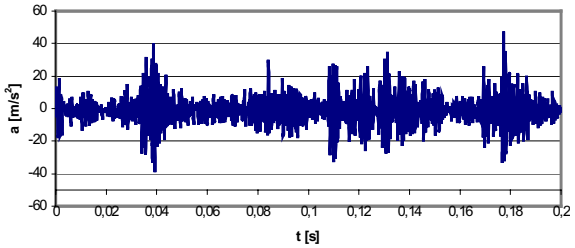
ciśnienie powietrza rozruchowego – 30 bar.

Do obróbki wyników został wykorzystany system analizy sygnałów w zainstalowany w komputerze stacjonarnym, który pozwala na wykonywanie podstawowych analiz sygnałów w dziedzinie czasu, amplitudy i częstotliwości. Wzmocnienia wykorzystywane w programie podawane były w odstępach 10 dB oraz istniała możliwość płynnej regulacji wzmocnienia. Wzmocnienie przyjęto odpowiednio do czułości czujnika oraz wybranego kanału wejściowego.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego: 1 – komputer z przetwornikiem analogowo-cyfrowym, 2 – drukarka, 3 – przyłącze przetwornika, 4 – filtr dolnoprzepustowy, 5 – wzmacniacz ładunku, 6 – czujnik przyspieszeń drgań, 7 – fotooptyczny czujnik impulsów, 8 – zasilacz stabilizowany, 9 – oscyloskop, 10 – obiekt badań, 11 – koło zamachowe badanego silnika

Stosowano obróbkę sygnałów przez filtrowanie dolnoprzepustowe i uśrednianie synchroniczne oraz selekcję składowych. Selekcja ta miała na celu odrzucenie nie współzmiennych składowych z obciążeniem silnika. Celem filtrowania było przeciwdziałanie powstawaniu składowych w analizowanym paśmie zjawisk o częstotliwości wyższej. Wykorzystane były impulsy fotoelektryczne początku akwizycji sygnału, których nadajnik umieszczony był na kole zamachowym badanego silnika. Przykładowy przebieg sygnału przyspieszeń drgań przedstawiono na rys. 2.

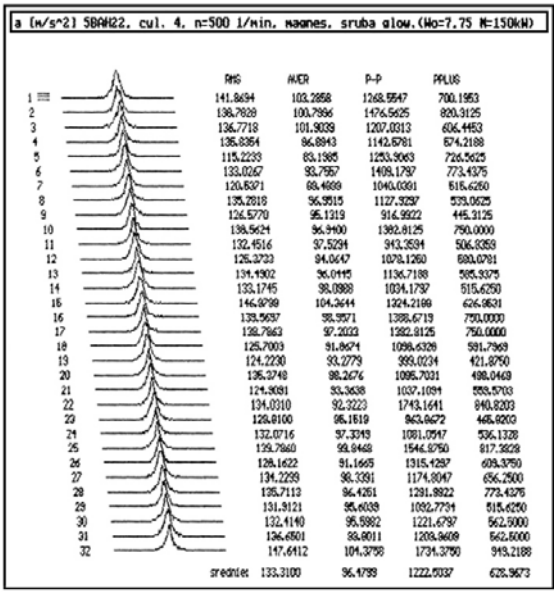


Rys. 2. Przebieg czasowy sygnału przyspieszeń drgań przetwarzany na śrubie głowicy cylindra nr 4 przy prędkości obrotowej 500 obr/min, wskaźniku obciążenia 7,75 i mocy elektrycznej prądnicy 150 kW

Wykorzystano analizę w dziedzinie amplitud, w której estymaty wyznaczone były dla 32 przebiegów sygnału (rys. 3). Wykorzystywano 4 średnie estymaty punktowe: wartość skuteczną, średnią, międzyszczytową i szczytową dodatnią.

Podczas obróbki w dziedzinie częstotliwości analizowano sekwencje uśrednionych synchronicznie sygnałów. W dziedzinie częstotliwości wybrano ilościową i jakościową analizę amplitud składowych widm, przy zmianach wielkości wejściowych. Po wyborze uśredniania synchronicznego można było przedstawić jego uśrednione synchronicznie widmo, a następnie wykonywano obwiednię uśrednionego synchronicznie widma, co ukazuje rys. 4. Zastosowanie obwiedni miało na celu ograniczenie przesuwania częstotliwości składowych, wynikające z niepowtarzalności prędkości obrotowej [7].

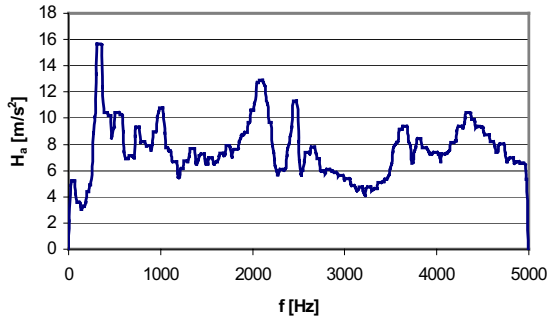
Na rysunku 5 zostało przedstawione porównanie widma bieżącego z widmem odniesienia wraz z wyznaczeniem współczynnika korelacji. Widmami bieżącymi były kolejno widma dla 0, 25, 50 i 75% obciążenia, a widmem odniesienia dla obciążenia 75%. W porównywanych widmach nie używano analizy obwiedni.



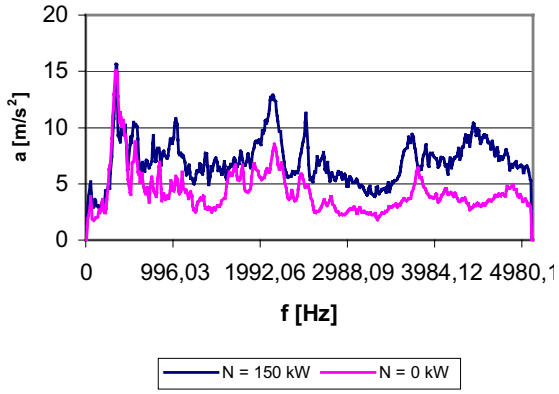
Rys. 3. Przykładowa analiza sygnału w dziedzinie amplitudy przy czujniku umocowanym na cylindrze nr 4: *RMS* – wartość skuteczna, *AVER* – wartość średnia, *P-P* – wartość międzyszczytowa, *PPLUS* – wartość szczytowa dodatnia

3.3. Przygotowanie stanowiska pomiarowego do badań

Przygotowanie stanowiska pomiarowego polegało na sztywnym zamocowaniu czujnika fotooptycznego, aby zneutralizować wpływ drgań. W tym celu wykonano metalowy uchwyt mocujący.



Rys. 4. Przykładowa obwiednie uśrednionego widma przyspieszeń drgań przy czujniku zamocowanym na śrubie dodatkowej głowicy: H_a – amplituda składowej widma, f – częstotliwość



Rys. 5. Porównanie widma przyspieszeń drgań dla czujnika zamocowanego na śrubie dodatkowej głowicy przy obciążeniu 150 kW do widma przy obciążeniu 0 kW oraz wyznaczenie współczynnika korelacji

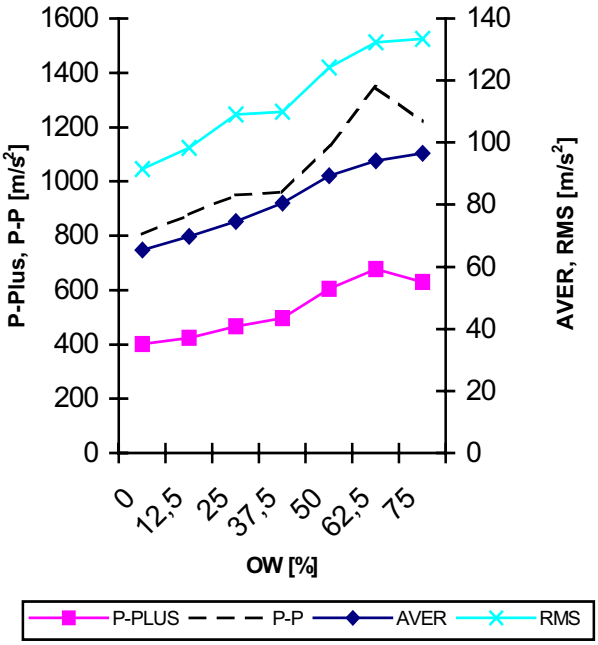
Na kole zamachowym natomiast naklejono nadajnik sygnałów dla czujnika fotooptycznego. Po zbudowaniu toru pomiarowego według schematu przedstawionego na rysunku 1 i próbie zrealizowania badań, stwierdzono wpływ zakłóceń z sieci elektrycznej, a badano zespół silnik spalinowy – prądnica. Zakłócenia te zostały wyeliminowane na drodze zerowania.

W celu zamocowania czujnika przyspieszeń drgań w drugim punkcie pomiarowym została wykonana specjalna śruba, wkręcana w otwór do mocowania uchwytów w przypadku demontażu głowicy. W śrubie tej wywiercono otwór a następnie nagwintowano go, aby mocować czujnik za pomocą wkrętu.

3.4. Wyniki pomiarów

Przy zestawieniu wyników w dziedzinie amplitudy badano wpływ obciążenia względnego *OW*, odzwierciedlającego dawkę wtryskiwanego paliwa, na wartości estymat amplitudowych przy dwóch lokalizacjach czujnika pomiarowego. Obciążenie względne to iloraz częściowego obciążenia, realizowano w danej chwili badań, do pełnego obciążenia. Obciążenie silnika realizowano przez obciążanie prądnicy hamulcem wodnym. Przykładowe przebiegi estymat, dla przeprowadzonych badań przedstawia rys. 6.

W czasie trwania pomiarów starano się, aby prędkość obrotowa silnika była cały czas utrzymywana na stałym poziomie (500 obr/min), ponieważ silniki BAH pracują jako silniki napędu prądnic (i mają wtedy stałą prędkość obrotową). Zmiana prędkości obrotowej powoduje również zmiany częstotliwości składowych, a diagnozowanie przeprowadza się w określonych warunkach. Wyniki pomiarów były na bieżąco zapisywane w pamięci komputera oraz drukowane.



Rys. 6. Zależność estymat amplitudowych przyspieszeń drgań od obciążenia względnego prądnicy OW: *RMS* – wartość skuteczna, *AVER* – wartość średnia, *P-P* – wartość międzyszczytowa, *PPLUS* – wartość szczytowa dodatnia

Z rysunku 6 wynika dość wyraźna współzmienniczość estymat amplitudowych ze zmianą obciążenia. Estymaty te powinny być odzwierciedleniem prawidłowości przebiegu ciśnienia w komorze spalania silnika.

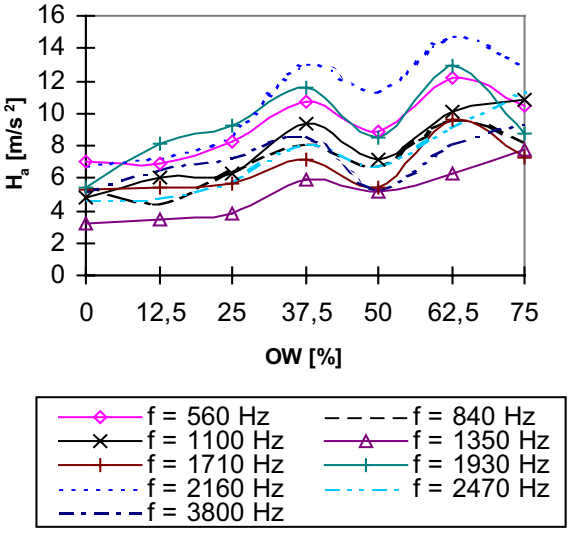
Na rysunku 7 natomiast przedstawiono wpływ obciążenia na wartości amplitud składowych widm przyspieszeń drgań. W czasie analizy uwzględniono znacznie więcej składowych, lecz wybrano te, których współzmienniczość z obciążeniem dała wartość współczynnika korelacji powyżej 0,7, co oznaczało związek ścisły pomiędzy zmiennymi [8]. Błąd względny całego toru pomiarowego nie przekraczał 4,1% [9].

Składowe stanowiły wielokrotności częstotliwości obrotowej. Na wykresie tym widoczne są przebiegi amplitud ze zmianą obciążenia, chociaż nie w większości przypadków przebiegi tych parametrów diagnostycznych są

niejednoznaczne. Przez jednoznaczność rozumiano, że każdej wartości obciążenia odpowiadała tylko jedna zdeterminowana parametru diagnostycznego.

W trakcie pomiaru przyspieszeń drgań rejestrowano także parametry pracy silnika przy zmieniającym się obciążeniu, co także daje możliwość oceny stanu technicznego.

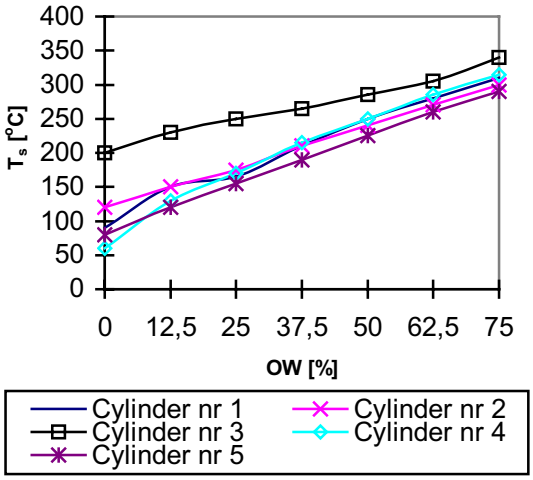
Dla porównania badanych drganiowych parametrów diagnostycznych z parametrami termodynamicznymi, na rys. 8 zamieszczono przebieg zmian temperatury spalin wylotowych z poszczególnych cylindrów silnika. Z rysunku wynika, że temperatura spalin w cylindrze nr 3 jest wyższa. Spowodowane to było nieprawidłową pracą podukładu wtryskowego tego cylindra.



Rys. 7. Zależność wartości amplitud składowych widm przyspieszeń drgań H_a od obciążenia względnego prądnicy

W badaniach wykorzystywano również analizę jakościową porównania widm bieżących (dla kolejnego obciążenia) z widmem odniesienia (dla obciążenia 75%), wraz z wyznaczeniem współczynnika korelacji, dla których uzyskano w większości jednoznaczny przebieg. Rys. 9 przedstawia zależność współczynników korelacji dla dwóch przypadków mocowania czujnika w zależności od obciążenia.

Z rys. 9 wynika liniowy wzrost kolejnych wartości współczynników korelacji dla czujnika mocowanego na śrubie dodatkowej głowicy od 0,65 do 1. Natomiast dla czujnika mocowanego na śrubie głowicy nie ma liniowego wzrostu.



Rys. 8. Zależność temperatury spalin wylotowych z poszczególnych cylindrów T_s od obciążenia względnego prądnicy OW

3.5. Analiza uzyskanych wyników

O przydatności parametrów diagnostycznych świadczą między innymi wartości współczynnika korelacji pomiędzy zmiennymi, który jest pierwiastkiem współczynnika determinacji [8]:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

gdzie:

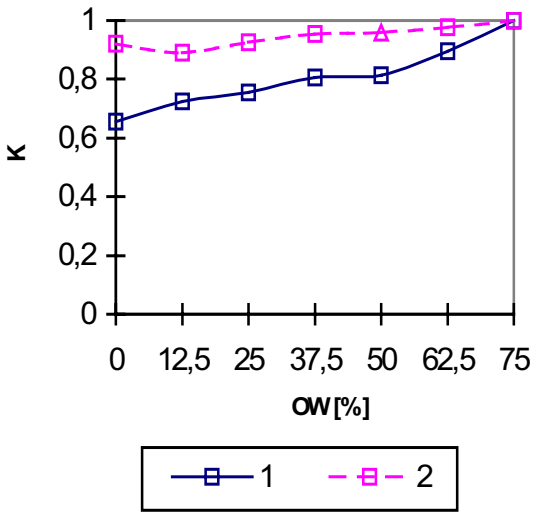
x_i – kolejna wartość danej wielkości wejściowej,

$\bar{x}$ – wartość średnia danej wielkości wejściowej w zbiorze obserwacji,

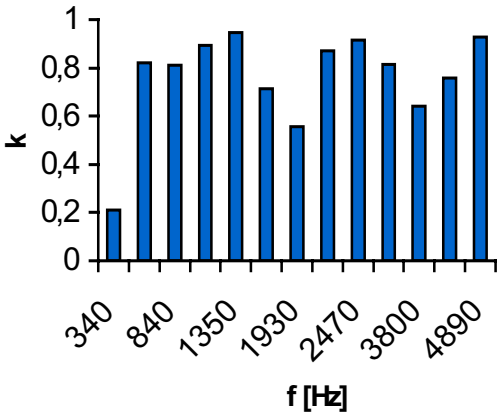
y_i – kolejna wartość danego parametru diagnostycznego,

$\bar{y}$ – wartość średnia parametru diagnostycznego.

Na rys. 10 zaprezentowano wartości współczynników korelacji składowych amplitud, w zależności od obciążenia względnego, dla czujnika mocowanego do śruby dodatkowej głowicy. Z rysunku wynika, że związki bardzo ścisłe, przy wartościach $k > 0{,}9$ [8], uzyskano dla składowych o częstotliwości 1350 Hz, 2470 Hz, 4890 Hz, dla k wynoszących odpowiednio 0,947; 0,914 i 0,927.



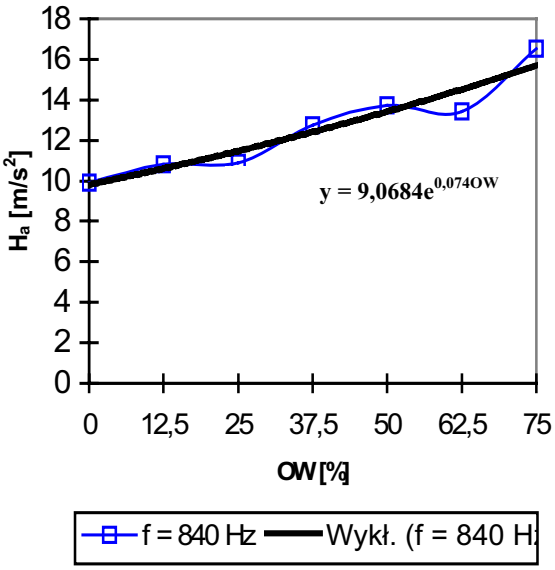
Rys. 9. Zależność współczynnika korelacji *k* od obciążenia względnego *OW*: 1 – czujnik mocowany na śrubie dodatkowej głowicy, 2 – czujnik zamocowany na śrubie głowicy silnika



Rys. 10. Wartość współczynnika korelacji *k* amplitud widm prędkości drgań dla wybranych częstotliwości od obciążenia względnego prądnicy

Przykładowy przebieg składowej widma przedstawiono na rysunku 11, aproksymując go krzywą wykładniczą wraz z podaniem równania linii aproksymującej. W tym przypadku wystąpiła zależność nieliniowa pomiędzy wartościami amplitud składowych przyspieszeń drgań a obciążeniem względnym.

Z rysunku 11 wynika, że jednoznaczny zależność z obciążeniem względnym wykazały amplitudy przy częstotliwości 840 Hz, czyli obrotowej x100 przy tej rozdzielczości.



Rys. 11. Przebieg amplitud widm rzyspieszeń drgań H_a o częstotliwości f = 840 Hz w zależności od zmian obciążenia względnego *OW* przy czujniku zamocowanym na śrubie głowicy silnika wraz z linią trendu oraz wartością współczynnika determinacji R^2

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie uzyskanych wyników wybranych zagadnień badań wykazano, że miary widmowe sygnałów drgań są dość dobrze skorelowane ze zmianą wartości obciążenia względnego *OW*, odzwierciedlającego dawki wtryśniętego paliwa i ciśnienia w komorze spalania. Nie tworzą one we wszystkich przypadkach jednoznacznych zależności, posiadają zazwyczaj ekstrema. Wyselekcjonowano jednak kilka parametrów, współzmienniczych ze zmianą obciążenia bez ekstremum, które mogą być wykorzystane do diagnozowania.

Wyselekcjonowane symptomy przyspieszeń drgań charakteryzują się podobną przydatnością diagnostyczną jak temperatura spalin wylotowych czy moc użyteczna.

Zaobserwowano, że wyniki badań dla czujnika zamocowanego do dodatkowej śruby głowicy są najkorzystniejsze w przeciwieństwie do innych mocowań. Upoważnia to do wniosku, że wynikiem tego jest zamocowanie czujnika za pomocą gwintu w śrubie dodatkowej, przez co jest bardziej wrażliwy na drgania propagowane przez silnik.

Przeprowadzone badania diagnostyczne z wykorzystaniem czujnika przyspieszeń drgań, pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

– korzystnym jest mocowanie czujnika za pomocą gwintu na śrubie dodatkowej głowicy silnika, związki współczynnika korelacji wyszły bardzo ścisłe o wartościach ponad 0,9;

– w przypadku przeprowadzenia tego typu badania na statku, warunki będą miej korzystne niż w laboratorium z uwagi na zakłócenia mechaniczne od drgań innych pracujących maszyn, będących źródłem drgań z zakłóceń;
– badania wymagały utrzymania stałego obciążenia silnika w czasie rejestracji pomiarów;
– wykorzystanie czujnika jest możliwe w określonym przez producenta paśmie częstotliwości;

Przedstawiono tutaj fragment badań z wykorzystaniem czujnika przyspieszeń drgań, przy zastosowaniu dwóch sposobów mocowania. Celowym wydaje się dalsze kontynuowanie badań w celu sprawdzenia powtarzalności wyników oraz przy symulowaniu niezdatności i odniesieniu ich innych parametrów diagnostycznych.

LITERATURA

[1] Czerycha B., Szymański G., Tomaszewski F.: *Odwzorowanie procesu spalania w sygnale drganiowym tłokowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym*. Diagnostyka 2004 vol. 30, t. 1, s. 123–126.
[2] Girtler J.: *Diagnostyka jako warunek sterowania eksploatacją okrętowych silników spalinowych*. Wyd. Wyższej Szkoły Morskiej, Szczecin 1997.
[3] Guntler H.: *Diagnozowanie silników wysokoprężnych*. WKiŁ, Warszawa 2002.
[4] Hebda M., Niziński S., Pelc H.: *Podstawy diagnostyki pojazdów mechanicznych*. WKiŁ, Warszawa 1984.
[5] Kordos P., Piernikarski D.: *Wpływ stanu technicznego wtryskiwaczy na powtarzalność pracy silnika 4C90*. KONES 2002, Warszawa – Gdańsk 2002, s. 95–103.
[6] Mendera K. Z., Gruca M.: *Wyznaczanie GMP tłoka*. Journal of KONES 2005, vol. 12, 1–2, s. 225–232.
[7] Monieta J.: *Ocena diagnostyki eksploatacyjnej okrętowych silników spalinowych napędu głównego*. V Krajowa Konferencja Diagnostyka Urządzeń i Systemów – DIAG'2003, 13–15 października 2003, s. 355–366, CD s. 1–7.
[8] Monieta J.: *Diagnostyka kontrolna wtryskiwaczy silników okrętowych z zastosowaniem parametrów procesów roboczych i towarzyszących*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, 2001 nr 4, s. 167–179.
[9] Monieta J.: *Szacowanie dokładności diagnozowania kontrolnego podzespołu silnika okrętowego*. Diagnostyka 2004 vol. 30, t. 2, s. 43–46.
[10] Polanowski S., Łutowicz M., Bruski S., Wontka L.: *Diagnostic and monitoring systems of cylinder balancing and technical state control of marine diesel engines*. Explo-Diesel & Gas Turbine'01, Gdańsk – Międzyzdroje – Kopenhaga 2001, s. 249–257.
[11] Włodarski J. K.: *Stany eksploatacyjne okrętowych silników spalinowych*. Wydawnictwo Uczelniane WSM w Gdyni 1998.
[12] Żółtowski B., Cempel C.: *Inżynieria diagnostyki maszyn*. Wyd. Biblioteka Problemów Eksploatacji, Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2004.

Dr inż. **Jan MONIETA** jest absolwentem Wydziału Maszyn Roboczych i Pojazdów Politechniki Poznańskiej. Pracuje na stanowisku adiunkta w Zakładzie Siłowni Okrętowych Akademii Morskiej w Szczecinie. W pracy naukowej zajmuje się problemami eksploatacji siłowni okrętowych, a zwłaszcza silników spalinowych. Jest autorem i współautorem 100 referatów i publikacji.

Mgr inż. **Piotr WALERIAŃCZYK** w roku 2005 ukończył Akademię Morską w Szczecinie Wydział Mechaniczny o Specjalności Eksploatacja Siłowni Okrętowych. Praktyczną wiedzę i doświadczenie zdobywa pływając na statkach niemieckiego armatora Claus-Peter Offen Reederei. Obecnie jest III Oficerem Mechanikiem.

POZYSKIWANIE WIEDZY Z BAZY DANYCH DLA POTRZEB DIAGNOZOWANIA OKRĘTOWEGO SILNIKA TŁOKOWEGO

Rafał PAWLETKO

Katedra Siłowni Okrętowych, Akademia Morska w Gdyni
ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia

Streszczenie

W artykule przedstawiono próbę wykorzystania indukcyjnych metod uczenia maszynowego, do pozyskania wiedzy dla potrzeb ekspertowego systemu diagnozowania okrętowego silnika tłokowego. Metody uczenia maszynowego zastosowano do uzyskania reguł diagnostycznych. Przykłady uczące do indukcji reguł stanowiły wyniki eksperymentu czynnego, przeprowadzonego na silniku laboratoryjnym. Oceny sprawności uzyskanych klasyfikatorów regułowych dokonano techniką *k-fold cross validation.* Wykorzystane techniki mogą zostać zastosowane między innymi do automatycznego pozyskiwania wiedzy dla potrzeb systemu ekspertowego.

Słowa kluczowe: diagnostyka techniczna, silniki spalinowe, klasyfikator regułowy.

KNOWLEDGE ACQUISITION FROM DATABASE
FOR MARINE DIESEL ENGINE DIAGNOSTIC

Summary

In this paper automatic rule induction algorithms are used to knowledge acquisition from data base for marine diesel engine diagnostic expert system. Training and test data were acquired from experiment on marine engine Sulzer 3AL 25/30. 10-fold cross validation method was used to estimation classification efficiency for different rule induction algorithms.

Keywords: technical diagnostic, combustion engines, expert knowledge acquisition.

1. WPROWADZENIE

Rozwój systemów diagnozowania okrętowych silników tłokowych jest istotnym zagadnieniem, zarówno z punktu widzenia bezpieczeństwa statku, jak i uzyskania bezpośrednich korzyści ekonomicznych związanych z eksploatacją. Istnieje obecnie szereg metod oraz systemów diagnozowania silników okrętowych, opracowanych zarówno przez ośrodki badawcze, jak i producentów silników. Główną wadą większości tych rozwiązań jest to, iż są to systemy zamknięte. Oznacza to, że algorytmy oceny stanu technicznego zaimplementowane na etapie tworzenia systemu, nie mogą być rozwijane oraz modyfikowane w czasie późniejszej eksploatacji.

Rozwiązaniem tego problemu może być wykorzystanie systemu ekspertowego do diagnozowania silników okrętowych. Modułowa struktura takiego systemu, a przede wszystkim oddzielenie bazy wiedzy od reszty programu, umożliwia opracowanie systemu otwartego, w którym wiedza diagnostyczna może być w łatwy sposób uaktualniania i rozszerzana.

Kluczowym problemem podczas budowy systemu ekspertowego jest pozyskanie wiedzy. W przypadku systemów ekspertowych z dziedziny diagnostyki technicznej, wiedza ta może być pozyskana przede wszystkim od specjalistów oraz z baz danych, w których są gromadzone informacje o przebiegu eksploatacji obiektów technicznych. Wśród metod umożliwiających pozyskiwanie wiedzy z baz danych, dominują indukcyjne metody uczenia maszynowego. Metody te powinny stanowić uzupełnienie, a w niektórych sytuacjach nawet alternatywę dla mało efektywnego pozyskiwania wiedzy od specjalistów.

W artykule podjęto próbę, zastosowania indukcyjnych metod uczenia maszynowego, do pozyskania wiedzy dla potrzeb ekspertowego systemu diagnozowania silnika okrętowego.

2. POZYSKIWANIE WIEDZY Z DIAGNOSTYCZNYCH BAZ DANYCH

Rozwój systemów informatycznych i ich powszechna dostępność, spowodowały że są one coraz częściej stosowane w siłowniach okrętowych. Współczesne systemy kontrolne, oprócz pomiaru szeregu parametrów pracy siłowni, umożliwiają także ich automatyczną rejestrację. W wyniku ich działania powstają obszerne zbiory danych, których analiza oraz poprawna interpretacja coraz częściej przekracza możliwości człowieka. W związku z tym nastąpił rozwój metod i narzędzi informatycznych, wspomagających proces pozyskiwaniu wiedzy z baz danych.

Dla potrzeb diagnostyki technicznej szczególnie przydatne okazały się indukcyjne metody uczenia maszynowego. Umożliwiają one uzyskanie wiedzy

reprezentowanej najczęściej w postaci reguł na bazie przykładów uczących.

Opracowano wiele metod umożliwiających indukcje reguł. Większość istniejących rozwiązań bazuje na algorytmie generowania kolejnych pokryć opracowanym przez R. Michalskiego. Polega on na uczeniu się pojedynczej reguły, usuwaniu przykładów, które pokrywa, i powtarzaniu procesu dla pozostałych przykładów. Wynikiem działania algorytmu jest zbiór reguł pokrywających rozważany przykład. Na tej zasadzie bazują miedzy innymi algorytmy serii AQ [3], INLEN oraz LEM [2].

Innym podejściem jest generowanie drzew decyzyjnych. Do tej grupy zaliczyć należy przede wszystkim algorytmy ID3, C4 zaproponowane przez Quinlana [9] oraz CN2. Otrzymane, w wyniku działania tych algorytmów, drzewo decyzyjne może być łatwo przekształcone do zbioru reguł.

Współczesne bazy danych bardzo często zawierają dane numeryczne, tj. liczby całkowite lub rzeczywiste. Większość algorytmów indukcji reguł wymaga natomiast przykładów uczących, reprezentowanych przez atrybuty dyskretne. W pracy [2] zaproponowano następujące dwa sposoby rozwiązania tego problemu:

- zastosowanie metod wstępnej dyskretyzacji danych,
- wybór specjalizowanego algorytmu, dostosowanego do indukcji reguł bezpośrednio z danych numerycznych.

W pierwszym rozwiązaniu przed użyciem algorytmu indukcji reguł realizuje dyskretyzację wstępną. Polega ona na zamianie atrybutów numerycznych atrybutami symbolicznemi. Proces ten realizuje się poprzez podział oryginalnej dziedziny atrybutu numerycznego na pewną liczbę podprzedziałów i przypisaniu tym przedziałom kodów symbolicznych. Dotychczas zaproponowano wiele metod dyskretyzacji wstępnej, których klasyfikacja bazuje przede wszystkim na rodzaju informacji wykorzystywanych podczas przetwarzania danych. Metody, które wykorzystują informacje o przydziale obiektów do poszczególnych klas zalicza się do nadzorowanych w przeciwieństwie do metod nienadzorowanych, w których ta informacja nie jest wykorzystywana. Podział na metody globalne i lokalne jest różnicowany z zależności od tego czy dyskretyzacja jest realizowana jednakowo na całej dziedzinie atrybutu (globalna) czy też, w różny sposób dla różnych jej obszarów (lokalna) [9].

Stosowanie dyskretyzacji wstępnej, nie jest konieczne w przypadku zastosowania algorytmu umożliwiającego indukcje reguł bezpośrednio z danych numerycznych. Niewątpliwą korzyścią takiego rozwiązania jest uproszczenie procesu pozyskiwania wiedzy, poprzez wyeliminowanie etapu wstępnej dyskretyzacji danych. Przykładem algorytmu umożliwiającego indukcję bez stosowania dyskretyzacji wstępnej jest algorytm MODLEM [2].

Należy podkreślić, że dla różnych zbiorów danych, skuteczne są różne strategie pozyskiwania wiedzy. Istnieje konieczność doboru właściwej metody dla konkretnych danych na drodze eksperymentalnej. Nie istnieje bowiem uniwersalna skuteczna metoda dla dowolnych zastosowań.

4. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Celem badań było uzyskanie reguł, umożliwiających ocenę stanu okrętowego silnika spalinowego, na podstawie informacji o przebiegu eksploatacji zgromadzonych w bazie danych.

Zbiór reguł uzyskano za pomocą wybranych metod indukcji reguł. Porównano wyniki uzyskane klasycznym algorytmem LEM2 z algorytmem MODLEM, który umożliwia zastosowanie danych nie poddanych wcześniejszej dyskretyzacji.

Oceny przydatności algorytmów indukcji reguł, dokonano na danych pozyskanych w ramach eksperymentu czynnego na silniku laboratoryjnym.

Obiektem badań był czterosuwowy silnik typu Sulzer 3Al 25/30 o mocy nominalnej Nn=408 kW i prędkości obrotowej n=750 obr/min doładowany turbosprężarką. Silnik został wyposażony w układ pomiarowy, umożliwiający rejestrację podstawowych parametrów roboczych, takich jak ciśnienia i temperatury spalin, powietrza doładowującego, wody chłodzącej oraz oleju smarnego. Dodatkowo były mierzone przebiegi ciśnień szybkozmiennych w cylindrach silnika oraz w przewodach paliwowych. Wszystkie parametry były automatycznie zapisywane w bazie danych zintegrowanej z systemem pomiarowym.

Program badań zrealizowano zgodnie z planem eksperymentu czynnego. Podczas eksperymentu symulowano jeden poziom określonego uszkodzenia, następnie dokonywano pomiarów wszystkich parametrów, w zakresie pracy silnika od 50 do 250 kW. Doświadczenie nie uwzględniało występowania wielu uszkodzeń jednocześnie oraz różnego poziomu natężenia danego uszkodzenia.

Uwzględniono następujące uszkodzenia silnika:

- spadek wydajności sprężarki powietrza,
- zanieczyszczenie filtra powietrza,
- zanieczyszczenie chłodnicy powietrza,
- zużycie pompy wtryskowej na cyl. nr 2,
- zakoksowanie wtryskiwacza na cyl. nr 2,
- zanieczyszczenie traktu wydechowego.

Wyniki pomiarów zostały zarejestrowane w bazie danych a następnie przekształcone do postaci tablicy decyzyjnej. Taka forma reprezentacji danych jest bowiem wymagana przez zastosowane algorytmy indukcji reguł. Poszczególne przykłady uczące są w takiej sytuacji opisane w wierszach tablicy, za pomocą zbioru atrybutów. Jeden z tych atrybutów jest atrybutem decyzyjnym określającym przynależność przykładu do określonej klasy decyzjnej [2].

Uzyskana tablica zawierała 215 przykładów uczących, każdy opisany 43 atrybutami typu

numerycznego. Przykłady obejmowały 6 symulowanych uszkodzeń silnika.

W związku z tym, iż algorytm LEM2 nie powinien być stosowany bezpośrednio do danych numerycznych, zastosowano dyskretyzację wstępną. Dyskretyzację zrealizowano zarówno metodą globalną, jak i metodą lokalną.

Badane algorytmy indukcji (LEM2 oraz MODLEM) zastosowano zarówno do danych nie poddanych dyskretyzacji, jak i poddanych dyskretyzacji metodą lokalną i globalną.

Do badań wykorzystano oprogramowanie opracowane przez Zakład Inteligentnych Systemów Wspomagania Decyzji Politechniki Poznańskiej o nazwie ROSE2 [10, 11].

5. OCENA WYNIKÓW EKSPERYMENTU

Ocena uzyskanych zbiorów reguł była realizowana w perspektywie klasyfikacji. Oznacza to, że każdorazowo na podstawie reguł budowano klasyfikator, który był poddawany ocenie.

Ocena sprawności działania klasyfikatora obejmowała zarówno przykłady uczące, które służyły do budowy klasyfikatora, jak i przykłady nowe – nie znane podczas nauki. Można w ten sposób zweryfikować zdolność klasyfikatora do uogólniania pozyskanej wiedzy. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem jest podział zbioru dostępnych przykładów na część uczącą oraz testującą, służącą do estymacji wybranej miary oceny klasyfikatora. Sposób podziału zbioru jest losowy i zależy przede wszystkim od liczby dostępnych przykładów.

Na potrzeby pracy zastosowano technikę *k-fold cross validation*. W metodzie tej zbiór przykładów jest losowo podzielony na *k* podzbiorów U=E1∪...∪Ek. W i-tej iteracji (1 ≤ i ≤ k), zbiór uczący stanowi zbiór Eu=U\Ei, a sam zbiór Ei jest zbiorem przykładów testowych. Trafność klasyfikowania jest wyliczana jako wartość średnia z trafności estymowanych w każdej iteracji. Warunkiem stosowania tej techniki jest liczba przykładów powyżej 100. Dobór parametru *k* powinien być uzależniony od liczebności przykładów. Przyjęto wartość k=10.

W tabeli 1 przedstawiono liczbę reguł oraz trafności klasyfikacji, uzyskane techniką *10-fold cross validation* dla badanych algorytmów indukcji reguł decyzyjnych.

Uzyskane wyniki potwierdzają wysoką skuteczność algorytmu MODLEM, dla danych nie poddanych wcześniejszej dyskretyzacji. Uzyskana trafność klasyfikacji estymowana techniką *10-fold cross validation* wyniosła 92%. Trafność klasyfikacji uzyskana algorytmem LEM2 wyniosła w tym przypadku 10%. W przypadku zastosowania dyskretyzacji wstępnej uzyskano zbliżone, bardzo wysokie, wyniki skuteczności klasyfikacji dla obydwu algorytmów. Należy również stwierdzić, że w badanym przypadku, zdecydowanie najlepsze rezultaty uzyskano przy zastosowaniu dyskretyzacji wstępnej metodą lokalną.

Niewątpliwą zaletą algorytmu MODLEM w stosunku do LEM2, jest możliwość wykorzystania bezpośredniego danych numerycznych, nie poddanych dyskretyzacji wstępnej. Z jednej strony, upraszcza to sam proces pozyskiwania wiedzy, z drugiej warunkuje bezpośrednio czytelność i łatwość interpretacji uzyskanych reguł. Użytkownik systemu ekspertowego ma w takiej sytuacji bezpośredni podgląd wartości cech zawartych w przesłankach reguły.

Tab. 1. Porównanie wyników trafności klasyfikacji uzyskanych algorytmami LEM2 oraz MODLEM

Rodzaj dyskretyzacji wstępnej	**Algorytm indukcji reguł**	**Ilość uzyskanych reguł**	**Trafność klasyfikacji (*10-fold cross validation*)**
Bez dyskretyzacji	LEM2	132	10 %
	MODLEM	9	92 %
Dyskretyzacja wstępna metodą lokalną	LEM2	17	97 %
	MODLEM	14	97 %
Dyskretyzacja wstępna metodą globalną	LEM2	43	84 %
	MODLEM	45	79 %

5. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań wstępnych, nad możliwością zastosowania indukcyjnych metod uczenia maszynowego, do pozyskania wiedzy diagnostycznej z baz danych, dla potrzeb diagnozowania silnika okrętowego można stwierdzić:Zastosowane algorytmy indukcji reguł pozwoliły na pozyskanie wiedzy z diagnostycznej bazy danych zawierającej wyniki eksperymentu.

- Uzyskane klasyfikatory regułowe, charakteryzują się wysoką sprawnością klasyfikacji.
- Stwierdzono zdecydowaną przewagę algorytmu MODLEM nad LEM2 w odniesieniu do danych rzeczywistych nie poddanych dyskretyzacji wstępnej. Uzyskana średnia trafność klasyfikacji estymowana metodą *10-fold cross validation* dla algorytmu MODLEM wyniosła aż 92 % w porównaniu z 10 % LEM2.
- Po zastosowaniu dyskretyzacji wstępnej brak jest istotnych różnic pomiędzy badanymi algorytmami.
- Zastosowanie algorytmu MODLEM upraszcza proces pozyskiwania wiedzy (nie ma potrzeby stosowania dyskretyzacji danych) oraz ułatwia interpretacje uzyskanych reguł.
- Algorytmy automatycznej indukcji, mogą być wykorzystywane do pozyskiwania wiedzy z baz danych, dla potrzeb diagnostycznego systemu ekspertowego.

LITERATURA

[1] Cholewa W.: *Metoda diagnozowania maszyn z zastosowaniem zbiorów rozmytych*, ZN Pol. Śląskiej nr 764, Seria: Mechanika z. 79, Gliwice 1983.
[2] Stefanowski J.: *Algorytmy indukcji reguł decyzyjnych w odkrywaniu wiedzy*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Rozprawy nr 361, Poznań 2001.
[3] Michalski R. S.: *A theory and methodology of inductive learning*, Artificial Inteligence 20 (1983), pp. 111-161
[4] Moczulski W.: *Metody pozyskiwania wiedzy dla potrzeb diagnostyki maszyn*, ZN Pol. Śląskiej nr 1382, Seria: Mechanika z. 130, Gliwice 1997.
[5] Mulawka J.: *Systemy eksp*ertowe, WNT, Warszawa 1996.
[6] Żółtowski B., Cempel Cz.: *Inżyniera Diagnostyki Maszyn*, Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Instytut Technologii Eksploatacji PIB Radom, Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2004.
[7] Quilian J. R.: *Induction of decision trees*. Machine Learning, 1 (1986).
[8] Michalski R. S.: *A theory and methodology of inductive learning*, Artificial Inteligence 20 (1983).
[9] Cichosz P.: *Systemy uczące się*. WNT, Warszawa 2007.
[10] B. Predki, R. Slowinski, J. Stefanowski, R. Susmaga, Sz. Wilk: *ROSE – Software Implementation of the Rough Set Theory*. In: L. Polkowski, A. Skowron, eds. Rough Sets and Current Trends in Computing, Lecture Notes in Artificial Intelligence, vol. 1424. Springer-Verlag, Berlin (1998), 605-608.
[11] B. Predki, Sz. Wilk: *Rough Set Based Data Exploration Using ROSE System*. In: Z. W. Ras, A. Skowron, eds. Foundations of Intelligent Systems, Lecture Notes in Artificial Intelligence, vol. 1609. Springer-Verlag, Berlin (1999), 172-180.

Mgr inż. **Rafał PAWLETKO** jest asystentem w Katedrze Siłowni Okrętowych, Wydziału Mechanicznego Akademii Morskiej w Gdyni. Zajmuje się diagnostyką okrętowych silników spalinowych.

ZNACZENIE POMIARU MASOWEGO NATĘŻENIA PRZEPŁYWU POWIETRZA PRZEZ SPRĘŻARKĘ W DIAGNOSTYCE UKŁADU DOŁADOWANIA SILNIKA OKRĘTOWEGO

Kazimierz WITKOWSKI

Akademia Morska w Gdyni, Katedra Siłowni Okrętowych
ul. Morska 83, 81-225 Gdynia
tel. (081) 690 13 32: e-mail: wika@am.gdynia.pl

Streszczenie

W referacie przeanalizowano możliwość diagnozowania elementów turbosprężarkowego układu doładowania okrętowego silnika o zapłonie samoczynnym. Omówiono znaczenie diagnostyki tego układu wskazując najważniejsze konsekwencje wynikające z zakłócenia procesu wymiany ładunku spowodowane pogorszeniem pracy układu doładowania.

Omówiono problem oceny w warunkach eksploatacyjnych stanu technicznego filtra powietrza, sprężarki ładującej chłodnicy powietrza oraz turbiny. Wykazano istotne znaczenie pomiaru masowego natężenia przepływu powietrza przez sprężarkę w diagnostyce parametrycznej układu doładowania. W oparciu o wyniki badań własnych wykazano możliwość wykorzystania w praktyce eksploatacyjnej, do pomiaru masowego natężenia przepływu powietrza, pomiaru spadku ciśnienia na konfuzorze sprężarki.

Słowa kluczowe: diagnostyka, silnik okrętowy, układ doładowania, sprężarka powietrza.

MEASUREMENT MEANING MASS INTENSITY OF AIR FLOWING TROUGH THE COMPRESSOR IN DIAGNOSTIC TURBOCHARGER SYSTEM OF SHIP'S ENGINE

Summary

The aim of the following paper is to analyze diagnostic possibilities concerning the elements of turbocharger system in ship's diesel engine. Demeaning of diagnostics of this system has also been discussed pointing out the most important consequences resulting from disturbances taking place in the process of gas charge exchange caused by deterioration of supercharger system activity. Evaluation problem concerning technical condition of air filter, supercharger, air cooler and turbine during exploatation process, has also been taken into consideration.

Mass intensity of air flowing trough the compressor and the importance of its measurement has been pointer out in parameter diagnostic of turbocharger system. Basing also on own research work it was possible to show a chance of using it in exploatation practice. To measure mass intensity of air flow, it is advised to measure pressure drop on the confusor of the compressor.

Keywords: diagnostics, marine diesel engines, turbocharger system, air compressor.

1. WSTĘP

Silniki okrętowe zarówno napędu głównego jak i pomocnicze są doładowane turbosprężarkami. Układ ładujący, obok układu wtryskowego, ma zasadniczy wpływ na jakość przebiegu procesu roboczego, na ekonomikę i niezawodność pracy silnika.

Zastosowanie do doładowania turbosprężarek umożliwia wykorzystanie energii zawartej w spalinach. Pomiędzy silnikiem a turbosprężarką istnieje tylko połączenie gazodynamiczne: od strony turbiny strumieniem spalin i od strony sprężarki strumieniem powietrza. Z bilansu mocy rozwijanej przez turbinę i zapotrzebowanej przez sprężarkę wynika ilość energii wykorzystanej do sprężania powietrza w układzie doładowującym.

Struktura układu mechaniczno-przepływowego turbosprężarki i jego jakość jest kształtowana na etapie projektowania [14, 15]. Strukturę tą opisuje zbiór wartości cech konstrukcyjnych, w tym:
- połączenie turbosprężarki z silnikiem (fundament),
- kolektor dolotowy,
- sprężarka,
- kolektor wylotowy,
- turbina,
- wał turbosprężarki,
- łożyska wału turbosprężarki.

Pogorszenie się stanu technicznego układu doładowania jest jednoznaczne z pogorszeniem się przebiegu procesu roboczego silnika, lecz nie zawsze musi bezpośrednio i natychmiast wpływać na osiągi i parametry silnika.

Z uwagi na istotny wpływ układu doładowującego na pracę silnika, wzajemne relacje między przebiegiem procesu roboczego a pracą tego układu, należy w eksploatacji na bieżąco diagnozować jego stan, w tym turbosprężarki i chłodnicy powietrza. Istnieje ścisła zależność i wzajemne oddziaływanie (sprzężenie zwrotne) pomiędzy zespołem powietrza ładującego (sprężarki, chłodnicy), procesem roboczym, turbiną napędzającą sprężarkę i sprężarką.

Złożoność konstrukcji współczesnych turbosprężarek i odpowiedzialność za jakość realizowanych zadań powoduje konieczność zapewnienia użytkownikowi szybkiej i wiarygodnej informacji o ich aktualnym stanie technicznym. Umożliwiają to różnorodne metody diagnostyczne [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7], wykorzystujące generowane przez maszynę procesy, parametry i inne wielkości zawierające informacje diagnostyczne.

Ocenę pracy zespołu ładującego dokonuje się zazwyczaj na podstawie następujących parametrów:

- temperatury i ciśnienia powietrza ładującego w zasobniku powietrza t_d, p_d,
- spadku ciśnienia na filtrze i chłodnicy powietrza Δp_f, Δp_{ch},
- temperatury spalin przed i za turbiną $t_{wyl\,1}$, $t_{wyl\,2}$,
- temperatury wody zaburtowej przed i za chłodnicą $t_{chł\,1}$ i $t_{chł\,2}$,
- prędkości obrotowej turbosprężarki n_{TS},
- spadku ciśnienia na kotle utylizacyjnym Δp_{ku} – przeciwciśnienie wydechu.

W praktyce eksploatacyjnej w diagnostyce układu ładującego nie wykorzystuje się masowego natężenia przepływu powietrza przez sprężarkę $\dot{m}_S$ i nie jest niestety realizowany pomiar tej wielkości. W diagnostyce sprężarki jest to jednak podstawowy parametr wyjściowy, a dla pozostałych elementów układu wejściowy.

2. OCENA STANU TECHNICZNEGO FILTRA POWIETRZA

Postępujące zanieczyszczenie filtra powietrza powoduje zmniejszenie jego przekroju czynnego wywołane odkładaniem się osadów na wkładzie filtracyjnym. Wzrastają opory przepływu i spada skuteczność filtracji. Po osiągnięciu granicznej wartości siły przyczepności aglomeratów do włókien filtracyjnych, kończy się zakres stabilnej pracy filtra. Wzrastają siły aerodynamiczne i aglomeraty odrywane są od włókien. Wzrost oporów przepływu na filtrze objawia się zakłóceniem przepływu strumienia zasysanego powietrza i pogorszeniem pracy sprężarki.

Spada ciśnienie na dolocie do sprężarki o wartość spadku ciśnienia na filtrze Δp_f. Jednocześnie przy zachowaniu niezmiennego sprężu sprężarki π_S spada ciśnienie powietrza za sprężarką p_k, następuje zmniejszenie masowego natężenia przepływu powietrza $\dot{m}_s$ oraz współczynnik nadmiaru powietrza λ [11].

W konsekwencji dojdzie między innymi do spadku ciśnienia doładowania p_d, wzrostu temperatury spalin T_g i prędkości obrotowej turbosprężarki n_{TS} oraz spadku maksymalnego ciśnienia spalania p_{max}. Może to doprowadzić również do wzrostu jednostkowego zużycia paliwa. Jak z powyższych rozważań wynika, konsekwencją zanieczyszczenia filtra powietrza sprężarki jest:

$$Z_f \Rightarrow (\Delta p_f\uparrow;\ p_k\downarrow;\ p_d\downarrow;\ \dot{m}_s\downarrow) \Rightarrow (g_e\uparrow;\ T_g\uparrow;\ \lambda\downarrow;\ p_{max}\downarrow)$$

3. OCENA STANU TECHNICZNEGO SPRĘŻARKI POWIETRZA

W kanałach przepływowych sprężarki powietrza, pomimo zabezpieczenia filtrem, odkładają się zanieczyszczenia. Jest to przede wszystkim lepka oleista masa, słabo związana z powierzchnią elementów. W turbosprężarkach, które zasysają powietrze z siłowni okrętowej przekrój dyfuzora sprężarki po około 2000 godzin pracy może zmniejszyć się od 10 do 20 % [16]. Osady na ściankach kanałów przepływowych oraz erozyjne oddziaływanie aerozolu morskiego powodują wzrost strat tarcia i zmianę kątów natarcia i spływu łopatek oraz aerodynamikę przepływu. W skutek tego wystąpi zmniejszenie sprawności sprężarki η_S i ilości powietrza dostarczanego do silnika. Wpływa to na przebieg procesu roboczego, spadek ilości gazów dochodzących do turbiny, a więc i na spadek prędkości obrotowej turbosprężarki. Spadek ilości powietrza dostarczanego do silnika może spowodować pogorszenie przepłukania cylindra, wzrost obciążeń cieplnych elementów komory spalania oraz wzrost temperatury gazów wylotowych [12]. Jak z powyższego wynika, konsekwencją zanieczyszczenia sprężarki jest:

$$Z_S \Rightarrow (\eta_S\downarrow;\ \pi_S\downarrow;\ p_k\downarrow;\ p_d\downarrow;\ \dot{m}_s\downarrow) \Rightarrow (g_e\uparrow;\ T_g\uparrow;\ \lambda\downarrow;\ p_{max}\downarrow)$$

4. OCENA STANU TECHNICZNEGO TURBINY UKŁADU ŁADUJĄCEGO

We współczesnych układach ładujących sprężarka napędzana jest najczęściej osiową turbiną (rzadziej stosuje się turbiny zasilane promieniowo). Podczas pracy turbina ulega zanieczyszczeniu. Mogą również wystąpić uszkodzenia mechaniczne łopatek spowodowane przez różne ciała stałe np. fragmenty uszkodzonych elementów silnika i twardego koksu, których nie zatrzymała siatka ochronna turbiny. cylindrowych.

Producenci silników okrętowych przewidując możliwość postępującego zanieczyszczania turbiny wyposażają silnik w instalację do mycia turbiny wodą, wodą z dodatkiem środków powierzchniowo

czynnych [1] lub jej czyszczenia na sucho (granulatami). Czynności te powinny być wykonywane okresowo, zgodnie z zaleceniami producenta, co pozwala przywracać turbinie dobry stan techniczny (utrzymywać turbinę w czystości). Osady na powierzchniach przepływowych powodują zmianę ich profilu, zmniejszenie przekroju czynnego, wzrost oporów przepływu gazów, co wywołuje następujące skutki w pracy układu ładującego:

$$Z_T \Rightarrow (\pi_T\uparrow;\ \eta_T\downarrow;\ p_{wp}\uparrow;\ \dot{m}_s\downarrow) \Rightarrow (g_e\uparrow;\ T_g\uparrow;\ \lambda\downarrow)$$

5. MOŻLIWOŚCI I ZNACZENIE POMIARU WYDAJNOŚCI SPRĘŻARKI W DIAGNOSTYCE UKŁADU ŁADUJĄCEGO SILNIKA OKRĘTOWEGO

5.1. Natężenie przepływu powietrza przez sprężarkę

Jak wynika z wcześniejszych rozważań, a także wielu innych analiz [8, 9, 13], natężenie przepływu czynnika przez układ ładujący powinno odgrywać w jego diagnostyce rolę podstawową. Wynika to między innymi z faktu, że w bilansie tego układu jednym z najważniejszych warunków jest bilans ciągłości przepływu masy, tj.:

$$\dot{m}_S = \dot{m}_C \quad \text{i} \quad \beta \cdot \dot{m}_C = \dot{m}_T \tag{5.1}$$

gdzie:

$\dot{m}_S$ - masowe natężenie przepływu powietrza przez sprężarkę [kg/s],

$\dot{m}_C$ - masowe natężenie przepływu powietrza przez cylindry [kg/s],

$\dot{m}_T$ - masowe natężenie przepływu gazów przez turbinę [kg/s],

β - współczynnik uwzględniający wzrost masy gazów w stosunku masy powietrza, na skutek dostarczonej do cylindrów dawki paliwa.

5.2. Sposoby wyznaczania natężenia przepływu powietrza przez sprężarkę

W warunkach laboratoryjnych czy hamownianych najczęściej wykorzystywanym sposobem wyznaczania masowego natężenia przepływu powietrza $\dot{m}_S$ przez sprężarkę jest pomiar za pomocą tzw. leminiskaty. Bezpośrednio mierzoną wielkością jest spadek ciśnienia na leminiskacie. Następnie w oparciu o właściwe zależności matematyczne wylicza się $\dot{m}_S$. Jest to wprawdzie metoda bardzo dokładna, ale w praktyce eksploatacyjnej nie wykorzystywana.

Inną wskazywaną metodą jest pomiar spadku ciśnienia na konfuzorze dolotowym sprężarki [13] i wykorzystanie zależności:

$$\dot{m}_S = k \cdot \sqrt{\Delta p_{konf}} \tag{5.2}$$

gdzie:

$\dot{m}_S$ - masowe natężenie przepływu powietrza [kg/s],

k – stała, charakterystyczna dla danego układu doładowania [-],

Δp_{konf} – spadek ciśnienia na konfuzorze sprężarki [mmH_2O].

Z uwagi na prostotę wskazanej metody powinna być ona stosowana powszechnie. Autorowi nie jest jednak znany przypadek praktycznego wykorzystywania tej metody i dlatego postanowiono sprawdzić, czy jest ona skuteczna i dostatecznie dokładna. W tym celu przeprowadzono badania laboratoryjne na silniku okrętowym, w celu wyznaczenia dla danego układu ładującego stałej „k" oraz sprawdzając czy współczynnik ten nie ulega zmianie podczas zmiany stanów eksploatacyjnych silnika.

5.3. Badania laboratoryjne

Badania przeprowadzono na okrętowym czterosuwowym silniku SULZER 3AL25/30, doładowanym turbosprężarką VTR160N. Ich celem było sprawdzenie skuteczności metody wyznaczania masowego natężenia przepływu powietrza przez sprężarkę w oparciu o pomiar spadku ciśnienia na jej konfuzorze (Δp_{konf}). Korzystając z możliwości wyznaczania $\dot{m}_S$ przy pomocy leminiskaty, oraz mierząc Δp_{konf}, wyznaczano współczynnik „k" występujący w zależności 5.2. Pomiary wykonywano wielokrotnie – dla różnych obciążeń silnika i temperatur powietrza na dolocie do silnika. Badania przeprowadzono w zakresie obciążeń silnika od 200 do 280 kW, oraz dla temperatur powietrza ładującego 45, 50, 55, 60 i 65 ^{0}C. Dla każdego ze stanów wyznaczano masowe natężenie przepływu powietrza przez sprężarkę w oparciu o leminiskatę, oraz mierzono spadek ciśnienia na konfuzorze sprężarki. Pozwoliło to każdorazowo wyliczyć wartość współczynnika *k.* Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 5.1. Niezależnie od obciążenia silnika oraz temperatury powietrza ładującego, współczynnik *k,* każdorazowo wyliczany w oparciu o wyznaczone $\dot{m}_S$ i pomierzone Δp_{konf}, ma wartość stałą w przybliżeniu równą 0,18. Średnia wartość *k* dla całego cyklu pomiarowego tj, z 75 pomiarów (25 stanów, na każdym z nich 3 pomiary równoległe) wynosi 0,179.

6. WNIOSKI

Wśród wielu wielkości mających istotne znaczenie w diagnostyce układu ładującego, bardzo ważnym parametrem jest natężenie przepływu powietrza przez sprężarkę.

W diagnostyce sprężarki jest to podstawowy parametr wyjściowy, a dla pozostałych elementów układu wejściowy.

Wyznaczanie tej wielkości w praktyce eksploatacyjnej powinno być powszechne, a metoda oparta o spadek ciśnienia powietrza na konfuzorze sprężarki jest na tyle prosta, a jednocześnie dostatecznie dokładna, aby poważnie ją rozważać w zastosowaniu do eksploatacji silników okrętowych.

Wyznaczenie stałej k charakterystycznej dla danego układu ładującego powinien wykonać producent silnika, po zakończeniu procedur doboru turbosprężarki i wpisać wartość k do dokumentacji turbosprężarki.

Tabela 5.1. Wyniki pomiarów

t_k [^oC]	N_e [kW]	Δp_{konf} [mmH_2O]	$\dot{m}_s$ [kg/h]	k [-]
45	200	9	0,5452	0,1868
	220	10	0,5853	
	240	10	0,6169	
	260	12	0,6519	
	280	14	0,6885	
50	200	9	0,5445	0,1804
	220	10	0,5776	
	240	12	0,6152	
	260	12	0,6404	
	280	15	0,6809	
55	200	10	0,5446	0,1752
	220	11	0,5534	
	240	12	0,6179	
	260	13	0,6092	
	280	15	0,6769	
60	200	9	0,5404	0,1761
	220	11	0,5718	
	240	12	0,6092	
	260	13	0,6408	
	280	15	0,6769	
65	200	8	0,5376	0,1805
	220	10	0,5676	
	240	11	0,6052	
	260	13	0,6399	
	280	15	0,6708	
Wartość średnia *k* :				**0,179**

Literatura.

[1]. Charchalis A.: *Diagnozowanie okrętowych silników turbinowych*. AMW, Gdynia 1991.
[2]. Charchalis A.: *Diagnozowanie zanieczyszczeń kanału przepływowego turbinowych silników spalinowych na podstawie wielkości opisujących rozruch.* Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, PAN nr1-2, 1993.
[3]. Charchalis A.: *Komputerowy system pomiarowy dla oceny charakterystyk napędowych oraz stanu technicznego siłowni kombinowanych.* Wydawnictwo politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1995.
[4]. Charchalis A.: *System diagnozowania okrętowych układów napędowych z turbinowymi silnikami spalinowymi*. Problemy eksploatacji, 4/97 (27).
[5]. Charchalis A., Korczewski Z.: *Metody diagnozowania okrętowych turbinowych silników spalinowych*. Przegląd mechaniczny. Z. 3-4, 1997.
[6]. Cholewa W., Drobniak S., Elsner W., Kiciński J.: *Zintegrowany system nadzoru diagnostycznego turbozespołu*. ZN WSI, Opole, 1996.
[7]. Dąbrowski Z.: *Wykorzystanie efektu rezonansu nieliniowego jako symptomu w diagnozowaniu silników turbinowych.* III Sympozjum Naukowo-Techniczne „Silniki spalinowe w zastosowaniach wojskowych", Jurata, 1997.
[8]. Włodarski J. K.: *Okrętowe silniki spalinowe. Podstawy teoretyczne*. Wydawnictwo WSM, Gdynia 1996.
[9]. Włodarski J. K.: *Stany eksploatacyjne okrętowych silników spalinowych.* Fundacja Rozwoju WSM, Gdynia 2001.
[10]. Witkowski K., Piotrowski I.: *Eksploatacja okrętowych silników spalinowych.* Fundacja Rozwoju WSM, Gdynia 2001.
[11]. Witkowski K.: *Wpływ zanieczyszczenia filtra powietrza na parametry procesu roboczego.* Budownictwo Okrętowe 5/1989.
[12]. Witkowski K.: *Wpływ niesprawności sprężarki i chłodnicy powietrza na parametry procesu roboczego silnika spalinowego.* Budownictwo Okrętowe 9/1989.
[13]. Woznickij I. W., inni: *Raboczije procesy sudowych dizjelej.* Transport, Moskwa 1979.
[14]. Żółtowski B.: *Identyfikacja diagnostyczna obiektów technicznych*. Zagadnienia Eksploatacji maszyn. Z.1(105) PAN, 1996.
[15]. Żółtowski B., Ćwik. Z.: *Methoden der technischen Identifikation der Objekte.* IV Kolloquim Technische Diagnostik. Technische Universitat Dresden, 1966 (s.98-116).
[16]. *Turbocharger compressors – the phenomenon of surfing.* Turbo Magazine, 1995. ABB Turbo Systems Ltd., Switzerland.

Kazimierz WITKOWSKI ur. w 1955 r. Doktor nauk technicznych, adiunkt w Katedrze Siłowni Okrętowych Akademii Morskiej w Gdyni. Jego zainteresowania obejmują zagadnienia z zakresu eksploatacji i diagnostyki okrętowych silników spalinowych.

STRATY MECHANICZNE SILNIKA A LEPKOŚĆ OLEJU SMAROWEGO W ASPEKCIE DIAGNOSTYKI OKRĘTOWEGO TŁOKOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

Leszek WONTKA

Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów, Akademia Marynarki Wojennej,
ul. Inż. Śmidowicza 69, 81–103 Gdynia, tel: 058 626 27 58, email: wontka@wp.pl

Streszczenie

W artykule omówiono możliwości wykorzystania wyników pomiarów ciśnień indykowanych do wyznaczania średniego ciśnienia indykowanego silników tłokowych. Traktując tłokowy silnik spalinowy jako uogólniony węzeł tarcia, straty mechaniczne silnika odzwierciedlają jego stan techniczny. Wyznaczenie średniego ciśnienia indykowanego silnika na biegu jałowym będącego w istocie średnim ciśnieniem strat mechanicznych pozwala sformułować diagnozę o stanie technicznym układu tłok – pierścienie tłokowe – tuleja cylindrowa oraz o łożyskowaniu silnika. Jednak, aby diagnoza była wiarygodna konieczne jest przedstawienie średniego ciśnienia strat mechanicznych jako funkcji lepkości oleju smarowego. Zaprezentowano także wyniki badań diagnostycznych wybranych silników okrętowych eksploatowanych na okrętach Marynarki Wojennej RP.

Słowa kluczowe: tłokowy silnik okrętowy, średnie ciśnienie indykowane, straty mechaniczne.

ENGINE MECHANICAL LOSSES VERSUS LUBRICATING OIL VISCOSITY AS AN ASPECT OF MARINE RIC ENGINE DIAGNOSIS

Summary

Possibilities of indicated pressure measurements using to asses mean indicated pressure of RIC engines has been presented in this paper. Looking at the RIC engine as a generalized friction centre, we could say that mechanical losses may be used as a tool to asses its technical condition. Mean indicated pressure on idle speed is as a fact equal to mean pressure of a mechanical losses and it is enough to make diagnosis about technical state of the engine cylinder-piston groups and bearings. But to make the diagnosis more accurate it is necessary to analyze mean pressure of mechanical losses as a function of lubricating oil viscosity. Some results taken from measurements made on Polish Navy ships are also presented in the paper.

Keywords: marine diesel engine, mean indicated pressure, mechanical losses.

1. OKREŚLENIE I MIARY STRAT MECHANICZNYCH TŁOKOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

W technice pod pojęciem strat mechanicznych rozumie się straty energii maszyny na pokonanie własnych oporów ruchu. W szczególności, straty mechaniczne tłokowego silnika spalinowego określa się jako straty energii wytworzonej w komorze spalania zużytej na pokonanie oporów własnych silnika [13]. Określenie „straty mechaniczne" ma swoje źródło w wewnętrznym bilansie cieplnym silnika, gdzie energia „stracona" na pokonanie oporów własnych silnika występuje obok innych strat energii np. strat chłodzenia, czy też strat wylotowych, chociaż „de facto" jest ich składową [13]. W nieco starszych publikacjach, np. w [7] nie występuje określenie „straty mechaniczne", ale po prostu „opory ruchu", to jednak obecnie pojęcie „straty mechaniczne" lub w języku angielskim „mechanical losses" przyjęło się na dobre i jest powszechnie używane przez uznane autorytety z dziedziny tłokowych silników spalinowych [2, 8, 12].

Straty mechaniczne można przedstawić za pomocą następującej reguły:

$$Q_m = L_i - L_e \tag{1}$$

gdzie: Q_m – ciepło równoważne stratom mechanicznym silnika, L_i – praca indykowana w czasie jednego obiegu silnika, L_e – praca użyteczna w czasie jednego obiegu silnika.

Ponieważ wartość Q_m ma wymiar energii, nienajlepiej nadaje się do porównywania strat mechanicznych silników o różnych wielkościach i konstrukcjach. Aby umożliwić to porównywanie przyjmuje się jako bezwymiarową miarę strat mechanicznych, sprawność mechaniczną, wyrażoną następującą formułą:

$$\eta_m = \frac{L_e}{L_i} \tag{2}$$

gdzie: η_m – sprawność mechaniczna silnika, L_i – praca indykowana w czasie jednego obiegu silnika,

L_e – praca użyteczna w czasie jednego obiegu silnika.

Sprawność mechaniczna określa zatem liczbowo względną stratę energii na pokonanie oporów własnych silnika. Wartość sprawności mechanicznej waha się od 0,70 do 0,91 dla silnika pracującego w warunkach obciążenia znamionowego [13]. Pomimo, że sprawność mechaniczna doskonale nadaje się do porównywania strat mechanicznych różnych typów silników, to należy pamiętać, że każde odstępstwo od warunków obciążenia nominalnego silnika powoduje zmianę wartości sprawności mechanicznej. W skrajnym przypadku, gdy silnik pracuje na biegu jałowym[1], zachodzi warunek:

$$L_e = 0 \Rightarrow \eta_m = 0 \tag{3}$$

Z tego powodu do określania strat mechanicznych konkretnego silnika wygodniej jest posługiwać się bezwzględnymi miarami strat. Będzie to np. średnie ciśnienie start mechanicznych p_m, jako różnica średniego ciśnienia indykowanego p_i i średniego ciśnienia użytecznego p_e:

$$p_m = p_i - p_e \tag{4}$$

lub analogicznie moc strat mechanicznych P_m jako różnica mocy indykowanej P_i i mocy użytecznej P_e:

$$P_m = P_i - P_e \tag{5}$$

2. ŹRÓDŁA STRAT MECHANICZNYCH TŁOKOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

Wyróżnić można kilka grup czynników będącymi źródłami strat mechanicznych. W zależności od celu podziału oraz stopnia uszczegółowienia, literatura różnie klasyfikuje źródła występowania strat mechanicznych.
Najczęściej podział strat mechanicznych przedstawia się następująco [12, 13]:

- Straty tarcia (t):
  - w układzie trybologicznym tłok–pierścienie tłokowe–tuleja cylindrowa (TPC),
  - w łożyskach głównych, łożyskach korbowych, łożyskach sworznia tłokowego oraz w łożyskach turbosprężarki (Ł),
- Straty na napęd mechanizmów podwieszonych i rozrząd silnika (Z).
- Straty wentylacji (W) obejmujące oddziaływane otoczenia na ruchome części silnika. Wówczas:

$$p_m = p_{TPC} + p_Ł + p_W + p_Z = p_t + p_W + p_Z \tag{6}$$

gdzie: $p_t = p_{TPC} + p_Ł$ – średnie ciśnienie strat tarcia, p_{TPC} – średnie ciśnienie tracone na pokonanie oporów tarcia w układzie tłok–pierścienie tłokowe–tuleja cylindrowa (TPC) – 50–75%, $p_Ł$ – średnie ciśnienie tracone na pokonanie oporów tarcia łożyskowania silnika – 15–25%, $p_W + p_Z$ – średnie ciśnienie tracone na pokonanie oporów wentylacyjnych oraz na pokonanie oporów tarcia mechanizmów podwieszonych oraz rozrządu silnika – 5–15%.

Procentowy rozkład strat mechanicznych poszczególnych podzespołów silnika zależy przede wszystkim od konstrukcji silnika.

3. TŁOKOWY SILNIK SPALINOWY JAKO UOGÓLNIONY WĘZEŁ TARCIA

Średnie ciśnienie strat mechanicznych silnika jest funkcją wielu zmiennych:

$$p_m = f(n, T, \beta, t_o, t_w, k) \tag{7}$$

gdzie: n — prędkość obrotowa silnika, T – moment obrotowy silnika, β – właściwości fizykochemiczne olejów smarowych, w tym lepkość i smarność, t_o – temperatura oleju smarowego, t_w – temperatura wody chłodzącej, k – parametry struktury konstrukcyjnej układu TPC, łożyskowania oraz mechanizmów zasprzęglonych i rozrządu silnika.

Jednym z decydujących czynników wpływającym na wielkość strat mechanicznych są właściwości fizykochemiczne oleju smarowego, w tym jego lepkość dynamiczna.

Do przedstawienia jej wpływu na wielkość strat mechanicznych silnika tłokowego dość dobrze nadaje się model przedstawiony w pracy [1]. Potraktowano w niej tłokowy silnik spalinowy jako uogólniony węzeł tarcia i zastosowano następujące założenia upraszczające:

- tarcie w układzie tłokowo–cylindrowym poza punktami zwrotnymi tłoka jest tarciem płynnym jak przy smarowaniu hydrodynamicznym, występuje tu zatem analogiczne oddziaływanie jak przy smarowaniu i tarciu w łożyskach hydrodynamicznych;
- dla stałego obciążenia silnika współczynnik tarcia μ a co za tym idzie średnie ciśnienie strat tarcia p_t będzie proporcjonalne do lepkości kinematycznej ν oleju smarowego w punkcie tarcia:

$$p_t = k\nu^m \tag{8}$$

gdzie: k – stała proporcjonalności zależna od obciążenia silnika i jego prędkości obrotowej, m – wykładnik potęgowy uwzględniający zmiany przebiegu lepkości kinematycznej w łożysku obciążonym dynamicznie w stosunku do zmiany lepkości kinematycznej w stacjonarnie obciążonym łożysku.

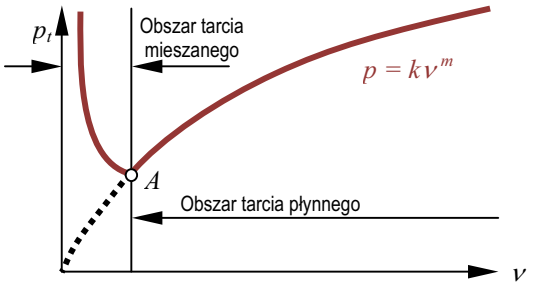
W efekcie pozwoli to na zastosowanie krzywej Stribecka, która w pierwowzorze odzwierciedlała zmiany współczynnika tarcia μ w funkcji parametru

[1] W tym miejscu celowe jest wyjaśnienie użytego w artykule pojęcia biegu jałowego tłokowego silnika spalinowego. Ogólna definicja biegu jałowego maszyny określa działanie maszyny bez wytwarzania pracy użytecznej. Ponieważ tłokowy silnik spalinowy służy do zamiany energii cieplnej pochodzącej ze spalanego paliwa na energię mechaniczną, będącą niczym innym jak pracą użyteczną, to bieg jałowy tłokowego silnika spalinowego jest działaniem silnika bez wytwarzania tejże pracy użytecznej i nie zależy od prędkości obrotowej wału korbowego silnika. Definicja ta stoi w sprzeczności z określeniami biegu jałowego w opracowaniach niektórych autorów utożsamiających bieg jałowy z minimalną prędkością obrotową. W przytoczonej definicji istotne jest tylko to, że silnik nie przekazuje momentu obrotowego.

Herseya λ [6] dla łożysk ślizgowych do przedstawienia strat tarcia całego silnika (rys.1).

Możemy wówczas przedstawić zależność średniego ciśnienia strat tarcia p_t od lepkości kinematycznej oleju smarowego. Na rys. 1 przedstawiono przebieg krzywej Stribecka dla całego silnika w układzie współrzędnych średnie ciśnienie strat tarcia p_t – lepkość kinematyczna ν. Dla pełnego zobrazowania trybologicznego silnika należałoby przedstawić osobną krzywą dla każdej pary trącej tzn. uwzględnić liczbę cylindrów, jak również liczbę oraz rodzaj łożysk. Wyznaczenie jej w przypadku silnika wielocylindrowego jest dość trudne, a w przypadku silników okrętowych wręcz niemożliwe.

Ponieważ jednak układ smarowania jest w przeważającej liczbie silników wspólny dla wszystkich elementów trących, a wartość lepkości granicznej tarcia mieszanego dla układu tłok–pierścienie tłokowe–tuleja cylindrowa jest zazwyczaj mniejsza niż dla łożysk silnika, dlatego w tym przypadku o granicy obszaru tarcia płynnego w sumarycznych stratach tarcia decyduje graniczna lepkość dla łożysk silnika.



Rys. 1 Krzywa Stribecka przedstawiająca średnie ciśnienie strat tarcia jako funkcja lepkości oleju smarowego silnika: p_t – średnie ciśnienie strat tarcia silnika, ν – lepkość kinematyczna oleju smarowego, k – stała proporcjonalności zależna od obciążenia silnika i jego prędkości obrotowej, m – wykładnik potęgowy uwzględniający zmiany przebiegu lepkości kinematycznej w stosunku do stacjonarnie obciążonego łożyska

Należy dodatkowo zaznaczyć, że nie rozpatrujemy tutaj osobno strat spowodowanych oporami wentylacyjnymi oraz strat na pokonanie oporów tarcia mechanizmów podwieszonych i rozrządu silnika. Jednakże suma oporów tarcia w układzie tłok–pierścienie tłokowe–tuleja cylindrowa i oporów tarcia łożyskowania silnika jest dominująca i stanowi aż 85–95% strat mechanicznych silnika.

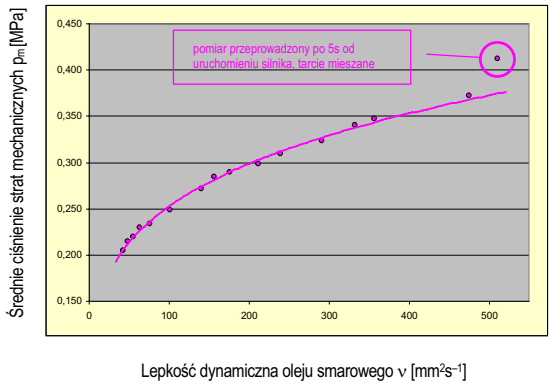
4. METODYKA WYZNACZANIA STRAT MECHANICZNYCH

Od 1992 roku w Instytucie Technicznej Eksploatacji Okrętów – obecnie Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów (IKEO) – Akademii Marynarki Wojennej przeprowadza się cykliczne badania diagnostyczne tłokowych silników spalinowych eksploatowanych na okrętach Marynarki Wojennej RP. Polegają one m.in. na analizie przebiegów ciśnień wewnątrzcylindrowych poszczególnych cylindrów silnika, w tym na wyznaczaniu na ich podstawie średniego ciśnienia indykowanego dla oceny strat mechanicznych silnika, strat mechanicznych linii wałów i strat tarcia śruby napędowej oraz oceny równości obciążeń silników w siłowniach wielowałowych [5, 10].

Od 1997 roku oprócz rutynowego indykowania silników na obciążeniu nominalnym, w celu określenia strat mechanicznych silników, wykorzystywanych do oceny stanu technicznego układu tłok–pierścienie tłokowe–tuleja cylindrowa oraz łożyskowania silnika indykuje się silniki również na biegu jałowym, (oczywiście tam, gdzie jest możliwe rozsprzęglenie silnika). Pomimo, że wartości średniego ciśnienia strat mechanicznych p_m rosną wraz z obciążeniem, to proponowana metoda jej wyznaczenia z pomiarów średniego ciśnienia tarcia na biegu jałowym, minimalizuje błędy wyznaczania p_m [3, 9], przez zastosowanie tylko jednej metody pomiaru. Ponieważ na biegu jałowym średnie ciśnienie użyteczne p_e przyjmuje wartość zero, wówczas równanie (4) przyjmie postać:

$$p_m = p_i \tag{9}$$

W celu weryfikacji modelu (8) przeprowadzono w IKEO szereg badań na dwucylindrowym silniku laboratoryjnym S312C o mocy nominalnej 22,4 kW. Badania polegały na indykowaniu silnika pracującego na biegu jałowym przy różnych prędkościach obrotowych podczas podgrzewania i rejestrowaniu temperatury oleju smarowego w silniku. Po wyznaczeniu lepkości oleju dla poszczególnych temperatur dokonano aproksymacji punktów pomiarowych korzystając z zależności (8). Przykładową zależność dla prędkości 1140 min^{-1} przedstawia rys. 2.



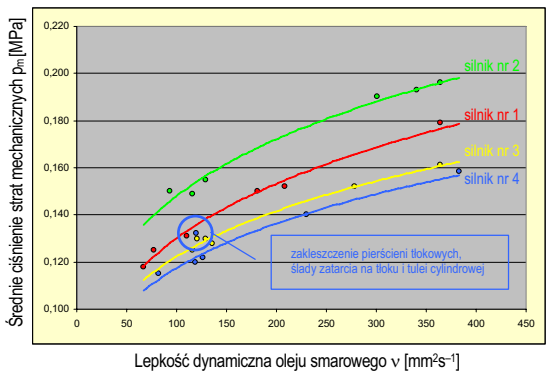
Rys. 2. Średnie ciśnienie strat mechanicznych jako funkcja lepkości oleju smarowego silnika S312C

Od krzywej aproksymującej wyraźnie odstaje pierwszy punkt pomiarowy wyróżniony na rysunku 2 okręgiem. Spowodowane jest to tym, że pomiar

rozpoczęto natychmiast po uruchomieniu silnika i ustaleniu się prędkości obrotowej silnika. Układy trybologiczne silnika znajdowały się jeszcze w obszarze tarcia mieszanego, ponieważ silnik nie posiada pompy wstępnego smarowania, a olej smarowy nie dotarł jeszcze w odpowiedniej ilości do wszystkich węzłów tarcia.

5. BADANIA SILNIKÓW W EKSPLOATACJI

W latach 2001–2007 m.in. sześciokrotnie badano cztery silniki główne na jednym z okrętów Marynarki Wojennej RP. Są to szesnastocylindrowe czterosuwowe silniki SULZER typu 16ASV25/30 o mocy nominalnej 3200 kW każdy. Dla każdego z nich wyznaczano między innymi średnie ciśnienie strat mechanicznych p_m. Wszystkie silniki indykowano na biegu jałowym przy prędkości od 435 do 451 min^{-1}. W czasie pomiarów temperatura oleju smarowego silników była różna i wahała się od 20 do 55^{O}C. Z tego względu wartości średniego ciśnienia strat mechanicznych p_m osiągały bardzo różne wartości i bez dodatkowych uwarunkowań nie może być uznane jako parametr diagnostyczny. Aby przedstawić wartości średniego ciśnienia strat mechanicznych p_m analogicznie jak przypadku silnika laboratoryjnego S312C (rys. 2), przeanalizowano analizy oleju smarowego wszystkich czterech silników oraz wyznaczono na ich podstawie lepkości kinematycznych dla temperatur, przy których indykowano silniki w poszczególnych latach. Ze względu na dość dużą rozbieżność średniego ciśnienia strat mechanicznych poszczególnych silników, dokonano aproksymacji wg zależności (8) dla każdego silnika oddzielnie. Wartości współczynników z tej zależności m są bardzo zbliżone i wahają się w granicach 0,217–0,236, natomiast współczynniki k oscylują w granicach 0,43–0,54. Najwyższą wartość k posiada silnik nr 2. Uzyskane wyniki przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Średnie ciśnienie strat mechanicznych jako funkcja lepkości oleju smarowego silników 16ASV25/30

Od krzywej aproksymującej wyraźnie odstaje jeden z punktów pomiarowych silnika nr 4 wyróżniony na rysunku 3 okręgiem. Spowodowane jest to tym, że w czasie badań diagnostycznych w 2001 roku wykryto poważną usterkę w pracy tego silnika. Na jednym z cylindrów wartość ciśnienia sprężania była niższa o 5,5% od wartości średniej z pozostałych cylindrów silnika. Podejrzewano zakleszczenie pierścieni tego cylindra lub wypalone gniazda zaworowe zaworów dolotowych, gdyż nie zarejestrowano wzrostu temperatury spalin z tego cylindra, charakterystycznego dla przypadku wypalenia gniazd zaworowych zaworów wylotowych. W wyniku weryfikacji stwierdzono całkowite zakleszczenie dwóch górnych tłokowych pierścieni uszczelniających tego cylindra, częściowe zakleszczenie pozostałych pierścieni oraz ślady zatarcia na tłoku i tulei cylindrowej. W tym przypadku granica tarcia mieszanego została na pewno przekroczona, co jednoznacznie obrazuje rys. 3.

6. WNIOSKI

Przedstawione wyniki badań skłaniają do przedstawienia następujących wniosków:

- Średnie ciśnienie indykowane biegu jałowego silnika jest wrażliwym parametrem diagnostycznym silnika. Nie lokalizuje ono jednak jednoznacznie źródeł występowania zawyżonych strat mechanicznych, a jedynie sygnalizuje możliwość ich występowania
- Na przykładzie silnika nr 2 można stwierdzić, że wartość średniego ciśnienia strat mechanicznych zależy, oprócz własności fizykochemicznych oleju smarowego, w dużym stopniu od parametrów struktury silnika i jest również „indywidualną cechą" każdego egzemplarza silnika. Silnik nr 2 cechuje się najwyższą wartością współczynnika k, a tym samym dla każdej lepkości kinematycznej oleju smarowego wartość średniego ciśnienia strat mechanicznych jest najwyższa.
- W celu zwiększenia wiarygodności stawianej diagnozy kluczowym zagadnieniem staje się wyznaczanie lepkości oleju smarowego w czasie badania każdego silnika.

LITERATURA

[1] Drozd W.: *Metodyka wyznaczania minimalnej dopuszczalnej lepkości oleju w silnikach spalinowych.* Praca doktorska, Poznań 1985

[2] Heywood J. B.: *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw–Hill Book Company. Series in Mecanical Engineering, 1988.

[3] Łutowicz M.: *Badanie błędu pomiaru średniego ciśnienia indykowanego silnika okrętowego*, Zeszyty Naukowe AMW 2/2002.

[4] Korczewski Z., Wontka L.: *Stanowisko do badań diagnostycznych układu łożyskowania tłokowego silnika spalinowego.* EXPLO–SHIP Świnoujście–Kopenhaga 2004

[5] Korczewski Z., Wontka L.: *Badania strat mechanicznych tłokowego silnika spalinowego.* Zeszyty Naukowe AMW, Gdynia 2005
[6] Kozłowiecki H.: *Łożyska tłokowych silników spalinowych*, WKiŁ, Warszawa 1982.
[7] Niewiarowski K.: *Tłokowe silniki spalinowe*, WKiŁ, Warszawa 1983
[8] Piotrowski I.: *Okrętowe silniki spalinowe, wydawnictwo Morskie*, Gdańsk 1983
[9] Polanowski S.: *Błędy pomiaru średniego ciśnienia indykowanego metodami cyfrowymi silników okrętowych w warunkach eksploatacji*, Konferencja Naukowo-Techniczna „Explo-Diesel '98", Szczecin 1998.
[10] Polanowski S., Wontka L.: *Niektóre możliwości oceny obciążenia tłokowych silników okrętowych i strat w układzie napędowym drogą pomiaru mocy indykowanej*, Materiały XXI Sympozjum Siłowni Okrętowej SymSO'2000.
[11] Sprawozdanie z pracy naukowo–badawczej pt.: *Badania wpływu czynników eksploatacyjnych na osiągi i sprawności zespołów napędowych okrętów*, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2003.
[12] Wajand J. A.: *Silniki o zapłonie samoczynnym.* Wydawnictwo Naukowo–Techniczne, Warszawa 1988.
[13] Wanszeidt W. A.: *Sudowyje dwigatieli wnutriennogo sgoranija, Sudostrojenije*, Leningrad 1977

mgr inż. **Leszek WONTKA** starszy wykładowca w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów Akademii Marynarki Wojennej

OCENA WYBRANYCH PARAMETRÓW REGULACYJNYCH TŁOKOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM NA PODSTAWIE SYGNAŁU WIBROAKUSTYCZNEGO

Grzegorz BORUTA

Katedra Mechatroniki, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski
ul. Heweliusza 10, 10-724 Olsztyn, g.boruta@uwm.edu.pl

Streszczenie

Przedstawiono wpływ wybranych parametrów regulacyjnych tłokowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym (kąta wyprzedzenia i ciśnienia wtrysku oraz dawki paliwa) na wybrane parametry sygnału wibroakustycznego rejestrowanego na jego kadłubie i głowicy (wybrane składowe zawarte w widmach amplitudowo-częstotliwościowych przyspieszeń drgań prostopadłych do powierzchni mocowania czujników pomiarowych na kadłubie i głowicy).

Słowa kluczowe: diagnostyka wibroakustyczna, tłokowy silnik spalinowy o zapłonie samoczynnym.

THE APPRECIATION OF SELECT REGULATIVE PARAMETERS OF THE DIESEL ENGINE ON THE BASE OF THE VIBROACOUSTIC SIGNAL

Summary

The influence of select regulative parameters of the Diesel engine (injection advance angle, injection pressure and fuel charge) on select parameters of the vibroacoustic signal measured on his crankcase and cylinder head (select spectral components of vibration accelerations perpendicular to measurement sensor clamping surfaces on crankcase and cylinder head) was presented.

Keywords: vibroacoustic diagnosing, diesel engine.

1. WPROWADZENIE

Z analizy stanu badań nad diagnostyką wibroakustyczną tłokowych silników spalinowych wynika, że badania te koncentrowały się na poszukiwaniu związków między różnymi parametrami rejestrowanych sygnałów wibroakustycznych a stanami technicznymi wynikającymi ze zużycia eksploatacyjnego tych silników [2]. Obecnie jednak, uwzględniając postęp inżynierii materiałów eksploatacyjnych i konstrukcyjnych tłokowych silników spalinowych, gdy ich trwałość jest porównywalna, a często nawet większa niż trwałość całych pojazdów, w diagnostyce tłokowych silników spalinowych obserwuje się tendencję do skupiania uwagi na zmianach stanu technicznego wynikających nie ze zużycia eksploatacyjnego, ale z mogących wystąpić rozregulowań i innych usterek wpływających na jakość eksploatacji, w tym na jakość spalania determinującą np. zużycie paliwa, toksyczność spalin czy hałaśliwość. Pod pojęciem parametrów regulacyjnych rozumie się te spośród parametrów struktury, określających dany stan techniczny badanego silnika, których wartości można zmieniać w pewnych zakresach określonych w instrukcji eksploatacji tego silnika podczas wykonywania obsług technicznych. Parametrami regulacyjnymi klasycznego tłokowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym (o ZS) są takie parametry jak: luz zaworowy, kąt wyprzedzenia i ciśnienie wtrysku oraz dawka paliwa, napięcie pasków klinowych, luzy w układzie sterowania pompą wtryskową czy napięcie sprężyn w regulatorze prędkości obrotowej. Parametrami determinującymi jakość spalania paliwa są kąt wyprzedzenia i ciśnienie wtrysku oraz dawka paliwa. Badania niezawodności pojazdów napędzanych przez silniki o ZS pokazują jednocześnie, że właśnie te parametry są jednymi z parametrów struktury najczęściej ulegających niepożądanym zmianom w trakcie eksploatacji pojazdów [6].

Z badań procesów zachodzących podczas pracy silnika o ZS wynika [5], że zwiększenie kąta wyprzedzenia wtrysku (zwiększenie ilości paliwa spalanego kinetycznie) oraz zmniejszenie ciśnienia wtrysku i dawki paliwa do części cylindrów (nierównomierność dawkowania paliwa) powoduje zwiększenie „twardości" jego pracy, przejawiającej się nie tylko zwiększeniem słuchowo odbieranej hałaśliwości tej pracy, ale również zwiększeniem poziomu drgań jego kadłuba i głowicy, szczególnie w zakresach odpowiadających częstotliwościom drgań generowanych przez pracujące elementy układu tłokowo-korbowego silnika. Z analizy źródeł generacji drgań w silniku wynika, że częstotliwości drgań związanych z pracą

elementów układu tłokowo-korbowego są równe trzem pierwszym wielokrotnościom częstości obrotów wału korbowego [1].

Celem prezentowanych badań było określenie związków między wybranymi parametrami sygnału wibroakustycznego rejestrowanego na kadłubie i głowicy tłokowego silnika spalinowego o ZS (wielkością wybranych składowych występujących w wąskopasmowych widmach amplitudowo-częstotliwościowych przyspieszeń drgań) i symulowanymi zmianami wartości wybranych parametrów regulacyjnych tego silnika pod kątem możliwości wykorzystania tych związków do opracowania metody wibroakustycznego diagnozowania badanego silnika w zakresie symulowanych zmian parametrów regulacyjnych.

2. EKSPERYMENT DIAGNOSTYCZNY

Obiektem badań był dotarty, rzędowy, sześciocylindrowy, niedoładowany silnik o ZS typu S359. Silnik ten, o mocy nominalnej 110 kW, jest stosowany między innymi do napędu samochodów ciężarowych STAR serii 200 [3]. Silnik S359 jest zasilany w paliwo przez rzędową, sześciotłoczkową pompę wtryskową typu P76-15u/M z mechanicznym dwuzakresowym regulatorem prędkości obrotowej typu R8E-20 oraz wyposażony we wtryskiwacze typu W1F-01 z rozpylaczem trzyotworowym typu D1LMK148/1.

W trakcie realizacji badań zastosowano eksperyment czynny, podczas którego zmieniano wartości trzech wybranych parametrów regulacyjnych: kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa do wszystkich cylindrów, dawki paliwa do jednego cylindra i zmiany ciśnienia wtrysku paliwa w jednym wtryskiwaczu. Sygnały wibroakustyczne rejestrowano dla silnika rozgrzanego do temperatur eksploatacyjnych.

Zmianę kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa realizowano poprzez odpowiednie obracanie wałka pompy wtryskowej względem wałka sprzęgła pompy wtryskowej [3]. Ustawiano jedną z dwu wartości kąta wyprzedzenia wtrysku: wartość nominalną ($18{,}5^{o}$) lub wartość zmniejszoną (przyjęto 8^{o}).

Zmianę ciśnienia wtrysku paliwa realizowano dla jednego wtryskiwacza, zasilającego wybrany (drugi) cylinder silnika, poprzez zmianę napięcia sprężyny dociskowej iglicy [3]. Ustawiano jedną z dwu wartości ciśnienia wtrysku: wartość nominalną (21,5 MPa) lub zmniejszoną (przyjęto 10 MPa).

Zmianę dawki paliwa realizowano dla wybranej (drugiej) sekcji tłoczącej poprzez całkowite odłączenie wtryskiwacza od sekcji tłoczącej. Ustawiano jedną z dwu wartości dawki: wartość nominalną lub zerową w całym zakresie prędkości obrotowych wału korbowego.

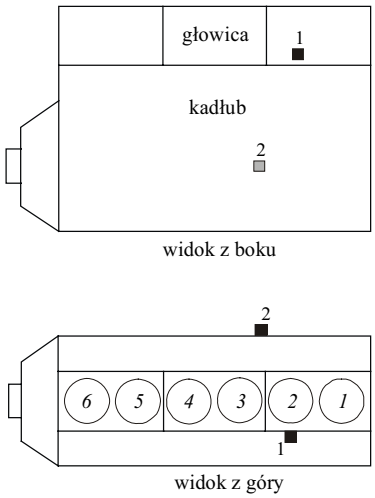
Badania przeprowadzono na stanowisku hamownianym, przy czym silnik był wyposażony w oryginalny osprzęt pracujący w podobny sposób jak w pojeździe. Ponieważ uzyskane wyniki badań miały potencjalnie służyć do budowy nowej metody diagnostycznej silnika, zdecydowano się na prowadzenie badań przy prędkościach obrotowych możliwych do osiągnięcia podczas diagnozowania eksploatacyjnego pojazdów (bez demontażu silnika z pojazdu) w warunkach braku zewnętrznego obciążenia, to jest przy prędkościach biegu jałowego i maksymalnej regulowanej. Ustalenie braku obciążenia wynikło z faktu, że stosowanie stałych i ściśle określonych obciążeń układu napędowego samochodu podczas stacjonarnych, warsztatowych badań diagnostycznych wymaga wyposażenia stacji diagnostycznej w hamownię podwoziową, co jest rzadkością. Przyjęcie wybranych prędkości obrotowych wału korbowego wyniknęło z faktu, że przy stosowanych dwuzakresowych regulatorach prędkości obrotowej nie jest możliwe ustalenie, w warunkach braku zewnętrznego obciążenia silnika, pośrednich prędkości obrotowych. Fabryczne nastawy regulacyjne pomp wtryskowych zapewniają utrzymywanie przez badany silnik wartości prędkości obrotowej biegu jałowego w szerokim zakresie 500÷650 obr/min oraz wartości maksymalnej regulowanej prędkości obrotowej na poziomie ok. 3100 obr/min [3].

Opisane symulacje zmian parametrów regulacyjnych oraz sposobu działania badanego silnika, pozwala przewidzieć niektóre wyniki realizowanego eksperymentu. W warunkach symulowanej zerowej dawki paliwa do drugiego cylindra wtryskiwacz drugiego cylindra nie będzie pracować i bez znaczenia będzie ciśnienie wtrysku paliwa do tego cylindra, a więc sygnały wibroakustyczne zarejestrowane w danym punkcie pomiarowym dla tego samego sposobu mocowania czujnika do powierzchni silnika powinny być do siebie bardzo podobne. Otrzymanie innych wyników może być spowodowane istotnym wpływem zakłóceń, związanych np. z brakiem możliwości utrzymywania stałej ustalonej prędkości obrotowej wału korbowego. Zmiany chwilowych wartości ustalanych prędkości obrotowych wału korbowego, wynikające z pracy kolejnych cylindrów, są absolutnie typowe dla tłokowych silników spalinowych. Z kolei zmiany uśrednionych za kolejne obroty wału korbowego wartości chwilowych prędkości obrotowej wału korbowego mogą wynikać z jakości pracy układu zasilania silnika, szczególnie w paliwo. W efekcie obserwowanych wahań wartości prędkości obrotowej wału korbowego, prążki w widmach amplitudowo-częstotliwościowych rejestrowanych sygnałów wibroakustycznych mogą ulegać zniekształceniom, co z kolei może utrudnić, a nawet uniemożliwić opracowanie wibroakustycznej metody diagnozowania badanego silnika.

Powszechnie stosowanym sposobem ograniczania wpływu zmian prędkości obrotowej wirującego elementu na analizowane parametry sygnałów wibroakustycznych rejestrowanych dla maszyn z takim wirującym elementem (np. kołem napędzającym w przekładni zębatej, rotorem w silniku elektrycznym czy wałem korbowym w tłokowym silniku spalinowym) jest uśrednianie synchroniczne zarejestrowanego sygnału wibroakustycznego [4]. Uśrednianie to polega na analizie sygnału wibroakustycznego uśrednionego dla kolejnych jego fragmentów o długości równej przyjętemu w trakcie uśredniania czasowi trwania jednego obrotu wirującego elementu (tu wału korbowego). Aby można było wykonać uśrednianie synchroniczne, potrzebne jest pewne urządzenie, które w dodatkowym torze pomiarowym (do torów pomiaru sygnałów wibroakustycznych) wysyłałoby informację (sygnał strobujący) do układu analitycznego (procesora systemu diagnostycznego), potrzebną do odpowiedniego podzielenia rejestrowanego sygnału wibroakustycznego na fragmenty odpowiadające pojedynczym obrotom wału korbowego. Pewną wadą tej metody jest występowanie w otrzymywanych widmach niezerowych składowych tylko dla częstotliwości będących całkowitymi wielokrotnościami przyjętej częstości obrotów wirującego elementu.

Z analizy konstrukcji badanego silnika pod kątem wytypowania urządzenia mogącego służyć jako źródło sygnału strobującego możliwego do wykorzystania w jego diagnozowaniu eksploatacyjnym i bez konieczności dokonywania w nim większych zmian konstrukcyjnych wynika, że najbardziej dostępnymi elementami mogącymi służyć do tego celu są oba końce wału korbowego (to jest koło zamachowe z wieńcem zębatym lub tłumik drgań skrętnych wału korbowego z kołem pasowym napędu pompy wody i alternatora) oraz przewody wtryskowe. W trakcie realizacji pracy wykorzystano jeden z końców wału korbowego – na wyjściu z silnika zamocowano tarczę z nacięciem, którego przejście przed czujnikiem fotoelektrycznym wyzwalało sygnał strobujący co jeden obrót wału korbowego. Co prawda chwilowa prędkość obrotowa wału korbowego zmienia się w trakcie jednego obrotu wału korbowego trzykrotnie w związku z przyspieszaniem wału korbowego przez kolejno pracujące w tym czasie trzy cylindry, liczono jednak na zminimalizowanie wpływu zmian ustalonej (uśrednionej za obrót) prędkości obrotowej wału korbowego, spowodowanych pracą regulatora prędkości obrotowej i pompy wtryskowej, na wyniki analizy sygnałów wibroakustycznych.

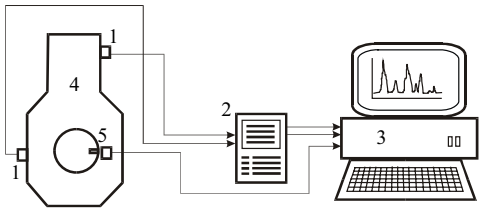
Czujniki pomiarowe mogą być przytwierdzane do powierzchni kadłuba lub głowicy w różny sposób, jednak w przypadku mocowania czujników do pracującego silnika spalinowego jedynymi możliwymi sposobami są przykręcenie za pomocą śruby (po wcześniejszym wykonaniu odpowiedniego gwintowanego otworu) lub przyczepienie za pomocą magnesu trwałego (ale tylko do kadłuba żeliwnego (ferromagnetycznego). Obie te metody wymagają płaskiej powierzchni o średnicy ok. 2÷3 cm. Takie powierzchnie, technologicznie wykonywane w badanym silniku, znajdują się na wysokości łożysk głównych wału korbowego oraz na ścianach głowicy. W związku z tym, jako miejsca rejestracji sygnałów wibroakustycznych wybrano nadlew technologiczny w osi wału korbowego po prawej stronie silnika oraz płaską powierzchnię głowicy w osi drugiego cylindra tuż przy połączeniu głowicy z kadłubem po lewej stronie silnika. Miejsca mocowania czujników schematycznie pokazano na rys. 1. W trakcie realizacji eksperymentu zdecydowano się na zastosowanie połączeń gwintowanych wykonanych w obrębie tych wybranych płaskich powierzchni, gdyż w fazie przygotowawczej do badań stwierdzono, że siła, z jaką magnes wiąże czujnik drgań z powierzchnią pracującego silnika, zwłaszcza z prędkością obrotową maksymalną regulowaną, jest niewystarczająca dla zapewnienia mocowania, które nie powoduje występowania zakłóceń związanych z chwilowym odrywaniem się magnesu od silnika.



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na silniku:
1 – punkt mocowania czujnika na głowicy silnika,
2 – punkt mocowania czujnika na kadłubie silnika,
(1) ÷ (6) – cylindry silnika

Rejestracji sygnałów wibroakustycznych – przebiegów czasowych przyspieszeń drgań prostopadłych do powierzchni montażu czujników, dokonywano za pomocą piezoelektrycznych ładunkowych czujników drgań typu B&K 4384 (użyteczny zakres pomiarowy 0÷6 kHz oraz poprawna praca w zakresie od –70 do +250^{o}C). Otrzymane sygnały ładunkowe były przetwarzane

na sygnały napięciowe i wzmacniane we wzmacniaczu ładunku typu B&K NEXUS. Rejestracji sygnału strobującego dokonywano za pomocą czujnika fotoelektrycznego produkcji Zakładu Elektroniki Pomiarowej Wielkości Nieelektrycznych. Za pomocą czterokanałowego układu analityczno-pomiarowego typu Roadrunner firmy Skalar Instruments przez 30 s cyfrowo rejestrowano jednocześnie oba sygnały wibroakustyczne i sygnał strobujący, próbkując je z częstotliwością 10 kHz w zakresie 0÷2000 Hz. Następnie korzystając z algorytmów uśredniania synchronicznego i FFT wykonywano dyskretne widma amplitudowo-częstotliwościowe zarejestrowanych sygnałów wibroakustycznych zarówno nieuśrednionych jak i uśrednionych synchronicznie. Konfigurację układu pomiarowego przedstawiono schematycznie na rys. 2.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego sygnałów wibroakustycznych
1 – czujniki przyspieszeń drgań B&K 4384,
2 – wzmacniacz ładunku B&K NEXUS,
3 – układ pomiarowo-analityczny Skalar Instruments „Roadrunner", 4 – silnik,
5 – czujnik prędkości obrotowej wału korbowego silnika

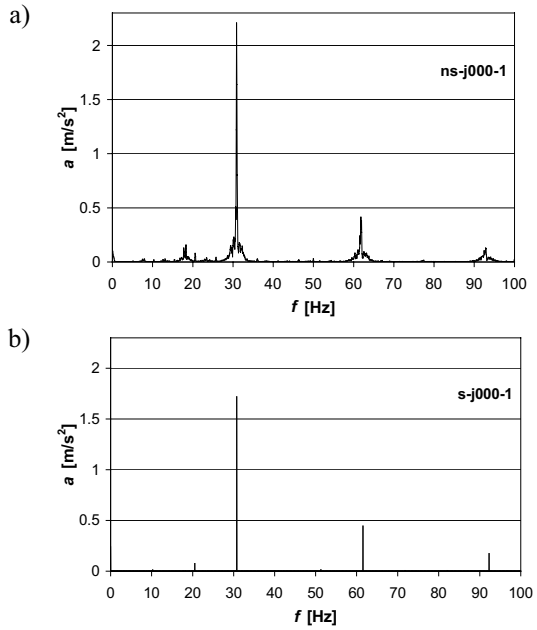
W celu jednoznacznej identyfikacji, plikom zawierającym wyniki pomiarów i obliczeń nadano nazwy o postaci A-BXYZ-C, gdzie:

A = ns – dla sygnałów nieuśrednionych synchronicznie,
s – dla sygnałów uśrednionych synchronicznie,
B = j – dla badań silnika przy prędkości obrotowej biegu jałowego,
m – dla badań silnika przy prędkości obrotowej maksymalnej regulowanej,
X = 0 – dla badań silnika z nominalną wartością kąta wyprzedzenia wtrysku,
1 – dla badań silnika ze zmniejszoną wartością kąta wyprzedzenia wtrysku,
Y = 0 – dla badań silnika z nominalną wartością ciśnienia wtrysku,
1 – dla badań silnika ze zmniejszoną wartością ciśnienia wtrysku dla jednego (drugiego) wtryskiwacza,
Z = 0 – dla badań silnika z nominalną wartością dawki paliwa,
1 – dla badań silnika ze zmniejszoną do zera wartością dawki paliwa w jednej (drugiej) sekcji tłoczącej,
C – jest numerem punktu pomiarowego.

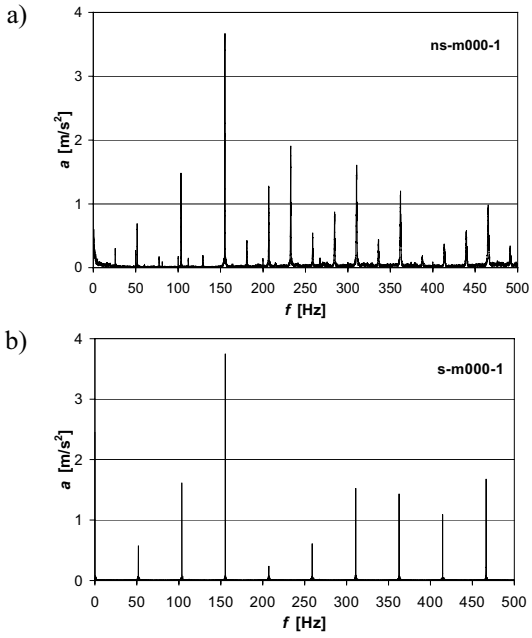
3. WYNIKI BADAŃ

Na rys 3 i 4 przedstawiono fragmenty przykładowych widm amplitudowo-częstotliwościowych sygnałów wibroakustycznych o długości ok. 10-krotnie dłuższej niż wartość częstości obrotów wału korbowego f_w. Na rys. 3a przedstawiono przykładowe widmo sygnału nieuśrednionego synchronicznie, a na rys. 3b sygnału uśrednionego synchronicznie zarejestrowanego na silniku pracującym z prędkością obrotową biegu jałowego. Na rys. 4a i 4b przedstawiono przykładowe widma odpowiednio dla prędkości obrotowej maksymalnej regulowanej.

W widmach amplitudowo-częstotliwościowych sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych synchronicznie zarejestrowanych na silniku pracującym z prędkością obrotową biegu jałowego najwyższe składowe widmowe, mające postać wyraźnie zarysowanych, ostrych prążków, występują dla częstotliwości odpowiadających trzy- i sześciokrotnej częstości obrotów wału korbowego f_w. Z analizy źródeł generacji sygnałów wibroakustycznych w silniku [1] wynika, że z częstotliwością $3f_w$ generowane są drgania w wyniku przekładania wszystkich tłoków w zwrocie zewnętrznym, pracy zaworów i spalania we wszystkich cylindrach. Częstotliwość $6f_w$ to wielokrotność częstotliwości $3f_w$, ale także



Rys. 3. Widmo do 100 Hz sygnału wibroakustycznego zarejestrowanego w punkcie pomiarowym nr 1 dla silnika pracującego z prędkością obrotową biegu jałowego ($f_w \approx 10$ Hz) i nominalnych wartości wszystkich zmienianych parametrów regulacyjnych:
a) nieuśrednionego synchronicznie
b) uśrednionego synchronicznie



Rys. 4. Widmo do 500 Hz sygnału wibroakustycznego zarejestrowanego w punkcie pomiarowym nr 1 dla silnika pracującego z prędkością obrotową maksymalną regulowaną ($f_w \approx 50$ Hz) i nominalnych wartości wszystkich zmienianych parametrów regulacyjnych: a) nieuśrednionego synchronicznie b) uśrednionego synchronicznie

częstotliwość wymuszeń związanych z przekładaniem wszystkich tłoków (zarówno w zwrocie zewnętrznym, jak i wewnętrznym). Oprócz nich zauważalny jest jeszcze cały szereg składowych, powtarzających się co $0{,}25\,f_w$. Wyraźnie wyższe są składowe rzędu $0{,}75\,f_w$, $1\,f_w$ (tylko dla punktu pomiarowego na kadłubie), w pobliżu 18 Hz (rzędu $1{,}5\,f_w$, $1{,}75\,f_w$ lub $2\,f_w$ zależnie od wartości ustalonej częstości obrotów f_w) oraz $9\,f_w$ i $12\,f_w$. Z analizy źródeł generacji sygnałów wibroakustycznych w silniku [1] wynika, że z częstotliwością $1\,f_w$ generowane są drgania w wyniku przekładania tłoka w jednym cylindrze i niewyważenia wału korbowego w ruchu obrotowym, a z częstotliwością $2\,f_w$ w wyniku niewyważenia tłoka w ruchu posuwisto-zwrotnym i uderzeń czopów wału korbowego w łożyskach ślizgowych.

W widmach amplitudowo-częstotliwościowych sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie zarejestrowanych na silniku pracującym z prędkością obrotową biegu jałowego, podobnie jak w widmach sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych synchronicznie, najwyższe prążki występują dla częstotliwości 3 i $6\,f_w$. Wyraźnie są też prążki rzędu $2\,f_w$, $9\,f_w$, $12\,f_w$ i $15\,f_w$ oraz $1\,f_w$ dla punktu pomiarowego na kadłubie. Dla wyższych częstotliwości interesujący jest prążek rzędu $124\,f_w$. Prążek ten, ale tylko dla stanów technicznych z niezmienionymi ciśnieniem wtrysku i dawką paliwa do drugiego cylindra, jest wyraźnie wyższy niż wszystkie pozostałe, niewielkie prążki występujące w widmach dla wyższych częstotliwości i osiąga wielkość prążka rzędu $6\,f_w$ w widmach sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych na głowicy oraz dwukrotną wielkość prążka rzędu $6\,f_w$ (a więc połowę wielkości najwyższego prążka rzędu $3\,f_w$) w widmach sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych na kadłubie silnika.

Widma amplitudowo-częstotliwościowe sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych synchronicznie zarejestrowanych na silniku pracującym z prędkością obrotową maksymalną regulowaną składają się z całego szeregu składowych powtarzających się co $f_w/6$, przy czym wyraźnie wyższe, tworzące wyraźne prążki, powtarzają się co $0{,}5\,f_w$ (z częstotliwością $0{,}5\,f_w$ generowane są drgania związane z pracą pojedynczego cylindra [1]). Widoczne są wyraźne różnice między widmami sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych na głowicy i na kadłubie silnika, szczególnie w paśmie do 200 Hz (do składowej odpowiadającego czterokrotnej częstości obrotów wału korbowego). Dla sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych w punkcie pomiarowym na głowicy, najwyższa w widmach jest składowa dla częstotliwości $3\,f_w$ (podobnie jak dla prędkości obrotowej biegu jałowego). Wyraźne są też składowe dla częstotliwości 1 i $2\,f_w$. Dla sygnałów wibroakustycznych rejestrowanych w punkcie pomiarowym na kadłubie najwyższa w widmach jest składowa dla częstotliwości $2\,f_w$ a składowe dla częstotliwości 1 i $3\,f_w$ prawie jej dorównują. Od częstotliwości około 200 Hz w widmach sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych synchronicznie występuje cały szereg niezerowych składowych powtarzających się co $0{,}5\,f_w$.

Dla sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie, zarejestrowanych na silniku pracującym z prędkością obrotową maksymalną regulowaną, podobnie jak sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych synchronicznie, widać wyraźne różnice między widmami tych sygnałów zarejestrowanych w punkcie pomiarowym na głowicy i na kadłubie silnika – dla sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych na głowicy najwyższy jest prążek rzędu $3\,f_w$ i wyraźne są też prążki rzędu $1\,f_w$ i $2\,f_w$, zaś dla sygnałów wibroakustycznych rejestrowanych na kadłubie najwyższy jest prążek rzędu $2\,f_w$ i wyraźne są też prążki rzędu $1\,f_w$ i $3\,f_w$. Od częstotliwości 200 Hz w widmach sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie występują co f_w wyraźne prążki o zróżnicowanej wielkości, której zmiany trudno powiązać z symulowanymi zmianami parametrów regulacyjnych. Dla prędkości obrotowej maksymalnej regulowanej częstotliwość prążka rzędu $124\,f_w$ wynosi około

6430 Hz i ponad trzykrotnie przekracza górną granicę analizowanego przedziału częstotliwości.

Częstotliwość występowania składowych widmowych, związanych z maksymalną regulowaną prędkością obrotową wału korbowego, wynosi około 51,8 Hz. Jest więc bardzo bliska wartości 50 Hz, czyli częstotliwości ewentualnego sygnału zakłócającego pochodzącego od zmian napięcia zasilającego aparaturę pomiarowo-analityczną w energię elektryczną. W widmie sygnału wibroakustycznego nieuśrednionego synchronicznie, przedstawionym na rys. 4a widać wyraźnie, że zakłócenia te rzeczywiście występują w rejestrowanym sygnale wibroakustycznym, co przejawia się obecnością prążków dla częstotliwości 50 i 100 Hz. Są one jednak zawsze wyraźnie oddzielone i mniejsze od prążków rzędu $1\,f_w$ i $2\,f_w$. W pobliżu prążka rzędu $3\,f_w$, czyli dla częstotliwości 150 Hz żadnego prążka w widmie nie ma. W widmie sygnału wibroakustycznego uśrednionego synchronicznie, przedstawionym na rys. 4b, brak prążków dla częstotliwości 50 i 100 Hz.

W tabelach 1 i 2 przedstawiono względne zmiany wielkości składowej rzędu $3\,f_w$ w widmach sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych i uśrednionych synchronicznie, zarejestrowanych na silniku pracującym z prędkością obrotową odpowiednio biegu jałowego i maksymalną regulowaną, odpowiadające kolejno: zmniejszeniu kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, zmniejszeniu ciśnienia wtrysku paliwa do drugiego cylindra i zmniejszeniu dawki paliwa do drugiego cylindra. Wartości te są różnicami między wielkościami analizowanej składowej widmowej dla stanów po i przed zmianą danego parametru regulacyjnego, odniesionymi do wielkości analizowanej składowej dla stanów sprzed zmiany danego parametru regulacyjnego. Np. wartość względna dla zmiany stanu X00 została wyznaczona z zależności $\frac{a_{100}-a_{000}}{a_{000}}*100\%$, a dla zmiany stanu 01Z z zależności $\frac{a_{011}-a_{010}}{a_{010}}*100\%$. Dla prędkości obrotowej maksymalnej regulowanej wyznaczono również względne zmiany wielkości składowych widmowych rzędu $1\,f_w$ i $2\,f_w$.

3.1. Prędkość obrotowa biegu jałowego

Wyznaczone zmiany wielkości analizowanej składowej widmowej sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych synchronicznie, odpowiadające różnym zmianom parametrów regulacyjnych, są bardzo zróżnicowane i trudno określić jakiekolwiek zależności między zmianami wielkości analizowanej składowej widmowej a symulowanymi zmianami parametrów regulacyjnych. Zaobserwowano także różnice między wyznaczonymi zmianami wielkości analizowanej składowej widmowej przy zmianie ciśnienia wtrysku paliwa do drugiego cylindra w warunkach zmienionej (zerowej) dawki paliwa do tego cylindra. Stwierdzono również około dwudziestoprocentowe zmiany wielkości analizowanej składowej dla stanów 000 i 000k – stanów z takimi samymi symulowanymi wartościami zmienianych parametrów regulacyjnych. Wyjaśnieniem obserwowanych zmian mogą być różne ustalane wartości prędkości obrotowej wału korbowego i zmiany chwilowej wartości tej prędkości, których wpływ na widma nie jest eliminowany przez uśrednianie synchroniczne sygnałów wibroakustycznych.

Tabela 1. Procentowe zmiany wielkości składowej rzędu $3\,f_w$ w widmach sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych na silniku pracującym z prędkością obrotową biegu jałowego

Zmiana stanu	dla sygnałów nieuśrednionych synchronicznie		dla sygnałów uśrednionych synchronicznie	
	Punkt pomiarowy			
	nr 1	nr 2	nr 1	nr 2
X00	-20	-9	-2	-3
X01	-8	+4	-3	-3
X10	+11	+11	-3	-3
X11	-8	+1	-2	-3
0Y0	-27	-25	+2	+3
0Y1	-1	0	-1	0
1Y0	+1	-8	+2	+2
1Y1	-1	-2	0	+1
00Z	-19	-6	+3	+2
01Z	+10	+26	-1	0
10Z	-7	+7	+2	+1
11Z	-8	+14	0	-1
000 → 000k	-13	+13	-1	+1

Z przeprowadzonej analizy wynika, że ze względu na duże wahania prędkości obrotowej wału korbowego, nie można jednoznacznie stwierdzić, czy zmiany wartości wybranych parametrów regulacyjnych wpływają na wielkość wybranej składowej widmowej sygnałów wibroakustycznych rejestrowanych na jego kadłubie i głowicy i nieuśrednionych synchronicznie. Nie można więc opracować odpowiedniej metody wibroakustycznego diagnozowania silnika.

Wyznaczone zmiany wielkości analizowanej składowej widmowej sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie z okresem wyznaczonym przez kolejne obroty wału korbowego, odpowiadające różnym zmianom parametrów regulacyjnych, pozwoliły na określenie

jednoznacznych zależności między zmianami wielkości analizowanej składowej widmowej a symulowanymi zmianami parametrów regulacyjnych.

Tabela 2. Procentowe zmiany wielkości składowej rzędu 3 f_w w widmach sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych na silniku pracującym z prędkością obrotową maksymalną regulowaną

Zmiana stanu	dla sygnałów nieuśrednionych synchronicznie		dla sygnałów uśrednionych synchronicznie	
	Punkt pomiarowy			
	nr 1	nr 2	nr 1	nr 2
X00	-13	+4	-9	-6
X01	-8	+3	-9	-7
X10	-4	-3	-10	-7
X11	-3	0	-11	-5
0Y0	+16	+19	+21	+26
0Y1	-2	0	0	0
1Y0	+28	+21	+20	+25
1Y1	+4	-2	-1	+1
00Z	+16	+20	+20	+25
01Z	-2	+1	-1	-1
10Z	+22	+29	+20	+24
11Z	-1	+4	-2	+1
000 → 000k	-5	-4	-1	+1

Zmniejszenie kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa do silnika spowodowało niewielkie (o 2-3%) ale powtarzalne zmniejszenie wielkości składowej widmowej rzędu 3 f_w, niezależnie od wartości ciśnienia wtrysku i dawki paliwa do drugiego cylindra.

Zmniejszenie ciśnienia wtrysku paliwa do drugiego cylindra spowodowało bardzo niewielkie (o 2-3%) zwiększenie wielkości składowej widmowej rzędu 3 f_w, ale tylko przy nominalnej dawce paliwa do tego cylindra. Przy zerowej dawce paliwa (gdy wtryskiwacz drugiego cylindra nie pracował i nieistotne było ustalone dla niego ciśnienie wtrysku) zgodnie z oczekiwaniem nie zaobserwowano istotnych zmian wielkości analizowanej składowej.

Odłączenie wtryskiwacza drugiego cylindra od pompy wtryskowej (zmniejszenie dawki paliwa do zera) spowodowało również bardzo niewielkie (o 1-3%) zwiększenie wielkości składowej widmowej rzędu 3 f_w, ale tylko przy nominalnym ciśnieniu wtrysku paliwa do drugiego cylindra. Przy zmniejszonym ciśnieniu wtrysku paliwa do drugiego cylindra odłączenie wtryskiwacza drugiego cylindra od pompy wtryskowej nie wywołało istotnych zmian wielkości analizowanej składowej.

Jednoczesne zmniejszenie ciśnienia wtrysku i dawki paliwa do drugiego cylindra spowodowało taki sam, niewielki (o 1-2%) wzrost wielkości składowej widmowej rzędu 3 f_w.

Zauważono także, że obserwowane niewielkie zmiany wielkości składowej rzędu 3 f_w w analizowanych widmach sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie są bardzo podobne dla obu punktów pomiarowych.

Obserwowane zmiany składowej rzędu 124 f_w w widmach sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie są o wiele bardziej wyraźne. Zarówno zmiana ciśnienia wtrysku paliwa do drugiego cylindra jak i odłączenie wtryskiwacza drugiego cylindra od pompy wtryskowej, niezależnie od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa do silnika, spowodowały praktycznie zaniknięcie tej składowej widmowej na tle sąsiednich niezerowych składowych:

- w widmach amplitudowo-częstotliwościowych przyspieszeń drgań zarejestrowanych dla stanów z nominalnymi wartościami ciśnienia wtrysku i dawki paliwa składowa widmowa rzędu 124 f_w jest wyraźnie (około dwukrotnie dla sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych na głowicy i około trzykrotnie dla sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych na kadłubie silnika) wyższa od wszystkich pozostałych składowych rzędu większego niż 6 f_w,
- w widmach amplitudowo-częstotliwościowych przyspieszeń drgań zarejestrowanych dla stanów z symulowanymi zmniejszonymi wartościami ciśnienia wtrysku lub dawki paliwa składowa widmowa rzędu 124 f_w nie jest odróżnialna od innych składowych rzędu większego niż 6 f_w, przy czym nie można jednoznacznie stwierdzić, które z tych rozregulowań spowodowało zaniknięcie analizowanej składowej.

W widmach sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy wielkościami składowych analizowanych rzędów dla stanów z takimi samymi symulowanymi wartościami zmienianych parametrów regulacyjnych (stanów 000 i 000k).

Z przeprowadzonej analizy wynika, że dla silnika pracującego z prędkością obrotową biegu jałowego wpływ symulowanych zmian parametrów regulacyjnych na wielkość analizowanych składowych widmowych sygnałów wibroakustycznych rejestrowanych na jego kadłubie i głowicy i uśrednionych synchronicznie jest jakościowo wyraźny. Obserwowane zmiany wielkości składowych widmowych tych sygnałów, zawierających się w paśmie do kilkukrotnej wielokrotności częstości obrotów wału korbowego f_w (np. składowej rzędu 3 f_w) są jednak na tyle małe, że trudno oprzeć na nich wiarygodną i pewną metodę wibroakustycznego diagnozowania

badanego silnika. Obserwowane zmiany wielkości składowej widmowej rzędu 124 f_w są jednak na tyle duże, że można na nich taką metodę oprzeć. Metoda ta pozwalała by jednak tylko na wykrycie zmniejszenia się ciśnienia wtrysku lub dawki paliwa do któregoś z cylindrów bez możliwości wzajemnego rozróżnienia tych rozregulowań i wskazania cylindra, dla którego te rozregulowania wystąpiły.

3.2. Prędkość obrotowa maksymalna regulowana

Wyznaczone zmiany wielkości analizowanych składowych widmowych sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych synchronicznie, odpowiadające różnym zmianom parametrów regulacyjnych, są zróżnicowane, jednak w znacznie mniejszym stopniu niż dla prędkości obrotowej biegu jałowego. Można też, podobnie jak dla sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie zarejestrowanych dla prędkości obrotowej biegu jałowego, określić pewne zależności miedzy zmianami wielkości analizowanych składowych a symulowanymi zmianami parametrów regulacyjnych.

Zmniejszenie kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa do silnika spowodowało zmniejszenie wielkości składowych widmowych wszystkich trzech analizowanych rzędów dla obu punktów pomiarowych. Obserwowany stopień zmniejszania się wielkości analizowanych składowych różni się dla różnych składowych i punktów pomiarowych – waha się od wartości zbliżonych do 0% aż do –50% (spadek dwukrotny).

Zmniejszenie ciśnienia wtrysku paliwa do drugiego cylindra spowodowało wyraźne, choć zróżnicowane (od kilkunastu do około 40%) zwiększenie wielkości analizowanych składowych widmowych, ale tylko przy nominalnej dawce paliwa do tego cylindra. Przy zerowej dawce paliwa zgodnie z oczekiwaniem nie zaobserwowano istotnych zmian wielkości analizowanych składowych widmowych.

Odłączenie wtryskiwacza drugiego cylindra od pompy wtryskowej (zmniejszenie dawki paliwa do zera) spowodowało również bardzo wyraźne i zróżnicowane (od około 20 do około 40%) zwiększenie wielkości analizowanych składowych widmowych, ale tylko przy jednoczesnym nominalnym ciśnieniu wtrysku. Przy zmniejszonym ciśnieniu wtrysku paliwa do drugiego cylindra odłączenie wtryskiwacza drugiego cylindra od pompy wtryskowej nie wywołało istotnych zmian wielkości analizowanych składowych widmowych.

Otrzymano więc, dla widm sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych synchronicznie zarejestrowanych dla prędkości obrotowej maksymalnej regulowanej, jakościowo podobne a ilościowo o wiele większe zmiany niż dla widm sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie, zarejestrowanych dla prędkości obrotowej biegu jałowego. Zależności te są widoczne dla obu punktów pomiarowych.

Pomimo określenia jakościowych zależności między zmianami wielkości analizowanych składowych widmowych sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych synchronicznie a symulowanymi zmianami wartości parametrów regulacyjnych silnika, bardzo trudno jest opracować odpowiednią metodę wibroakustycznego diagnozowania tego silnika. Po pierwsze, wszystkie uzyskane zmiany wielkości analizowanych składowych widmowych są bardzo zróżnicowane i nie jest możliwe jednoznaczne przypisanie danej zmiany wielkości tych składowych do konkretnej zmiany konkretnego parametru regulacyjnego i wykluczenie dwóch pozostałych, z wyjątkiem ogólnej reguły, że zmniejszenie kąta wyprzedzenia wtrysku powoduje bardziej „miękką", a zmniejszenie ciśnienia wtrysku lub dawki paliwa do jednego cylindra (nierównomierność dawkowania) bardziej „twardą" pracę silnika. Po drugie, podobnie jak dla prędkości obrotowej biegu jałowego, także i teraz, dla stanów 000 i 000k (stanów z takimi samymi wartościami zmienianych parametrów regulacyjnych) stwierdzono zmiany wielkości analizowanych składowych widmowych wahające się od 10 do 50%, czyli takie jak opisane zmiany dla kolejnych symulowanych wartości parametrów regulacyjnych.

Wyznaczone zmiany wielkości analizowanych składowych widmowych sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie z okresem wyznaczonym przez kolejne obroty wału korbowego, odpowiadające różnym zmianom parametrów regulacyjnych, pozwoliły na określenie podobnych zależności między zmianami wielkości analizowanych składowych widmowych a symulowanymi zmianami parametrów regulacyjnych jak dla sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie zarejestrowanych dla prędkości obrotowej biegu jałowego (są tylko od nich o wiele wyraźniejsze) i dla sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych synchronicznie zarejestrowanych dla prędkości obrotowej maksymalnej regulowanej (są tylko od nich o wiele bardziej regularne).

Zmniejszenie kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa do silnika spowodowało zmniejszenie wielkości składowych widmowych wszystkich trzech analizowanych rzędów o 9-16% dla punktu pomiarowego nr 1 i o 4-9% dla punktu pomiarowego nr 2, niezależnie od wartości ciśnienia wtrysku i dawki paliwa do drugiego cylindra.

Zmniejszenie ciśnienia wtrysku paliwa do drugiego cylindra silnika spowodowało zwiększenie wielkości składowych widmowych wszystkich trzech analizowanych rzędów o 20-25% dla punktu pomiarowego nr 1 i o 13-26% dla punktu pomiarowego nr 2, ale tylko przy nominalnej dawce paliwa do tego cylindra. Przy

zerowej dawce paliwa, zgodnie z oczekiwaniem, nie zaobserwowano istotnych zmian wielkości analizowanych składowych widmowych.

Zmniejszenie dawki paliwa do drugiego cylindra (do zera przez odłączenie wtryskiwacza drugiego cylindra od pompy wtryskowej) silnika spowodowało zwiększenie wielkości składowych widmowych wszystkich trzech analizowanych rzędów o 20-24% dla punktu pomiarowego nr 1 i o 12-25% dla punktu pomiarowego nr 2, ale tylko przy nominalnym ciśnieniu wtrysku paliwa do tego cylindra. Przy zmniejszonym ciśnieniu wtrysku paliwa do drugiego cylindra odłączenie wtryskiwacza drugiego cylindra od pompy wtryskowej nie wywołało istotnych zmian wielkości analizowanych składowych widmowych.

Jednoczesne zmniejszenie ciśnienia wtrysku i dawki paliwa do drugiego cylindra spowodowało wzrost wielkości składowych widmowych wszystkich trzech analizowanych rzędów o 18-23% dla punktu pomiarowego nr 1 i o 13-26% dla punktu pomiarowego nr 2, czyli podobny do wywołanego zmianami tych parametrów oddzielnie przy nominalnych wartościach parametru niezmienianego.

W widmach sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie zarejestrowanych dla prędkości obrotowej maksymalnej regulowanej nie stwierdzono też istotnych różnic pomiędzy wielkościami składowych widmowych wszystkich trzech analizowanych rzędów dla stanów z takimi samymi symulowanymi, wzorcowymi wartościami zmienianych parametrów regulacyjnych (stanów 000 i 000k).

Z przedstawionej analizy wynika, że dla silnika pracującego z prędkością obrotową maksymalną regulowaną, zmiany wartości wybranych parametrów regulacyjnych wpływają na wielkość wybranych składowych widmowych sygnałów wibroakustycznych rejestrowanych na jego kadłubie i głowicy, zarówno nieuśrednionych jak i uśrednionych synchronicznie. Jednak ze względu na duże nieregularności obserwowanych zmian określonych na podstawie wielkości wybranych składowych widmowych sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych synchronicznie, metodę wibroakustycznego diagnozowania badanego silnika można oprzeć tylko na zmianach sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie. Metoda ta pozwalała by na jakościowe odróżnienie od siebie stanów:

- z nominalnymi wartościami rozważanych parametrów regulacyjnych,
- ze zmniejszonym kątem wyprzedzenia wtrysku paliwa do cylindrów,
- ze zmniejszonymi ciśnieniem wtrysku lub dawką paliwa do któregoś z cylindrów, jednak bez możliwości wzajemnego rozróżnienia tych dwóch ostatnich parametrów regulacyjnych i wskazania cylindra, dla którego wykryta zmiana nastąpiła.

4. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że analiza zmian wielkości wybranych składowych widm amplitudowo-częstotliwościowych sygnałów wibroakustycznych:

– nieuśrednionych synchronicznie nie dostarczyła informacji diagnostycznej,
– uśrednionych synchronicznie, z okresem określonym przez czasy trwania kolejnych obrotów wału korbowego, dostarczyła informacji diagnostycznej,

niezbędnej do opracowania metody wibroakustycznego diagnozowania badanego tłokowego silnika spalinowego o ZS w zakresie symulowanych zmian parametrów regulacyjnych.

Zastosowanie tej metody będzie możliwe w efekcie wykorzystania odpowiedniego układu pomiarowo-analitycznego do jednoczesnej rejestracji przyspieszeń drgań i do wyznaczania czasów trwania kolejnych obrotów wału korbowego, potrzebnych do uśrednienia synchronicznego zarejestrowanych przyspieszeń drgań, oraz dzięki odpowiedniemu przystosowaniu silnika do badań (polegającemu na wykonaniu w nim gwintowanych otworów do mocowania czujników drgań i wykonaniu odpowiednich mocowań dla układu do pomiaru czasów trwania kolejnych obrotów wału korbowego). Stosując opracowaną metodę wibroakustycznego diagnozowania silnika, uzyska się informację, że:

– parametry regulacyjne silnika są nominalne,
– zmniejszył się (rozregulował) kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa do cylindrów silnika w przypadku stwierdzenia w trakcie kolejnych badań diagnostycznych wyraźnego, przynajmniej kilkuprocentowego zmniejszenia się pierwszych trzech składowych widmowych, występujących w widmach amplitudowo-częstotliwościowych uśrednionych synchronicznie przyspieszeń drgań zarejestrowanych dla prędkości obrotowej maksymalnej regulowanej, w stosunku do ich wielkości odpowiadającej nominalnemu kątowi wyprzedzenia wtrysku,
– zmniejszyły się (rozregulowały) ciśnienie wtrysku lub dawka paliwa do któregoś cylindra (bez możliwości stwierdzenia, który z tych parametrów regulacyjnych uległ zmniejszeniu i bez możliwości wskazania, dla którego cylindra to zmniejszenie zaszło) w przypadku stwierdzenia w trakcie kolejnych badań diagnostycznych:
  – wyraźnego, kilkunastoprocentowego zwiększenia się pierwszych trzech składowych widmowych, występujących w widmach amplitudowo-częstotliwościowych uśrednionych synchronicznie przyspieszeń drgań zarejestrowanych dla prędkości obrotowej maksymalnej regulowanej w stosunku do ich wielkości

odpowiadającej nominalnym wartościom ciśnienia wtrysku i dawki paliwa,
- zmniejszenia się składowej widmowej rzędu 124 f_w do poziomu niewyróżniającego jej na tle składowych sąsiednich występujących w widmach amplitudowo-częstotliwościowych uśrednionych synchronicznie przyspieszeń drgań zarejestrowanych dla prędkości obrotowej biegu jałowego.

Uzyskana diagnoza („parametry regulacyjne są nominalne" albo „kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa do cylindrów jest mniejszy od nominalnego" albo „ciśnienie wtrysku lub dawka paliwa do któregoś cylindra są mniejsze od nominalnych") jest diagnozą jakościową. Opracowanie odpowiedniej metody diagnozowania dającej informacje ilościowe (tzn. jak duże są te rozregulowania) wymaga prowadzenia dalszych badań. Wydaje się też, że w sytuacji dostępności na rynku całej gamy stacjonarnych (warsztatowych) urządzeń diagnostycznych, bardziej lub mniej prostych w obsłudze i podających podobne albo bardziej szczegółowe informacje o parametrach regulacyjnych, diagności nie będą w swojej praktyce warsztatowej korzystać z przedstawionej tu metody wibroakustycznego diagnozowania silnika w zakresie identyfikowania rozpatrywanych parametrów regulacyjnych. Przedstawiona metoda diagnozowania jest jednak stosunkowo prosta i można ją łatwo zaimplementować w systemach diagnostyki pokładowej pojazdów napędzanych przez silniki o ZS, wykorzystując już obecne w takich systemach elementy śledzące prędkość obrotową wału korbowego i uzupełniając te systemy o odpowiednie elementy pozwalające na pomiar sygnałów wibroakustycznych (podobne do czujników spalania stukowego) i ich uśrednienie synchroniczne. Odpowiedni monitor pokładowego systemu diagnostycznego podejmował i sygnalizował by kierowcy decyzje diagnostyczne o konieczności zgłoszenia pojazdu do serwisu w celu dokładnego, warsztatowego diagnozowania i wykonania ewentualnych regulacji wymagających odpowiednich czynności demontażowo-montażowych.

LITERATURA

[1] Boruta G.: *Teoretyczne widmo drgań silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym*, Biul. WAT, rok XLVI, 9, 1997, str. 13-26.

[2] Cempel Cz.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*, Wyd. Pol. Pozn., Poznań 1985.

[3] Kocia B., Kukliński Z., Łukowski Z., Pałacha R., Zapłoński W.: *Budowa i naprawa samochodów STAR 266 i pochodnych*, WPM „WEMA", Warszawa 1988.

[4] Mączak J.: *Wykorzystanie zjawiska modulacji sygnału wibroakustycznego w diagnozowaniu przekładni o zębach śrubowych*, Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 1998.

[5] Zabłocki M.: *Wtrysk i spalanie paliwa w silnikach wysokoprężnych*, WKiŁ, Warszawa 1976.

[6] Zespół IPM WAT: *Sprawozdanie końcowe z realizacji pracy naukowo-badawczej na temat „Badania eksperymentalne samochodów produkcji FSC – Starachowice. Wyniki eksploatacyjnych badań niezawodności samochodów skrzyniowych STAR-200 z serii próbnej*, WAT, Warszawa 1980.

dr inż. **Grzegorz BORUTA** adiunkt w Katedrze Mechatroniki, Wydziału Nauk Technicznych, Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. W pracy naukowej i dydaktycznej zajmuje się zagadnieniami związanymi z eksploatacją pojazdów, w tym z diagnostyką techniczną.

OCENA ZDATNOŚCI HYDRAULICZNYCH ZESPOŁÓW STERUJĄCYCH URUCHAMIANYCH W NISKICH TEMPERATURACH OTOCZENIA

Ryszard JASIŃSKI

Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Hydrauliki i Pneumatyki
Gdańsk ul. Narutowicza 11/12, tel.: 058-347 29 32, e-mil: rjasinsk@pg.gda.pl

Streszczenie

Producenci maszyn i urządzeń z napędem hydraulicznym chcą mieć pewność, że ich wyroby będą prawidłowo działały w różnych warunkach atmosferycznych. Metoda opracowana przez autora, dzięki której można określić zdatność zespołów hydraulicznych, w tym sterujących, uruchamianych w niskich temperaturach otoczenia, może być w tym pomocna.

W laboratorium Katedry Hydrauliki i Pneumatyki Politechniki Gdańskiej przebadano w niskich temperaturach otoczenia (w warunkach szoku termicznego – zasilanie oziębionych zespołów hydraulicznych gorącym czynnikiem roboczym) wybrane zespoły sterujące układów hydraulicznych: zawór przelewowy UZPP16 firmy PONAR WADOWICE, rozdzielacze 4WEH16C33/6AW220-50 firmy REXROTH i RE2510/101 firmy HYDROTOR, rozdzielacz proporcjonalny PVG 32 firmy SAUER DANFOSS, serwozawór 4WS2EM10 - 45/20B2T315Z8EM firmy REXROTH. Wyznaczono współczynniki przejmowana ciepła od oleju do elementów hydraulicznych zespołów sterujących, które umożliwiają skorzystanie z metody symulacji komputerowej lub analitycznej wyznaczenia efektywnego luzu określającego prawidłową lub nieprawidłową pracę. Zostały wyznaczone obszary prawidłowej i nieprawidłowej pracy zaworów w zależności od natężenia przepływu oraz różnicy temperatur pomiędzy gorącym olejem i oziębionym rozdzielaczem.

Słowa kluczowe: napędy hydrostatyczne, elementy sterujące, procesy cieplne.

EVALUATION OF ABILITY OF HYDRAULIC CONTROL COMPONENTS TO START UP IN LOW AMBIENT TEMPERATURES

The manufacturers of machines and devices of hydraulic drive want to have certainty that their articles will operate in different weather conditions. The worked out by R. Jasiński method has been helpful to qualify the evaluation of ability of hydraulic components, also controls to start up in low ambient temperatures.

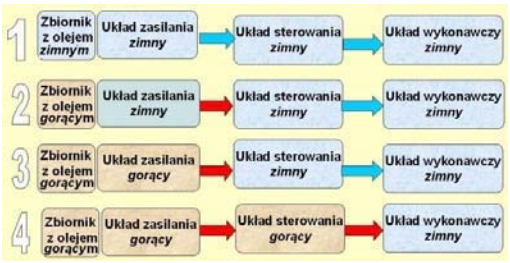
In laboratory of Department of Hydraulics and Pneumatics of Gdańsk University of Technology the chosen control hydraulic components systems have been tested in low ambient temperatures (thermal shock conditions). They were following components: electrically controlled directional spool valve RE2510 produced by HYDROTOR, electro-hydraulically controlled directional spool valve 4WEH16C33/6AW220-50 produced by REXROTH, proportional valve type PVG 32 produced by SAUER DANFOSS, pressure relief valve UZPP16 produced by PONAR WADOWICE, servo valve 4WS2EM10 - 45/20 B2T315Z8EM produced by REXROTH. The database, containing values of heat transfer coefficients, between oil and swilled element, dependent on oil velocity, for various hydraulic components, was created. On the basis of the data, it is possible to determine, by computer simulation or analytic method, the range of parameters (oil flow rate and temperature difference between oil and hydraulic component temperatures) for correct operation of hydraulic components (systems) in thermal shock conditions.
The methods of analytic and computer simulation for determining the area of correct operation of the hydraulic component (system) in thermal shock conditions, might be very useful for designers to construct hydraulic components and systems for machines that work in low ambient temperatures.

Keywords: hydrostatic drive, controls, thermal processes.

1. WSTĘP

Rozruch zespołów hydraulicznych w niskiej temperaturze otoczenia może się odbywać przy zastosowaniu zimnego lub też gorącego czynnika roboczego, jakim najczęściej jest olej hydrauliczny. Możliwe są następujące przypadki uruchomienia układu hydraulicznego w niskich temperaturach (rys. 1):

1. wszystkie zespoły układu hydraulicznego maszyny roboczej w momencie rozruchu mają taką samą niską temperaturę początkową, tj. z układu zasilania płynie czynnik roboczy o niskiej temperaturze do oziębionych zespołów sterujących i wykonawczych;
2. olej w zbiorniku jest rozgrzany, natomiast układ zasilający, zespoły sterujące
3. i wykonawcze oziębione;
4. układ zasilający ma temperaturę wyższą niż oziębione zespoły sterujące i wykonawcze;
5. zespoły wykonawcze są oziębione natomiast układ zasilania i zespoły sterujące posiadają temperaturę wyższą.



Rys. 1. Cztery przypadki warunków uruchomienia układów hydraulicznych w niskich temperaturach otoczenia

W pierwszym przypadku (1) w momencie rozruchu cały układ hydrauliczny włącznie z olejem posiada temperaturę równą temperaturze otoczenia, natomiast w pozostałych przypadkach rozruchu układów (2, 3, 4) olej tuż przed samym zasileniem oziębionego zespołu jest podgrzewany do temperatury znacznie większej aniżeli temperatura otoczenia.
Proces nagrzewania hydraulicznego zespołu sterującego może przebiegać powoli z pozostałymi zespołami układu dla przypadku 1, podobnie z układem zasilającym dla przypadku 4 lub gwałtownie dla przypadków 2 i 3.

2. CEL BADAŃ ZESPOŁÓW STERUJĄCYCH W NISKICH TEMPERATURACH OTOCZENIA

Badania zespołów układów hydraulicznych prowadzone w niskich temperaturach otoczenia mają na celu poszerzenie wiedzy konstruktorów i producentów na temat ich wyrobów. Na podstawie wniosków wynikających z uzyskanych wyników badań, można przeprowadzić zmianę konstrukcji zespołu, zmienić rodzaj materiałów elementów zespołu, a nawet przygotować odpowiednią procedurę postępowania podczas rozruchu oziębionych zespołów.

W układach hydraulicznych maszyn i urządzeń występują różne zespoły sterujące, takie jak: zawory sterujące kierunkiem przepływu, zawory sterujące ciśnieniem i zawory sterujące natężeniem przepływu.

Często spotykanym zespołem w hydraulicznych zaworach sterujących jest para suwakowa: suwak – tuleja cylindryczna. Dlatego niezawodność współpracy tych elementów wpływa na poprawną pracę zaworu. Praca zaworu w warunkach szoku termicznego spowodować może nieprawidłowe działanie pary suwakowej, a więc i całego zaworu.

Niska temperatura wpływa na:
-czas reakcji suwaka zaworu na zadany sygnał (w zaworach ze sterowaniem elektrycznym, elektrohydraulicznym, hydraulicznym) występuje wydłużony czas reakcji,
-wzrost oporów przepływu wewnątrz zespołu,
-wzrost siły potrzebnej do przesterowania suwaka z powodu wzrostu lepkości oleju,
-pogorszenie się warunków smarnych pary suwakowej.

3. PRZYCZYNY NIEPRAWIDŁOWEGO DZIAŁANIA ZAWORÓW W WARUNKACH SZOKU TERMICZNEGO

Przepływający przez oziębiony zawór gorący olej (warunki szoku termicznego) powoduje jego nagrzewanie. Suwak posiadający wielokrotnie mniejszą masę niż korpus, a więc i pojemność cieplną oraz w stosunku do korpusu dużą powierzchnię stykającą się z przepływającym olejem, będzie nagrzewał się szybciej. Wraz ze wzrostem temperatury suwaka, szybciej będą zwiększały się jego wymiary w stosunku do otworu w korpusie, co może doprowadzić do znacznego zmniejszenia luzu. Jak wiadomo luzy te są bardzo małe ze względu na przecieki a ograniczenie swobodnego rozszerzania wiąże się z powstawaniem dużych reakcji między elementami. Powstaną znaczne siły tarcia utrudniające, czy wręcz uniemożliwiające ich przemieszczanie się względem siebie.

Efektywny luz (l_e) pomiędzy korpusem i suwakiem zależy od luzu montażowego (l_m), odkształceń sprężystych elementów rozdzielacza w wyniku oddziaływania ciśnienia (Δl_c), różnicy rozszerzalności cieplnej elementów rozdzielacza (Δl_t):

$$l_e = l_m + \Delta l_c - \Delta l_t \qquad (1)$$

Na działanie rozdzielacza w warunkach szoku termicznego istotne znaczenie mają własności materiałowe poszczególnych elementów. Suwaki rozdzielaczy hydraulicznych wykonane są ze stali, natomiast korpusy są najczęściej wykonane z żeliwa. Współczynnik rozszerzalności liniowej dla żeliwa wynosi $10{,}5 * 10^{-6}$ 1/K, stali $11 * 10^{-6}$ 1/K [2, 4].

Efektywny luz uwzględniając wpływ współczynników rozszerzalności liniowej można obliczyć:

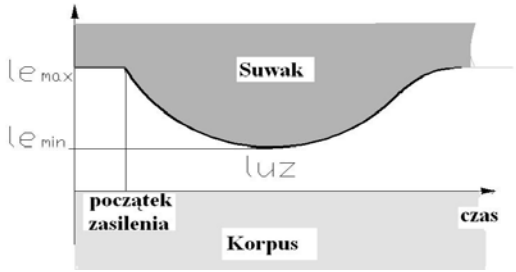
$$l_e = l_m + \Delta l_c + \beta_k D_k (T_k - T_0) - \beta_s D_s (T_s - T_0) \quad (2)$$

gdzie: . β_k, β_s - współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej korpusu i suwaka, T_o – temperatura pomiaru wymiaru liniowego elementów, T_k- temperatura korpusu, T_s- temperatura suwaka, D_k – średnica otworu w korpusie, D_s.- średnica suwaka.

Jeżeli wartości współczynników liniowej rozszerzalności cieplnej suwaka i korpusu są takie same lub przybliżone można równanie 2 zapisać w postaci:

$$l_e = l_m + \Delta l_c - \beta_s D_s (T_s - T_0) \quad (3)$$

Oddziaływanie ciśnienia na suwak i korpus powoduje ich odkształcenie. Ciśnienie wpływa na zwiększenie luzu. Im ciśnienie jest mniejsze w kanałach rozdzielacza tym szybciej może dojść do wykasowania efektywnego luzu podczas zasilania go w warunkach szoku termicznego.



Rys. 2. Zmiana efektywnego luzu pomiędzy suwakiem a korpusem oziębionego rozdzielacza podczas zasilanego gorącym olejem

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych, wpływ ciśnienia na zmianę luzu jest mniej znaczący niż wystąpienie dużej różnicy temperatur współpracujących elementów (suwaka i korpusu). Obliczenia przeprowadzono dla rozdzielacza RE2510/101 (średnica suwaka 18 mm). Z tych obliczeń zmiany luzu wynika, że jeżeli różnica temperatur suwaka i korpusu rozdzielacza będzie wynosić ΔT=20 °C, to zmiana luzu wyniesie 3,86μm. Dla większej różnicy temperatur ΔT=45 °C, to zmiana luzu wyniesie 8,74μm. Natomiast oddziaływanie ciśnienia oleju (16 MPa) spowoduje zmianę luzu o 1,49 μm.

Jeżeli założymy, że odkształcenia sprężyste elementów Δl_c w wyniku oddziaływania ciśnienia oleju są niewielkie, to równie 2 można uprościć do postaci:

$$l_e = l_m + \beta_k D_k (T_k(\tau) - T_0) - \beta_s D_s (T_s(\tau) - T_0) \quad (4)$$

Na zmianę luzu efektywnego ma wpływ wartość luzu montażowego (początkowego) oraz różnica temperatur ($T_s(\tau)$-$T_k(\tau)$) współpracujących elementów (rys. 2). Zagrożenie nieprawidłowej pracy jest tym większe, im większa jest różnica temperatur pomiędzy zasilającym gorącym olejem i zimnym rozdzielaczem.

4. BADANE ZAWORY W NISKICH TEMPERATURACH OTOCZENIA

W laboratorium Katedry Hydrauliki i Pneumatyki Politechniki Gdańskiej przebadano w warunkach szoku termicznego następujące zawory [1, 3, 5-7]:

UZPP16 – zawór przelewowy pośredniego działania firmy PONAR WADOWICE,

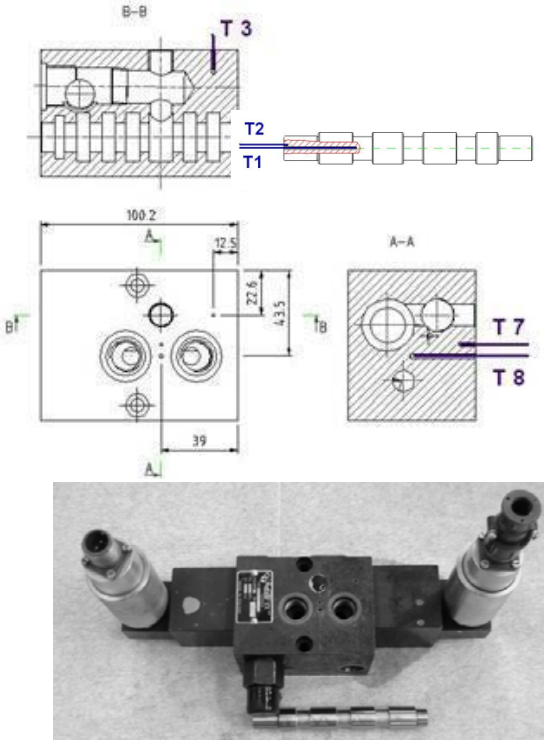
4WEH16C33/6AW220-50 – rozdzielacz dwustopniowy firmy REXROTH,

RE2510/101 – rozdzielacz sterowany elektrohydraulicznie firmy HYDROTOR (rys. 3),

PVG 32 – rozdzielacz proporcjonalny firmy SAUER DANFOSS (rys. 4).

4WS2EM10 - 45/20B2T315Z8EM - serwozawór firmy REXROTH (rys. 5).

Badane zawory należą do dwóch różnych grup: rozdzielacze do zaworów sterujących kierunkiem przepływu, a zawór przelewowy do zaworów sterujących ciśnieniem.



Rys. 3. Rozdzielacz RE2510/101 firmy Hydrotor
T1, T2 – termopary umieszczone w suwaku
T3, T7, T8 – termopary umieszczone w korpusie

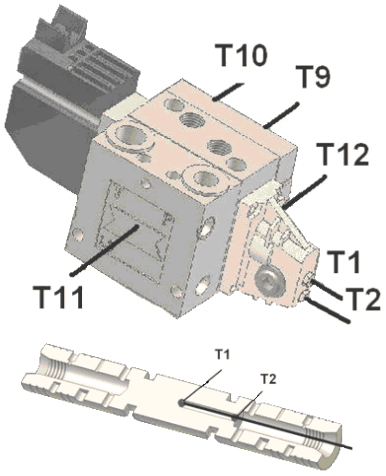
W urządzeniach hydraulicznych często stosuje się rozdzielacze ze sterowaniem elektrohydraulicznym. Z tego powodu zostały przebadane różne konstrukcje zaworów hydraulicznych sterowanych elektrycznie.

Przebadane rozdzielacze suwakowe należą do dwóch grup w zależności od pełnionej funkcji:

I - rozdzielacze służące do sterowania kierunkiem przepływu - klasyczne (rys. 3),

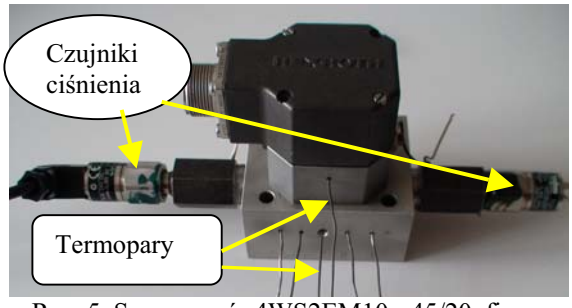
II - rozdzielacze proporcjonalne i serwozawory spełniające dodatkowo rolę zaworów sterujących natężeniem przepływu (rys. 4, 5).

Średnice suwaków rozdzielaczy PVG 32 i RE2510/101 wynoszą 18 mm. Luz początkowy pomiędzy suwakiem i korpusem w rozdzielaczu PVG 32 wynosi 7µm, a w RE2510/101 6µm (pomiary wykonano w Laboratorium Metrologii Politechniki Gdańskiej).



Rys. 4. Rozdzielacz PVG 32 firmy Sauer Danfoss T1, T2- termopary umieszczone w suwaku T9, T10, T11, T12 termopary umieszczone w elementach nieruchomych rozdzielacza

Średnica suwaka badanego serwozaworu *4WS2EM10* wynosi 6,495 mm, a luz pomiędzy suwakiem a tuleją cylindryczną korpusu 5 µm.



Rys. 5. Serwozawór 4WS2EM10 - 45/20 firmy Rexroth z czujnikami temperatury (termoparami) i ciśnienia

5. STANOWISKO BADAWCZE

Na podstawie opracowanej przez dr R. Jasińskiego metodyki [1-2] przebadano zawory w warunkach szoku termicznego. Badane zwory umieszczono w komorze niskich temperatur, w której osiągano temperatury do – 25 °C. Zawory były zasilane gorącym olejem Total Azolla 46 o temperaturze od 20 °C do 55 °C. W elementach nieruchomych (korpusach) oraz ruchomych (suwakach) zaworów umieszczono termopary do pomiaru temperatury.

Mierzono temperaturę, ciśnienie oraz natężenie przepływu oleju w kanałach P, T, A, B zespołów sterujących.

W korpusie rozdzielacza RE2510/101 (rys. 3) wykonano otwory, w których umieszczono termopary. Otwory pod termopary T7 i T8 znajdują się w jednej osi na różnych głębokościach blisko źródła przepływającego oleju, natomiast otwór pod termoparę T3 oddalony jest od kanału przepływu gorącego oleju. W celu przebadania suwaka wykonano dwa otwory pod termopary. Otwory wykonane są osiowo, lecz na różnych głębokościach. Jeden z otworów znajduje się w pobliżu miejsca opływu powierzchni cylindrycznych suwaka przez gorący olej. Drugi znajduje się przy powierzchni czołowej suwaka.

Do przeprowadzenia pomiarów nagrzewania się rozdzielacza PVG 32 wykonane zostały otwory w suwaku i korpusie, w których umieszczono termopary. Ich rozmieszczenie przedstawia rysunek 4. W suwaku został wykonany otwór do połowy jego długości, w którym umieszczona została termopara T1 na końcu otworu, zaś termopara T2 na początku tego otworu. Termopary T9, T10, T11 i T12 rozmieszczone zostały w elementach nieruchomych rozdzielacza.

W elementach nieruchomych serwozaworu *4WS2EM10 - 45/20* umieszczono 11 termopar (rys. 5), dzięki którym zobrazowano procesy nagrzewania w różnych warunkach zasilania. Czujniki ciśnienia (rys. 5) umożliwiły poprzez pomiar ciśnienia określenie czasu odpowiedzi na zadany sygnał i zmianę tego czasu wraz ze zmianą temperatury otoczenia.

Zarejestrowane charakterystyki temperatury elementów zespołów sterujących pozwoliły na wyznaczenie współczynników przejmowania ciepła od oleju do elementów zaworów.

6. METODY OKREŚLENIA OBSZARÓW PRAWIDŁOWEGO I NIEPRAWIDŁOWEGO DZIAŁANIA ZESPOŁU HYDRAULICZNEGO W WARUNKACH SZOKU TERMICZNEGO

Zarejestrowane charakterystyki podczas badań eksperymentalnych nagrzewania elementów zespołów hydraulicznych oraz opracowana metodyka obróbki danych umożliwiają ocenę zmiany luzu efektywnego w procesie rozruchu w warunkach szoku termicznego.

Luz ten można wyznaczyć kilkoma metodami:

- eksperymentalną,
- analityczną
- symulacji komputerowej.

Metody te umożliwiają określenie prawidłowej lub nieprawidłowej pracy zespołu (układu) hydraulicznego.

Najkorzystniejszą metodą ze względu na skuteczność oraz dokładność określenia obszaru

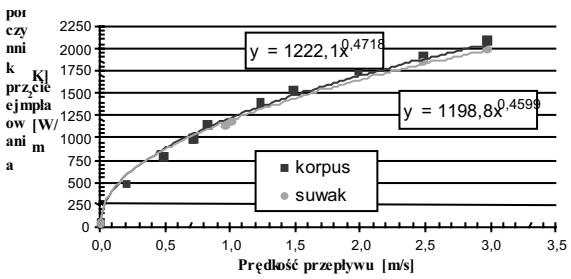
prawidłowego działania zespołu hydraulicznego w zależności od natężenia przepływu (prędkości obrotowej) oraz różnicy temperatur oleju i zespołu hydraulicznego jest metoda symulacji komputerowej. W celu przeprowadzenia obliczeń numerycznych nagrzewania elementów zespołów hydraulicznych niezbędne jest przyjęcie odpowiednich warunków. Jednym z nich jest współczynnik przejmowania ciepła od oleju do powierzchni nagrzewających się elementów (np. dla rozdzielacza *RE2510/101* można go określić na podstawie rys. 6).

7. PRZYKŁADOWE WYNIKI PRZEPROWADZONYCH BADAŃ ROZDZIELACZA RE2510/101

Rozdzielacz RE2510/101 przebadano w różnych warunkach zasilania. Ogółem przeprowadzono kilkanaście serii pomiarowych. Różnica temperatur między temperaturą oleju a początkową temperaturą zespołu mieściła się w granicach 40 ÷ 80 [°C]. W kilku przypadkach oprócz opóźnionej reakcji przesterowania zauważono nieprawidłową pracę rozdzielacza w warunkach szoku termicznego.

W początkowej fazie po uruchomieniu układu w warunkach szoku termicznego występuje wzrost oporów przepływu (wzrost ciśnienia oleju) w rozdzielaczu, który spowodowany był tym, iż pewna objętość schłodzonego oleju znajdowała się w kanałach zespołów hydraulicznych.

Na podstawie zarejestrowanych przebiegów temperatur elementów nieruchomych i ruchomych (suwaka) wyznaczono średnie temperatury tych elementów. Na podstawie przebiegów temperatur wyznaczono tempa nagrzewania, a następnie współczynniki przejmowania ciepła (rys. 6).



Rys. 6. Współczynnik przejmowania ciepła od oleju do korpusu i suwaka rozdzielacza RE2510/101 w funkcji prędkości przepływu

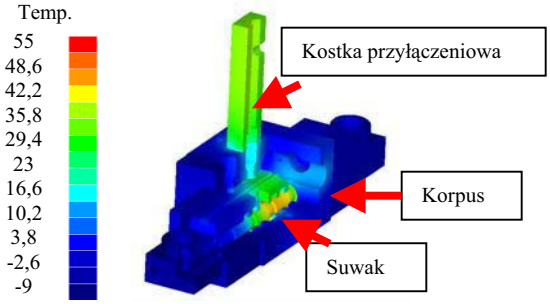
Współczynniki przejmowania ciepła dla korpusu i suwaka rozdzielacza RE2510/101 w funkcji średniej prędkości przepływu (w) można wyznaczyć z zależności:

dla suwaka - $\alpha_S = 1198{,}8 \cdot w^{0,4599}$ [W/m^{2}K] (5)

dla korpusu - $\alpha_k = 1222{,}1 \cdot w^{0,4718}$ [W/m^{2}K] (6)

Na podstawie charakterystyk (rys. 6) lub zależności 5 i 6 można określić wartości współczynników przejmowania ciepła od oleju do elementów rozdzielacza, które umożliwiają skorzystanie z metody symulacji komputerowej określania luzu między suwakiem a korpusem rozdzielacza RE2510/101.

Przeprowadzono obliczenia numeryczne procesu nagrzewnia rozdzielacza wykorzystując metodę elementów skończonych (rys. 7).

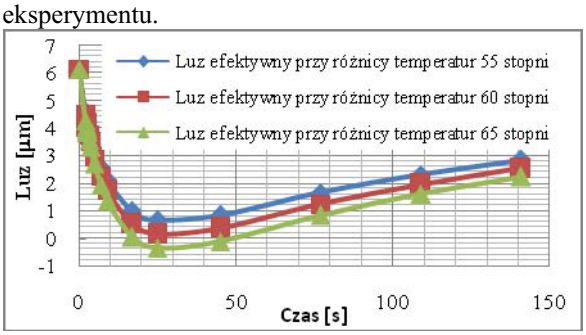


Rys. 7. Rozkład pól temperatur w nagrzewających się elementach rozdzielacza RE2510/101 (temperatura początkowa -9 ^{0}C, natężenie przepływu 10,6 dm^3/min)w 72 sekundzie po zasileniu go olejem o temperaturze 45 °C

Na podstawie obliczeń numerycznych procesu nagrzewania rozdzielacza dla natężenia przepływu Q=30 [dm^3/min] i początkowej różnicy temperatur $\Delta T_{ol\text{-}R}$ 55 °C, 60 °C i 65 °C między olejem a rozdzielaczem wykonano charakterystyki efektywnego luzu między współpracującymi elementami (rys. 8).

Przy różnicy temperatur $\Delta T_{ol\text{-}R}$ 65 °C (rys. 8) dochodzi do wykasowania luzu pomiędzy suwakiem a korpusem i występuje nieprawidłowa praca.

Luz wyznaczony na postawie obliczeń numerycznych ma dużą zgodność z wynikami eksperymentu.



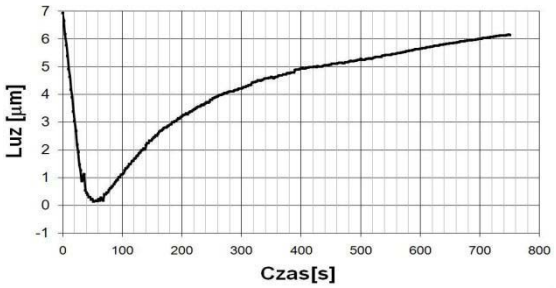
Rys. 8. Efektywny luz pomiędzy suwakiem i korpusem rozdzielacza RE2510/101 dla temperatury początkowej –15 °C, Q=30 [dm^3/min] i różnej wartości $\Delta T_{ol\text{-}R}$ między olejem a rozdzielaczem

8. PRZYKŁADOWE WYNIKI PRZEPROWADZONYCH BADAŃ ROZDZIELACZA PVG 32

Przeprowadzono kilkanaście serii pomiarowych badania rozdzielacza PVG 32, podczas których różnica temperatur pomiędzy

olejem a podzespołem była w przedziale $\Delta T=20\div75$ K.

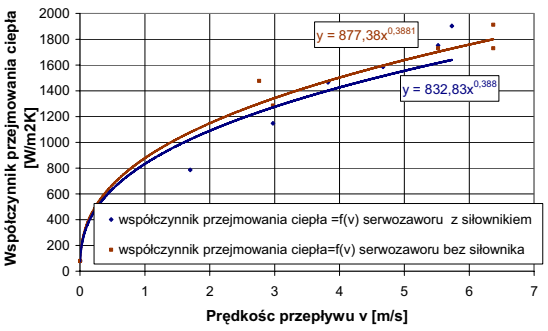
Jedno z badań wykonano podczas przepływu rozgrzanego oleju o temperaturze 53 ºC, natężeniu przepływu 36 dm^3/min przez kanały schłodzonego rozdzielacza o temperaturze -17 °C. Wyznaczono różnicę temperatur pomiędzy suwakiem a korpusem. Wykorzystując równanie (1) i zakładając, że odkształcenia suwaka i korpusu w wyniku oddziaływania ciśnienia są niewielkie, wyznaczono efektywny luz pomiędzy tymi elementami (rys. 9). Na podstawie przebiegu efektywnego luzu (rys. 9) można stwierdzić, że nie dojdzie do zakleszczenia suwaka w korpusie rozdzielacza.



Rys. 9. Efektywny luz w rozdzielaczu PVG 32 w funkcji czasu dla parametrów początkowych: temperatura –17 °C, temperatura oleju 53 °C, natężenie przepływu 36 dm^3/min)

9. PRZYKŁADOWE WYNIKI PRZEPROWADZONYCH BADAŃ SERWOZAWORU *4WS2EM10 - 45 / 20B2T315Z8EM*

Jednym z najistotniejszych osiągnięć z przeprowadzonych badań serwozaworu w warunkach szoku termicznego było wyznaczenie charakterystyk współczynnika przejmowania ciepła od oleju do elementów nieruchomych serwozaworu. Na rysunku 10 przedstawione są dwie charakterystyki współczynnika przejmowania ciepła wyznaczone na podstawie badań serwozaworu w układzie z siłownikiem i bez siłownika.



Rys. 10. Współczynnik przejmowania ciepła od oleju do elementów nieruchomych serwozaworu (typu: 4WS2EM10 - 45 / 20B2T315Z8EM)

10. PODSUMOWANIE

1. Zasadniczym czynnikiem konstrukcyjnym, decydującym o dopuszczalnych parametrach działania zaworów w warunkach szoku termicznego, jest efektywny luz między suwakiem a tuleją cylindryczną korpusu.
2. Zasilenie gorącym olejem, w sposób skokowy, zaworu w warunkach szoku termicznego powoduje zmianę luzu efektywnego na skutek różnic w rozszerzalności cieplnej elementów.
3. Eksploatacja rozdzielaczy w niskich temperaturach powoduje opóźnienie reakcji na zadany sygnał sterujący oraz wzrost oporów przepływu oleju.
4. Metodą symulacji komputerowej lub analityczną można ocenić działanie zaworów hydraulicznych w warunkach szoku termicznego, dzięki wyznaczonym współczynnikom przejmowania ciepła.
5. Wyniki badań hydraulicznych zespołów sterujących mogą być wykorzystane przez inżynierów w konstruowaniu zaworów hydraulicznych i projektowaniu układów hydraulicznych wykorzystywanych w urządzeniach i maszynach pracujących w niskich temperaturach otoczenia.

LITERATURA

[1] Jasinski R.: *Methods of determination of correct operation area for hydraulic component in low ambient temperatures*, rozdział w monografii: Developments in mechanical engineering, Wydawnictwo P.G., Gdańsk 2008

[2] Jasiński R.: *Działanie wolnoobrotowych silników hydraulicznych w warunkach szoku termicznego*. Praca doktorska, promotor: A. Balawender. Gdańsk 2002.

[3] Jasiński R.: *Działanie podzespołów hydraulicznych w niskiej temperaturze otoczenia*. Konferencja Naukowa, Mechanika 2005, Gdańsk 2005r.

[4] Chełmińska H. i inni: *Charakterystyki stali*, tom 1, część 1, Wydawnictwo „Śląsk", Katowice, 1975 r.

[5] Rutkiewicz Ł.: *Badanie eksperymentalne działania rozdzielacza proporcjonalnego w warunkach niskiej temperatury otoczenia*, Praca dyplomowa, Promotor: R. Jasiński, Politechnika Gdańska, 2006 r.

[6] Szałkowski S.: *Badanie rozdzielacza hydraulicznego w warunkach szoku termicznego*, Praca dyplomowa, Promotor: R. Jasiński, Politechnika Gdańska, 2004 r.

[7] Witos D.: *Badanie wybranych zaworów hydraulicznych w niskich temperaturach*, Praca dyplomowa, Promotor: R. Jasiński, Politechnika Gdańska, 2007 r.

OCENA SZCZELNOŚCI KOMORY SPALANIA OKRĘTOWEGO TŁOKOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO W CZASIE EKSPLOATACJI

Marek ŁUTOWICZ

Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów
Akademia Marynarki Wojennej 81-919 Gdynia Śmidowicza 69, e-mail: mluto@wp.pl

Streszczenie

Poprzez aproksymację przebiegu ciśnienia wewnątrzcylindrowego tłokowego silnika spalinowego ograniczonego do procesu sprężania przebiegiem uzyskanym z modelu można wyznaczyć wartości parametrów wejściowych dla tego modelu. Opracowano model teoretyczny procesu sprężania, umożliwiający wyznaczenie teoretycznego przebiegu ciśnienia jako funkcji kąta obrotu wału. Jeśli skutkiem przeprowadzonych symulacji teoretyczny przebieg krzywej sprężania pokryje się z przebiegiem pomierzonym można założyć, że symulowana nieszczelność wywiera taki sam skutek jak rzeczywista i może być miarą diagnostyczną. Dodatkowo ekstrapolacja tak wyznaczonego przebiegu sprężania w obszar spalania ułatwia wyznaczenie ciśnienia końca sprężania i lokalizację na wykresie punktu w którym tłok osiąga górne martwe położenie.

Słowa kluczowe: diagnostyka, silnik, sprężanie, nieszczelność.

MARINE DIESEL ENGINE COMBUSTION CHAMBER TIGHTENS ASSESSMENT IN THE OPERATION CONDITIONS

Summary

Using a mathematical model which is achieved as an approximation of internal cylinder pressure during the only compression process in rotary internal combustion engines it is possible to get values of internal parameters for this model. A theoretical model for compression process has been developed for define a theoretical pressure curve in function of shaft's rotation angle. If as a result of theoretical simulation a path of compression curve will be the same as a real path of measured pressure it could be state that the simulated leakage caused the same result as a real leakage cause and may be used as a diagnostic measure. Additionally extrapolation of the theoretical path of compression achieved this way in to the range of combustion gives possibility to easier asses compression pressure in the end of the compression and to find out the TDC of the piston.

Keywords: Diagnostics, engine, compression, not-tightness.

1. WSTĘP

Konsekwencją zużycia tłokowego silnika spalinowego jest przeważnie obniżone ciśnienie sprężania i wzrost temperatury spalin wylotowych. Dotychczas istniejące indykatory elektroniczne, szczególnie w przypadku zastosowania ich na silnikach średnio-obrotowych, najczęściej umożliwiają tylko stwierdzenie faktu obniżonego maksymalnego ciśnienia spalania. Jest to informacja niewystarczająca do stwierdzenia jaka jest tego przyczyna ponieważ wartość maksymalnego ciśnienia spalania zależy nie tylko od ciśnienia sprężania lecz przedewszystkim od ciśnienia doładowania i parametrów wtrysku paliwa. W warunkach eksploatacyjnych pomiar maksymalnego ciśnienia sprężania w silnikach średnio-obrotowych zakłócony jest przez przyrost ciśnienia wywołany spalaniem występującym przed osiągnięciem przez tłok punktu GMP [2]. Gdyby taki pomiar był możliwy to również nie uzyskamy odpowiedzi w jakim stopniu ciśnienie to zależy od szczelności układu, a w jakim od luzów w układzie korbowym, od faz rozrządu, od ciśnienia doładowania i od drożności układu wymiany ładunku. Postawiono tezę, że poprzez aproksymację przebiegu ciśnienia wewnątrzcylindrowego tłokowego silnika spalinowego ograniczonego do procesu sprężania przebiegiem uzyskanym z modelu matematycznego można wyznaczyć wartości parametrów wejściowych dla tego modelu. Jeśli skutkiem przeprowadzonych symulacji teoretyczny przebieg krzywej sprężania pokryje się z przebiegiem pomierzonym można założyć, że symulowana nieszczelność wywiera taki sam skutek jak rzeczywista i wówczas parametr ją opisujący może być miarą diagnostyczną. Możliwe jest również wyznaczenie innych miar diagnostycznych, które uszczegółowią stawianą diagnozę o stanie technicznym przestrzeni roboczych silnika pod względem jakościowym i ilościowym.

2. MODEL PROCESU SPRĘŻANIA

Zastosowany model wynika z I zasady termodynamiki. Stosując metodę różnic skończonych, dla wybranego kroku objętości ΔV_i przy znanych parametrach punktu i-tego obliczane są parametry punktu (i+1) [1, 6]. Aby model umożliwiał wyznaczenie teoretycznego przebiegu ciśnienia sprężania z uwzględnieniem strat energii związanej z wymianą ciepła i ubytkiem masy czynnika roboczego (jaka zachodzi pomiędzy przestrzenią roboczą a skrzynią korbową, kanałem doprowadzenia powietrza i kanałem wylotu spalin), równanie bilansu energii dla i-tego elementu kąta obrotu wału korbowego α_i zapisano w postaci:

$$\Delta U_i = -\Delta L_i - \Delta Q_{wi} - \Delta E_{ni} \quad (1)$$

Pierwszy człon równania (1) stanowi energia wewnętrzna akumulowana w czynniku roboczym. Przy założeniu, że energia ta zależy tylko od temperatury, człon ten wyrażono jako:

$$\Delta U = U(T_i) - U(T_{i+1}) \quad (2)$$

Człon drugi równania (1) stanowi praca zewnętrzna wyrażona jako:

$$\Delta L_i = \frac{p_i + p_{i+1}}{2}(V_{i+1} - V_i) \quad (3)$$

gdzie nieznane ciśnienie w punkcie i+1 wyznaczono z równana stanu:

$$p_{i+1} = p_i \left(\frac{V_i}{V_{i+1}} \right) \cdot \left(\frac{T_{i+1}}{T_i} \right) \quad (4)$$

Kolejnym członem równania (1) jest ilość ciepła wymienionego przez ładunek ze ściankami komory spalania. Ciepło to obliczono zgodnie z wzorem Newtona. W opracowanym modelu w procesie wymiany ciepła uwzględniono temperaturę cylindra o polu powierzchni zależnym od położenia kątowego obrotu wału korbowego i zwykle wyższą średnią temperaturę głowicy i tłoka o stałym polu powierzchni. W rozważaniach przyjęto, że średnia temperatura powierzchni głowicy i tłoka jest o 75 K większa niż cylindra. Zapewni to zmienność średniej temperatury komory spalania jako funkcji położenia kątowego obrotu wału korbowego. Z pośród wielu znanych formuł empirycznych określających wartość współczynnika przejmowania ciepła w komorach roboczych silników zdecydowano wykorzystać formułę Hohenberga [5]:

$$h_c = 130 V_c^{-0,06} p^{0,8} T^{-0,4} (c_m + 1,4)^{0,8} \quad (5)$$

gdzie:

h_c – współczynnik wymiany ciepła [W/(m^{2}K)]
V_c – objętość przestrzeni nad tłokiem [m^3],
p – ciśnienie [bar],
T – temperatura czynnika [K],
c_m – średnia prędkość tłoka [m/s]

Ostatnim członem równania (1) jest energia odprowadzana wraz z czynnikiem wypływającym przez nieszczelności. Jest to energia jakiej użyto dotychczas do jego sprężenia. Energię tą wyraża formuła:

$$\Delta E_{ni} = \Delta m \cdot i_{(T_i)} \quad (6)$$

Całkowity przekrój nieszczelności, przez który może następować ucieczka czynnika roboczego, stanowi suma pola powierzchni przekroju swobodnego w zamku pierścienia, pola powierzchni sierpowych prześwitów pomiędzy tuleją cylindrową a pierścieniami, pole powierzchni prześwitów pomiędzy grzybkami zaworów i ich gniazdami. Efekt nie przylegania pierścienia może wystąpić w przypadku jego pęknięcia lub zatarcia pierścienia w rowku tłoka. Całkowicie odmienny charakter mają natomiast nieszczelności spowodowane pęknięciami tulei lub tłoka. Natomiast nieszczelności zaworów mogą powstać wskutek pęknięcia i wykruszenia materiału grzybka zaworu lub gniazda, oraz wskutek nie domykania zaworów spowodowanego zużyciem prowadnic lub niewłaściwą regulacją luzów zaworowych.

Parametrem, który wyraża ilościowo utratę czynnika przez nieszczelności, jest współczynnik strat ładunku wyrażony przez stosunek masy ładunku utraconego w czasie całego procesu sprężania do początkowej masy ładunku. Parametr ten jest parametrem obliczeniowym lub wyznaczanym na stanowisku badawczym. W warunkach rzeczywistych nie jest on praktycznie mierzony. Masa traconego przez nieszczelności ładunku jest funkcją pola powierzchni i kształtu nieszczelności, współczynnika przepływu, różnicy ciśnień nad tłokiem i w skrzyni korbowej oraz czasu trwania wypływu:

$$\Delta m_{ni} = f(A_{ni}, \mu, \Delta p, t) \quad (7)$$

gdzie:

A_{ni} – powierzchnia nieszczelności
μ – współczynnik wypływu
Δp – różnica ciśnień
t – czas trwania wypływu

Z pośród formuł opisujących proces przepływu przez nieszczelności wybrano formułę [1]:

$$\Delta m_{ni} = \Delta t_i \cdot A_{ni} \cdot \Delta p^a \cdot \mu_{cr} \quad (8)$$

Zależnie od przyjętego modelu przepływu wykładnik potęgowy „a" mieści się w granicach od 0,5 do 1. Ze względu na różne potencjalne przyczyny nieszczelności nie istnieją żadne przesłanki uzasadniające przyjęcie którejkolwiek z tych wartości [1]. Ponieważ nieznane jest zarówno pole powierzchni nieszczelności jak i jej kształt a zatem i wartość współczynnika μ_{cr}, w modelu użyto iloczynu powierzchni nieszczelności i współczynnika wypływu. Jako, że powierzchnia nieszczelności nie odniesiona do wymiarów silnika jest parametrem mało sugestywnym, wykorzystano jako parametr zastępczą szczelinę pierścieniową o długości równej obwodowi cylindra [3]. Iloczynem współczynnika wypływu i szerokości tej szczeliny oznaczono μ_l. Wówczas ubytek masy czynnika Δm_i przepływającego przez nieszczelności w czasie Δt traktując jako przepływ płynu nieściśliwego wyrażono:

$$\Delta m_i = \pi D \cdot \mu_l \cdot \Delta t \sqrt{2\Delta p_i \frac{m_i}{V_i}} \tag{9}$$

gdzie:

D – średnica cylindra,

μ_l – iloczyn współczynnika wypływu i szerokości szczeliny zastępczej,

Δp – różnica ciśnień w cylindrze i skrzyni korbowej silnika,

m_i – masa czynnika w cylindrze

V_i – chwilowa objętość cylindra

W zależności (2) U_{i+1} jest funkcją nieznanej temperatury T_{i+1}. Jako pierwsze przybliżenie wartości temperatury w punkcie (i+1) przyjęto następującą formułę:

$$\widetilde{T}_{i+1} = T_i \cdot \left(\frac{V_i}{V_{i+1}} \right)^{\chi - 1} \tag{10}$$

Wykładnik politropy przybliżono wykładnikiem adiabaty powietrza. Przybliżenie to skutkuje błędem w bilansie energii. Jeżeli nadwyżka energii jest mniejsza od zadanej dokładności obliczeń, przyjmuje się, że parametry końca przemiany zostały obliczone poprawnie i przystępuje się do obliczeń dla następnej wartości kąta obrotu wału korbowego. Natomiast jeżeli nadwyżka bilansu jest większa niż 0,01 J oblicza się ponownie końcową temperaturę przemiany według wzoru:

$$T'_{i+1} = T_{i+1} - \frac{\Delta E}{\frac{m_{i+1}}{M} c_{mv}(T_{i+1})} \tag{11}$$

gdzie: $c_{mv}(T_{i+1})$ – molowe różniczkowe ciepło właściwe czynnika.

Obliczenia powtarza się, aż do uzyskania mniejszej wartości nadwyżki bilansu energii od założonej dokładności obliczeń.

3. METODY DOBORU WARTOŚCI PARAMETRÓW WEJŚCIOWYCH

Przedstawiony model może być przekształcony w model operacyjny, jeżeli określone zostaną parametry wejściowe oraz podane zostaną warunki graniczne (początkowe i brzegowe) umożliwiające znalezienie rozwiązań szczegółowych. Trudno jest określić z wystarczającą dokładnością wartość któregokolwiek istotnego parametru wejściowego z wyjątkiem wymiarów geometrycznych i prędkości obrotowej. Nieznane wartości parametrów wejściowych mogą być znalezione na drodze optymalizacji zmierzającej do tego aby obliczony przebieg sprężania był możliwie najlepszym przybliżeniem danych uzyskanych z pomiaru. Zgodnie z postawioną tezą pracy uzyskane tak wartości mogą być parametrami diagnostycznymi. Ze względu na znaczną ilość parametrów o nieznanych wartościach i błędy toru pomiarowego dobór właściwej metody optymalizacji ma istotne znaczenie. Ponieważ żadna z przebadanych metod w czystej postaci nie dała pozytywnego rezultatu, zastosowano kombinację kilku metod gdzie:

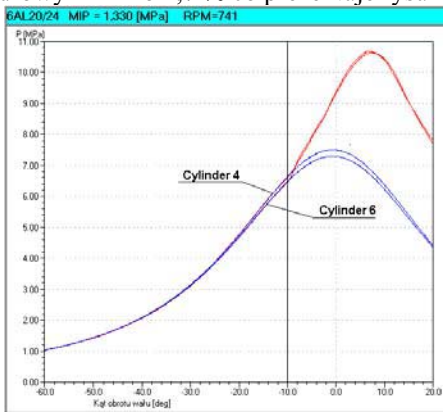
1) T_0 założono jako stałe, jako p_0 przyjęto 0,1MPa
2) wygenerowano populację o losowych wartościach parametrów T_s, ε, μ_l,
3) wyznaczono krzywe modelowe z parametrami T_0, T_s, ε, μ_l i p_0;
4) z aproksymacji wyznaczono wzmocnienia k_u, przy których amplitudy przebiegów modelowych i pomiarowego na początku i końcu rozpatrywanego przedziału są sobie równe;
5) metodą przeszukiwania lokalnego wyznaczono przesunięcia $\Delta\alpha$ i Δp_t pomiędzy krzywymi: modelowymi skorygowanymi o obliczone w punkcie 4 wzmocnienia a pomiarową tak, aby sumy kwadratów różnic między nimi były najmniejsze;
6) powtarzano obliczenia od punktu 4 dopóki suma kwadratów różnic między krzywą modelową a pomiarową w kolejnym kroku zmniejszała się;
7) parametry p_0 skorygowano o obliczone wzmocnienia k_u i powtarzano obliczenia od punktu 3 do czasu, aż w całej populacji $|k_u - 1| < 0{,}001$;
8) jeśli nie przekroczono założonego czasu obliczeń, wykonywano operacje genetyczne selekcję krzyżowanie i mutację na parametrach T_s, ε, μ_l i powtarzano obliczenia od punktu 3;
9) z populacji rozwiązań wybrano rozwiązanie o najlepszym dopasowaniu.

4. WYNIKI BADAŃ EKSPLOATACYJNYCH

Pierwszym przypadkiem zastosowania opisanej metody wyodrębnienia parametrów diagnostycznych, gdzie dotychczasowe metody diagnostyczne dostarczają niejednoznaczne rezultaty, był jeden z silników 5BAH22 zespołu prądotwórczego. W silniku tym stwierdzono przekroczenie dopuszczalnej temperatury w zbiorczym kanale spalin wylotowych. Diagnozę utrudniał nie funkcjonujący układ pomiaru temperatur spalin. Ciśnienie doładowania było tylko nieznacznie mniejsze niż w innych silnikach tego typu, przy analogicznym obciążeniu. Przeprowadzone indykowanie wykazało natomiast znaczne rozrzuty w odniesieniu do wartości średniej ciśnień sprężania w poszczególnych cylindrach. W sytuacji takiej należałoby podejrzewać, że niektóre zawory wylotowe straciły szczelność, a wypływ czynnika roboczego przez nieszczelności powoduje spadek ciśnienia i wzrost temperatury spalin. Gdy zarejestrowane przebiegi ciśnienia wewnątrzcylindrowego poddano obróbce w celu wyznaczenia parametrów wejściowych, stwierdzono, że różnice w ciśnieniach sprężania spowodowane są różnicami ciśnień początkowych w poszczególnych cylindrach. Ciśnienia sprężania były wprost proporcjonalne do ciśnień początkowych z wyjątkiem cylindra nr 4. Pozwoliło to na postawienie diagnozy, że układy cylindrowe są szczelne, natomiast przyczyną wzrostu

temperatury jest zmniejszony dopływ powietrza spowodowany pogorszoną drożnością kanałów dolotowych. Diagnozę tą potwierdziły przeprowadzone badania endoskopowe.

Na jednym z holowników Marynarki Wojennej z silnikiem 6ATL25/30 po remoncie w roku 1998 stwierdzono fakt zawyżonego ciśnienia sprężania. Bezpośrednio po remoncie można wykluczyć możliwość osadzania się znacznych grubości nagaru na powierzchniach tłoka i głowicy. Na podstawie analizy obwiedni drgań rejestrowanych na głowicy silnika stwierdzono, że fazy rozrządu są prawidłowe. Z aproksymacji procesu sprężania krzywą modelową potwierdzono zawyżenie wartości ciśnienia sprężania w układzie cylindrowym nr 4 o 2,7 % co prezentuje rysunek 1.



Rys. 1. Zawyżone ciśnienie sprężania w cyl. 4 w porównaniu do cyl. 6. (kolor czerwony przebiegi ciśnienia, niebieski modelowe przebiegi sprężania).

Nie stwierdzono istotnych różnic w wyznaczonych wartościach ciśnień początkowych (zawierały się one w przedziale 0,239÷0,242 MPa). Wyznaczona nieszczelność jako zastępcza szczelina pierścieniowa przyjmowała wartości 5,4÷5,7μm. Istotnie natomiast różniły się wyznaczone geometryczne stopnie sprężania 13,10 dla cylindra 4 i 12,71 średnio - dla pozostałych cylindrów. Ponieważ 3 % odstępstwa od średniej jest dla ciśnienia sprężania dopuszczalne, okręt pływa do dnia dzisiejszego. Jak wykazały późniejsze badania diagnostyczne realizowane w kolejnych latach eksploatacji stan ten nie uległ zmianie. Pomimo, że pomiarów dokonywano przy różnym stanie obciążenia rozkład ciśnień nie uległ znaczącym zmianom.

Podczas regulacji silnika 16ASV25/30 na okręcie w jednym z układów cylindrowych stwierdzono fakt obniżonego maksymalnego ciśnienia wewnątrzcylindrowego i wzrost temperatury spalin. Uwzględnienie poprawek wyznaczonych z dopasowania modelu powoduje, że skorygowane ciśnienia początkowe pokrywają się. Równość ciśnień początkowych jednoznacznie wyklucza spadek ciśnienia spowodowany nieprawidłowościami w układzie wymiany ładunku. Możliwymi przyczynami obniżonego ciśnienia sprężania mogły być: utrata szczelności przestrzeni roboczej lub powiększenie komory spalania. Wyznaczone parametry tj. geometryczny stopień sprężania na poziomie 12.93 i zastępcza szczelina 17,7μm jednoznacznie wskazały na brak szczelności. W czasie remontu stwierdzono nieszczelność zaworu wylotowego spowodowaną głębokim wżerem korozyjnym.

5. WNIOSKI

Zastosowanie optymalizacji wartości parametrów wejściowych modelu procesu sprężania nie daje możliwości jednoznacznego wyznaczenia przyczyny powstania nieszczelności przestrzeni roboczych silnika. Jednak diagnostykę tego typu można uznać za diagnostykę szczegółową, gdyż jednoznacznie lokalizuje układ cylindrowy o zmienionym stanie technicznym i spośród wielu przyczyn obniżonego ciśnienia sprężania kwalifikuje jedną z możliwych przyczyn degradacji silnika:

1. utrata szczelności komory spalania,
2. zmiana objętości komory spalania,
3. utrata drożności układu wymiany czynnika roboczego.

Największą dokładność wyznaczenia parametrów związanych ze szczelnością przestrzeni roboczych uzyskano przy minimalnej prędkości obrotowej silnika.

LITERATURA

[1] Cichy M.: *Obliczanie procesów sprężania i rozprężania metodą różnic skończonych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej – Mechanika Nr 73, Gdańsk 1996.

[2] Łutowicz M., Polanowski S., Wontka L.: *Diagnozowanie strat ciśnienia w cylindrach silników tłokowych*. IV Sympozjum Naukowo-Techniczne SILWOJ, Jurata 1999.

[3] Pszczółkowski J., Koliński K.: *Koncepcja modelu napędzania wału korbowego dla celów diagnostyki silnika*. Krajowa konferencja diagnostyka techniczna urządzeń i systemów, Ustroń 2003.

[4] Rychter T., Teodorczyk A.: *Modelowanie matematyczne roboczego cyklu silnika tłokowego*. PWN, Warszawa 1990.

[5] Sobieszczański M.: *Modelowanie procesów zasilania w silnikach spalinowych*. WKŁ, Warszawa 2000.

[6] Wajand J. A. i in: *Mikrokomputerowe obliczenia silnika spalinowego*. WNT, Warszawa 1990.

dr inż. **Marek ŁUTOWICZ**
asystent w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów Akademii Marynarki Wojennej.

Waldemar KUROWSKI
Podstawy diagnostyki systemów technicznych. Metodologia i metodyka.

ITE Radom, 2008

Konstruowanie, wytwarzanie i eksploatacja urządzenia technicznego, wymaga informacji o jego stanie technicznym, własnościach oraz zachodzących w nim procesach i związkach, bez względu na to czy urządzenie już istnieje, czy też jeszcze pozostaje w zamyśle konstruktora. Efektywne pozyskiwanie tych informacji jest zadaniem diagnostyki technicznej.

Rozwój diagnostyki sprawia, że staje się ona dziedziną nauk technicznych. Stwarza to potrzebę dokonywania uogólnień, na poziomie metodologii i metodyki diagnozowania. Uniwersalny sposób postrzegania i obrazowania urządzenia technicznego jako fragmentu natury umożliwia wybór metody badania, traktowanej jako proces pozyskiwania prawdziwych informacji oraz pozwala na sformułowanie wytycznych do jej realizacji, przy uwzględnieniu komputeryzacji i informatyzacji badań.

Tym problemom jest poświęcona książka Waldemara KUROWSKIEGO p.t.: *Podstawy diagnostyki systemów technicznych. Metodologia i metodyka*.

Ponieważ współczesna diagnostyka techniczna opiera się w dużym stopniu na badaniu szeroko rozumianych procesów wibroakustycznych, ten rodzaj diagnostyki został potraktowany w sposób szczególny.

W przedmowie, oraz pierwszym i drugim rozdziale książki, omówiono podstawowe problemy diagnozowania urządzeń technicznych, rolę informacji diagnostycznej oraz metodologiczne podstawy diagnostyki. Ponieważ diagnostyka jest interdyscyplinarną dziedziną nauki ustalono znaczenia pewnych pojęć i terminów, które je oznaczają. Temu służy zbiór definicji podstawowych, zredagowany w postaci leksykonu haseł. Aby zapisać stan, sygnał, a także model urządzenia technicznego postrzeganego jako system oraz sformułować zadanie diagnostyczne, został wykorzystany z język i narzędzia, jakie do dyspozycji badacza stawia logika formalna i teoria mnogości.

Rozdział trzeci prezentuje zasób wiedzy i informacje, potrzebne do wykonania szeregu zabiegów, upraszczających urządzenie do postaci modelu. Wybór metody badań diagnostycznych powinien uwzględniać sposób budowy i funkcjonowania utworzonego modelu oraz zapewniać uzyskanie nowych informacji.

Na podstawie analizy przepływu strumienia masy, energii i informacji, zachodzącego podczas funkcjonowania urządzenia, w rozdziale czwartym, został określony i zapisany, model cybernetyczny urządzenia technicznego, który jest przedmiotem poznania w badaniach diagnostycznych.

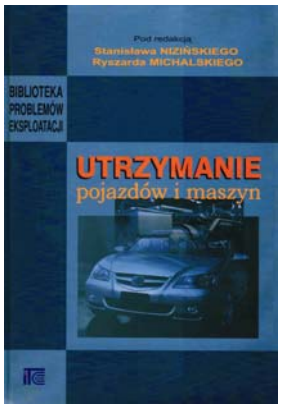
W rozdziale piątym został rozwinięty heurystyczny wątek poznania urządzenia. Zaproponowana ogólna metoda postępowania diagnostycznego prezentuje propozycję szeregu typowych działań, które mogą doprowadzić do uzyskania oczekiwanych informacji o urządzeniu technicznym. Pierwszą pozycją w tym szeregu jest wybór metody badań, a następną – sformułowanie zadania diagnostycznego, które jest treścią rozdziału szóstego.

Rozważania przedstawione w rozdziałach siódmym i ósmym odnoszą się do wibroakustycznej metody badań. Omówiono źródła zaburzeń falowych, które zostają pobudzone podczas funkcjonowania urządzenia technicznego i ujawniają się na zewnątrz urządzenia w postaci procesów wibroakustycznych Wielkości fizyczne zmienne w czasie, charakteryzujące te procesy mogą być wykorzystane jako sygnały diagnostyczne niosące informacje o własnościach i stanie technicznym urządzenia. Te sygnały są pobierane przez odpowiedni układ pomiarowy i przetwarzane do postaci elektrycznej, nadającej się do dalszej obróbki. Rozważania przytoczone w rozdziale dziewiątym dotyczą metod numerycznej obróbki takich sygnałów i stanowią zbiór wytycznych do realizacji badań oraz postawienia diagnozy.

Rozdział dziesiąty stanowi przegląd wybranych metod numerycznej obróbki sygnału. Dyskretna reprezentacja sygnału, uzyskana w rezultacie przetwarzania analogowo-cyfrowego, pozawala obliczać na komputerze nielosowe miary, w postaci estymat wybranych charakterystyk. Prezentują one informacje, zawarte w sygnale, i są podstawą do sformułowania diagnozy. Szczegółowo omówiono dyskretne przekształcenie Fouriera, które jest procedurą najczęściej stosowaną w diagnostyce urządzeń technicznych.

W rozdziale jedenastym omówiono przekształcenia, które są uzupełnieniem transformacji Fouriera, a mianowicie cepstrum i przekształcenie czasowo-częstotliwościowe Wigner-Wille’a. Postęp w komputeryzacji badań powoduje, że dla zdekodowania informacji zawartych w sygnale diagnostycznym, podejmowane są próby wykorzystania estyma, nowych, dotychczas niestosowanych charakterystyk, uzyskanych
z transformacji Hilberta oraz z przekształcenia falkowego.

Książka zawiera szeroką bazę wiedzy z zakresu metodologii i metodyki diagnostyki technicznej, o oryginalnym charakterze, uzupełniającą to, co dotychczas opublikowano.



Redakcja:
S. NIZIŃSKI,
R. MICHLSKI
Utrzymanie pojazdów i maszyn.

ITE Radom, 2007

W związku z rozwojem pojazdów i maszyn wzrasta ich złożoność konstrukcyjna, intensywność funkcjonowania. Co ma istotny wpływ na przebieg ich utrzymania w ruchu.

Do utrzymania pojazdów i maszyn w stanie zdatności funkcjonalnej i sta nie zdatności zadaniowej niezbędne są racjonalnie zorganizowane systemy utrzymania ruchu zwane tez systemami: utrzymania, eksploatacji technicznej lub obsługiwania. Niniejsza praca jest poświęcona procesom i systemom utrzymania pojazdów i maszyn.

W pierwszym rozdziale pracy omówiono pojęcia podstawowe, a w szczególności definicje: systemu, postępowania systemowego, gotowości i stanu systemu, modeli materialnych i teoretycznych, w tym matematycznych. Zdefiniowano pojęcie – utrzymanie obiektów technicznych. Stwierdzono, że następujące pojęcia: obsługiwanie, eksploatacja techniczna, utrzymanie ruchu i utrzymanie obiektów technicznych maja zbliżone znaczenie.

Scharakteryzowano strategie utrzymania pojazdów i maszyn, a w tym: PZN, RCM, RBI, RBM, TPM oraz strategię według stanu. Dokonano analizy ryzyka w procesach utrzymania pojazdów
i maszyn.

W rozdziale drugim opisano miejsce podsystemu utrzymania ruchu pojazdów i maszyn w dowolnym systemie działania. Dokonano klasyfikacji eksploatacji środków produkcji, a także przedstawiono podsystem logistyczny w aspekcie sterowania oraz jego budowę.

Budowę i funkcjonowanie systemu utrzymania ruchu pojazdów i maszyn rozpatrzono w rozdziale trzecim. Omówiono takie zagadnienia jak: klasyfikację rodzajów obsługiwania, harmonogram obsług, rodzaje metod i systemów utrzymania ruchu pojazdów i maszyn, algorytmy sterowania utrzymaniem obiektów w stanie zdatności, elementy systemu, tzn. podsystemy: obsługiwania i napraw bieżących, przechowywania, napraw średnich i głównych, diagnostycznych. Zwrócono uwagę na podsystem ochrony czasowej, terminy oraz technologie diagnozowania i obsługiwania maszyn, wskaźniki efektywności procesu utrzymania ruchu, a także podsystem zarządzania utrzymaniem pojazdów i maszyn. Podano również przykład optymalizacji obsługiwania technicznego sprężarek tłokowych.

Rozdział czwarty poświęcono zarządzaniu utrzymaniem ruchu pojazdów i maszyn za pomocą rachunku kosztów. Ważniejsze zagadnienia to: miejsce rachunkowości i kosztów w systemie działania, definicja kosztów utrzymania ruchu maszyn, modele kosztów utrzymania ruchu obiektów technicznych w różnych przedsiębiorstwach.

W rozdziale piątym przedstawiono informacje ogólne o systemach informatycznych wspomagających utrzymanie maszyn, podając elementy składowe systemu informacyjnego oraz zasady wdrażania tych systemów. Opisano również sześć przykładów systemów informaqcyjnych klasy CMMS (Computerised Maintenance Management System).

W rozdziale szóstym przedstawiono modele strategii utrzymania maszyn i urządzeń najczęściej spotykane w małych i średnich przedsiębiorstwach, tzw. MSP. Zaproponowano również metodę pomiaru efektywności wdrożonych strategii z wykorzystaniem wskaźnika OEE – całkowitej efektywności maszyn.

W rozdziale siódmym przedstawiono system utrzymania pojazdów użytkowanych losowo na przykładzie wojskowych pojazdów mechanicznych, mając na uwadze to, że decydenci różnych systemów działania mogą czerpać wzory rozwiązań i wdrażać je w cywilnych systemach utrzymania ruchu pojazdów i maszyn.

Książka niniejsza ujmuje całościowo zagadnienia utrzymania maszyn w tym strategie zarządzania, systemy informacyjne utrzymania pojazdów i maszyn w aspekcie racjonalnej i efektywnej ich eksploatacji.

Recenzenci publikowanych prac:

prof. dr hab. inż. Wojciech BATKO
prof. dr hab. inż. Lesław BĘDKOWSKI
prof. dr hab. inż. Piotr BIELAWSKI
prof. dr hab. inż. Cezary BOCHEŃSKI
prof. dr hab. inż. Adam CHARCHALIS
dr hab. inż. Tadeusz DĄBROWSKI, prof. WAT
prof. dr hab. inż. Zbigniew DĄBROWSKI
prof. dr hab. inż. Sławczo DENCZEW
prof. dr hab. inż. Jerzy GIRTLER
dr hab. inż. Waldemar KUROWSKI, prof. PW
prof. dr hab. inż. Zdzisław KOWALCZUK
dr hab. inż. Piotr KRZYWORZEKA
prof. dr hab. inż. Ryszard MICHALSKI
prof. dr hab. inż. Wojciech MOCZULSKI
prof. dr hab. inż. Stanisław NIZIŃSKI
dr hab. inż. Marek PAWEŁCZYK, prof. PRad.
dr hab. inż. Andrzej PIĘTAK, prof. UWM
prof. hab. dr inż. Włodzimierz PRZYBYLSKI
prof. dr hab. inż. Jerzy SKUBIS
dr hab. inż. Franciszek TOMASZWSKI, prof. PP
dr hab. inż. Henryk TYLICKI, prof. UTP
prof. dr hab. inż. Bogdan ŻÓŁTOWSKI

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

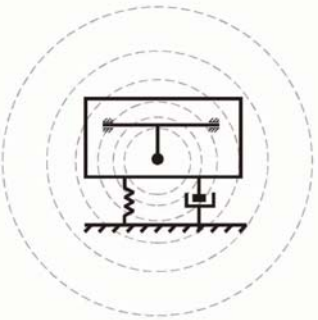
WIBROTECH 2008

XIV KONFERENCJA NAUKOWA
Wibroakustyki i Wibrotechniki
IX OGÓLNOPOLSKIE SEMINARIUM
Wibroakustyka w systemach technicznych

Kraków 20-21.11.2008

Pod patronatem JM Rektora AGH
prof. dr hab. inż. Antoniego Tajdusia

oraz Dziekana Wydziału
Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
prof. dr hab. inż. Janusza Kowala



Konferencja dedykowana jest
prof. dr hab. inż. Zbigniewowi Engelowi
z okazji 75–lecia urodzin
prof. dr hab. inż. Janowi Adamczykowi
z okazji 70–lecia urodzin
prof. dr hab. inż. Jerzemu Michalczykowi
z okazji 60–lecia urodzin

Komunikat 1

www.wibrotech.agh.edu.pl

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.