



Diagnostyka

Diagnostics and Structural Health Monitoring

Rok założenia 1990

ISSN 1641-6414



RADA PROGRAMOWA / PROGRAM COUNCIL

PRZEWODNICZĄCY / CHAIRMAN:

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

REDAKTOR NACZELNY / CHIEF EDITOR:

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

CZŁONKOWIE / MEMBERS:

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

Prof. **Francesco AYMERICH**
University of Cagliari – Italy

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

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

dr inż. **Roman BARCZEWSKI**
Politechnika Poznańska

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

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

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

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

prof. **Li CHENG**
The Hong Kong Polytechnic University – China

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

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

Prof. **Charles FARRAR**
Los Alamos National Laboratory – USA

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

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

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

prof. **Mohamed HADDAR**
National School of Engineers of Sfax – Tunisia

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

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

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

prof. **Graeme MANSON**
University of Sheffield – UK

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

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

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

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

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

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

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

Prof. **Tadeusz STEPINSKI**
Uppsala University - Sweden

Prof. **Wiesław TRĄMPCZYŃSKI**
Politechnika Świętokrzyska

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

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

prof. Keith WORDEN
University of Sheffield – UK

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

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

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

WYDAWCA:

Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej
ul. Narbutta 84
02-524 Warszawa

REDAKTOR NACZELNY:

prof. dr hab. inż. **Ryszard MICHAŁSKI**

SEKRETARZ REDAKCJI:

dr inż. **Sławomir WIERZBICKI**

CZŁONKOWIE KOMITETU REDAKCYJNEGO:

dr inż. **Krzysztof LIGIER**

dr inż. **Paweł MIKOŁAJCZAK**

ADRES REDAKCJI:

Redakcja Diagnostyki
Katedra Budowy, Eksploatacji Pojazdów i Maszyn
UWM w Olsztynie
ul. Oczapowskiego 11, 10-736 Olsztyn, Poland
tel.: 89-523-48-11, fax: 89-523-34-63
www.diagnostyka.net.pl
e-mail: redakcja@diagnostyka.net.pl

KONTO PTDT:

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

NAKLAD: 500 egzemplarzy

Spis treści / Contents

Szymon GONTARZ, Stanisław RADKOWSKI – Politechnika Warszawska	3
Magnetic methods in diagnosis of machines and infrastructural objects – a survey <i>Metody magnetyczne w diagnostyce maszyn i obiektów infrastruktury – przegląd</i>	
Krzysztof MENDROK, Wojciech MAJ, Tadeusz UHL – AGH Kraków	13
Laboratory tests of the SHM system based on modal filtration <i>Badania laboratoryjne układu monitoringu bazującego na filtracji modalnej</i>	
Janusz SEMPRUCH, Dariusz SKIBICKI – Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy	21
Identification and modeling of multiaxial fatigue loading non-proportionality <i>Identyfikacja i modelowanie nieproporcjonalności wieloosiowego obciążenia zmęczeniowego</i>	
Henryk KAŻMIERCZAK, Tadeusz PAWŁOWSKI, Jacek KROMULSKI – Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych w Poznaniu	25
Energetic modes in description of structural degradation of constructional materials <i>Mody energetyczne w opisie degradacji strukturalnej materiałów konstrukcyjnych</i>	
Piotr CZOP – AGH Kraków	31
Demonstration of a grey-box approach towards the diagnostics of a feedwater heater (Part I) – model development <i>Demonstracja podejścia "grey-box" do diagnostyki wymiennika wody zasilającej (Cześć I) - rozwój modelu</i>	
Piotr CZOP – AGH Kraków	39
Demonstration of a grey-box approach towards the diagnostics of a feedwater heater (Part II) – model tuning based on operational data <i>Demonstracja podejścia "grey-box" do diagnostyki podgrzewacza wody zasilającej (Cześć II) - strojenie modelu na podstawie danych operacyjnych</i>	
Paweł SZCZEPAŃSKI	47
Erroneous use of Bayes' theorem in technical diagnostic <i>Błędne użycie wzoru Bayesa w diagnostyce technicznej</i>	
Czesław CEMPEL – Politechnika Poznańska	55
Diagnostyka techniczna – spojrzenie syntetyczne <i>Machine condition monitoring – historic overview</i>	
Wspomnienie prof. dr hab. inż. Lesława Będkowskiego	68
Wspomnienie prof. dr hab. inż. Henryka Madeja	71
Warto przeczytać / Worth to read	73

MAGNETIC METHODS IN DIAGNOSIS OF MACHINES AND INFRASTRUCTURAL OBJECTS – A SURVEY

Szymon GONTARZ, Stanisław RADKOWSKI

Institute of Automotive Engineering, Warsaw University of Technology
ul. Narbutta 84, 02-524 Warsaw, ras@simr.pw.edu.pl

Summary

In contemporary diagnostics non-destructive testing plays increasingly important role in diagnosis of state of technical objects. Thanks to its continuous evolution there emerge new techniques which are based on innovative ideas. Apart from evolution of such state-of-the-art techniques as video-thermography, it is the group of methods based on magnetic phenomena that deserves particular attention.

Against the background of non-destructive diagnostic methods (NDT), the paper presents magnetic methods along with their division into active ones, i.e. the method relying on the Barkhausen effect, and the passive ones, i.e. the magnetic memory method. The physical phenomena on which the above methods rely are presented and discussed. These include: magneto-elasticity, magneto-restriction, magnetic field dispersion caused by structural and mechanical non-homogeneities, Barkhausen's noise, etc.

The paper also presents the concept of development of a passive magnetic method and its use for analysis of technical condition of all types of objects made of magnetic materials. While relying on earlier analyses and the experiment, the paper presents Villary effect and the possibility of using it for acquisition of useful diagnostic information on early stages of development of dangerous conditions and defects.

Key words: internal stress, non-homogeneity of structure, passive/active diagnostic methods, non-destructive diagnostic methods, Villary effect detection.

METODY MAGNETYCZNE W DIAGNOSTYCE MASZYN I OBIEKTÓW INFRASTRUKTURY - PRZEGLĄD

Streszczenie

Nieniszczące badania w diagnozowaniu stanu obiektów technicznych odgrywają coraz większą rolę we współczesnej diagnostyce. Następuje ich ciągły rozwój, dzięki któremu pojawiają się nowe techniki opierające się na nowatorskich pomysłach. Oprócz ewolucji takich nowoczesnych technik jak wideotermografia na szczególną uwagę zasługuje grupa metod opierających się na zjawiskach magnetycznych.

W publikacji, na tle istniejących nieniszczących metod diagnostycznych, zostały przedstawione oraz dokonano podziału metod magnetycznych na aktywne tj. metoda opierająca się na efekcie Barkhausena jak i metody pasywne tj. metoda pamięci magnetycznej. Przedstawiono i omówiono zjawiska fizyczne, na których bazują wymienione metody; są nimi: zjawisko magnetosprężystości i magnetrostrykcji, zjawisko rozproszenia pola magnetycznego wywołane strukturalnymi i mechanicznymi niejednorodnościami, szumy Barkhausena, itp.

Przedstawiono również koncepcję rozwoju pasywnej metody magnetycznej i wykorzystanie jej do analizy stanu technicznego dowolnych obiektów wykonanych z materiałów magnetycznych. Opierając się na przeprowadzonych analizach i eksperymencie, w pracy przedstawiono efekt Villary'ego i możliwość jego zastosowania do pozyskanie użytecznej informacji diagnostycznej o wczesnych fazach rozwoju niebezpiecznych stanów i uszkodzeń.

Słowa kluczowe: naprężenia wewnętrzne, niejednorodność struktury, pasywne/aktywne metody diagnostyczne, diagnostyczne metody nieniszczące, wykrywanie efektu Villary'ego.

1. INTRODUCTION

Non destructive testing in diagnosis state of technical objects plays more and more important role in contemporary diagnostic. Due to following and continuous evolution, new techniques bases on innovative ideas appear. Many materials that could cause real threat of the catastrophe caused by fatigue wear, exceeding stress limits or emerging of plastic deformation have magnetic properties that could affect the local magnetic field. This creates possibility to increase variety of non destructive techniques. Thus recently magnetic methods pay particularly attention. Additionally, having on consideration consequences coming from unforeseen architectonic construction crashes and technical objects break downs, it is necessary to progress of science in direction of technology for early phases of fault development detection.

As far as quite well known and applicable are active magnetic methods for condition monitoring, passive techniques which bases only on the existence of natural magnetic field of Earth becoming very attractive alternative.

In the paper, many non destructive technique (NDT) was mentioned and family of magnetic method was described. In parallel, the classification of those methods was performed. Moreover real world experiment was performed; using steel samples during the tensile test, without additional sources of magnetic field, generating by the magnetoelastic effect, changes in intensity of magnetic local field was registered. Also the experiment with artificial magnetic source was performing to examine the distribution of magnetic field in space. It was aiming to compare and proof the magnetoelastic effect.

Targets of this paper can determine by cognitive aim and also by utilitarian intention. Cognitive target is hire most important; it is a background for the future work and consists in test and description of magneto elastic effects, which could be useful in nondestructive magnetic method for level stress assessment of steel objects in industry. Bases on these informations, idea of new passive magnetic method for non-destructive methods of diagnostics was presented.

2. NON DESTRUCTIVE TECHNIQUES - SURVEY

2.1. Non-magnetic diagnostics methods

While referring to the current state of knowledge it is worth stressing that in the case of steel structures, concrete structures as well as machines, attention is now mainly focused on detecting faults and defects in the earliest stage of their development. The methods currently used for this purpose include: the acoustic emission method, dynamic methods (change of an object's dynamic

response), x-ray methods, ultrasonic methods, thermal emission, extensometer method as well as the penetration method and the method of defectoscopy of gas leakage. In order to identify the strengths and the weaknesses of the currently used methods, one should look at several of their representatives.

2.1.1. Acoustic Emission

Acoustic Emission (AE) is a technique which involves registration of elastic waves which occur in materials due to release of energy by intermolecular bonds. Generation and propagation of flexible waves results from deformations, cracks and phase changes inside materials. The place of their initiation corresponds to the point in which the original structural bonds of a material are broken as a result of the load affecting a given structure. The frequency of an acoustic wave which emerges in a structure is within the ultrasonic range, which is from 20 kHz to 1 MHz. This method enables identification of location of the source of signal [1]. AE is a popular non-destructive technique and it enables tracking the development of intra-structural defects during use/operation of an object. The method is widely used in detection and location of defects in pressure tanks, pipelines and in detection of corrosion centers [2,3]. The drawback of the method is the difficulty in determining the extent of the defect and the remaining life of an object. Use of other NDE methods is recommended [4], such as radar surveys, visual checks, x-raying, in order to revise the findings. A separate issue is the ability to understand the acoustic emission signals due to the low power of registered diagnostic signals. Acoustic emission is a passive research method, since detection of an emerging defect is possible only when it is a source of a flexible wave. If, in given conditions of structure load, no deformations or phase shifts occur, then is impossible to detect a defect.

2.1.2. Dynamic methods

A new approach is being developed now for evaluation of the condition of structural elements, both the ones made of steel and pre-stressed concrete. It relies on changes of dynamic characteristics of entire structural elements under the influence of changes in the stress structure [5]. In to-date practice the dynamic response of a structure is used in non-destructive testing for the purpose of detection, location and defining of the degree of defect development. While defining a structural defect as a kind of deviation of geometrical and material-related properties, one can expect changes in the system's dynamic response to a pre-defined load. Use of such diagnostic information is important for two reasons. First, locating a defect and estimating its extent constitutes the basis for more detailed evaluation of the defect's importance.

In spite of numerous tests and the fact of obtaining many interesting results [6], still numerous issues which are associated with use of defect detection methods relying on vibroacoustic signals remain unsolved. These above all include the possibility of location and optimization of defects in the structures in which only several functions of proper (own) vibration are available as well as in systems characterized by complex dynamic structure; in a situation when we do not have the model vibroacoustic signal for the non-defective system or in conditions of high uncertainty as regards modeling, measurement and analysis of the obtained signal. These difficulties increase as attempts of defect identification are made in early phases of their development.

2.1.3. Ultrasonic method

Ultrasonic method is a non-destructive method during which the times elapsing between sending of an impulse and the first echo reflected from a non-continuity in a material and the echo reflected from the other side of the material are measured and compared [7]. The method has been developed extensively, with norms having been worked out which define the conditions for the method's application. Unfortunately no 100% certainty exists that the area of survey has been defined correctly. That is why it is best to supplement the method with a magnetic survey which can precisely locate the faults or the threats which emerge in the places where the object's faults exist. Combined use of the magnetic survey and the ultrasonic method enable most certain (the best and the most precise) decision as regards permitting an object for further safe operation.

2.1.4. Penetration method, thermal emission and flaw detection of gas leakage are further methods which should be presented from the point of view of their application for diagnosis of various technical objects.

The penetration method relies on the phenomenon of penetration of open surface cracks by liquids. It detects open surface discontinuities with widths starting from 10^{-6} m, e.g. fatigue-related cracks, grinding cracks, porosity, foliation, pinholes, cracks which emerged following forging or rolling, etc [8]. Only the surfaces of the objects are examined and in addition the faults detected with the use of this method are in many cases too developed to avoid a threat related to further operation of an object.

The thermal emission method relies on the thermo-elastic effect, that is a relation between stress and infrared radiation emission [9]. The temperature changes locally in a material, in the places where stress occurs due to the applied load. This method is used for measuring dynamic stress. However the method cannot be used to determine

the directions of stress as well as internal stress, which substantially reduces its utility value.

Flaw detection of gas leakage is a non-destructive technique which, thanks to showing the movement of gas particles within the area of operation of the measuring probe, is able to locate the undesirable leakage in devices, joints, etc. The method is widely used in numerous industries, e.g. gas distribution, power engineering, aviation, petroleum industry, etc. It is a method for immediate and local use, a method which detects faults in their developed stage, which is a drawback when confronted with the present requirements set for state-of-the-art diagnostic methods.

2.2. Active magnetic diagnostics methods

As it turns out, the materials for which there exists a real threat of occurrence of a failure caused by material fatigue, exceeding of permitted stress or emergence of plastic deformations have magnetic properties, which enabled development of a group of magnetic methods in technical diagnosis. At present the group is already quite big and widely applied. The main methods representing this family of methods include: magnetic noise method (the Barkhausen method), eddy current method, powder technique and magnetic flux leakage method. While defining more precisely the classification of the above mentioned diagnostic methods, one should state that they include active magnetic techniques [10]. The specific nature of this group is the fact that magnetic field is applied to the material and variations in field parameters such as permeability, hysteresis and magnetic Barkhausen emission are used to draw inferences about the material stresses. Active magnetic techniques usually use high strength, low frequency fields to drive the material into saturation so as to offer fairly good penetration.

2.2.1. Barkhausen method

This method is used for dynamic tests of features of a magnetic structure which is associated with the state of a material [11]. It also enables determination of the distribution of own stress of the outer layer depending on depth. The limitation of this method is the difficulty associated with the analysis of information concerning the type of the examined stress which is contained in the registered signal. The Barkhausen effect signal is an electromagnetic signal with a wide range of frequency and characteristics similar to noise. Thus its analysis is complex while the results of the analysis are uncertain.

2.2.2. The magnetic flux leakage measurement method (MFL) [12] works as follows. The examined tendon is magnetized by exciting a magnetic field $H_0(p, x-x_0)$, which is normally generated by a movable yoke-magnet. $x_0(t)$ denotes the actual position of the yoke-magnet; p describes the amount of the exciting field, which depends on

time (i.e. on the step in the scheme of magnetization of components). The exciting field generates magnetization $M(x, x_0)$ in the ferromagnetic components of the reinforcement. Local disturbances of magnetization, due to ruptures or reduction of cross-section, result in typical magnetic leakage signals. The magnetic flux leakage measurements can be performed during magnetization (active field measurement) or as residual field measurement after a special sequence of magnetization of a member.

2.2.3. Electromagnetic methods, magnetic powder technique and eddy-current methods are further active magnetic methods which find use in modern diagnosis.

The common characteristic of a wide range of electromagnetic methods is the use of effect of induction [13], under the influence of outer electromagnetic field or variable electric currents. The currents cause emergence of secondary magnetic field. Measurement of the primary (outer) and the secondary magnetic field enables one to infer about an object's properties.

Magnetic powder technique [14] is a nondestructive technique which is realized in order to find discontinuity on the surface and also close under the surface of ferromagnetic materials. It is a very fast and reliable technique of discovering and locating, e.g. cracks in a surface. Magnetic flux passes through the material. Magnetic leakage occurs in the place of discontinuity, which attracts molecules of metal from the alluvial powder.

Eddy-current method [15] is a nondestructive investigation method which relies on measurement of change of induction current in ferromagnetic materials, which depends on the amount and the size of material discontinuity in the zone which is subjected to a probe. This method allows finding the defects on the material's surface and under its surface, up to the depth of about 0.6 - 1.0 mm.

As can be seen from the descriptions, no single, comprehensive method exists which would enable clear-cut assessment of technical condition of the examined object. The methods which are dominant on the market are usually restricted to detection of local defects, such as cracks, material non-homogeneity or plastic deformations, and they call for interaction with their user. In addition, while taking into account the task of control and measurement of stress and deformation in devices or structures, the following shortcomings are discovered:

- the methods cannot be applied to plastic deformations;
- they are local, useless in the case of extensive structures;
- they do not allow assessment of the changes in the material's structure;
- they require samples to be prepared up-front;

- they require that surfaces be prepared for tests;
- the above magnetic methods require artificial magnetization of the examined element;
- it is difficult to define the areas of stress concentration.

Moreover, it is worth noting the differences that directly result from comparing the distinguished magnetic methods and the remaining NDT methods:

- the magnetic method is a technique of diagnosis of fatigue-related defects in the phase of their emergence and development;
- during the magnetic test, apart from early fault detection we also obtain information on the actual status of stress and deformation of a material as well as on the reasons of propagation of defects.

The above listed differences are undoubtedly new and very useful features which cannot be achieved by other diagnostic methods. Magnetic tests can prove to be the basic diagnostic technique applied for locating changes in objects, in the structure of materials but unfortunately only in the materials with magnetic properties. In spite of this drawback, in parallel with development of active diagnostic methods we also see the development of a group of passive diagnostic methods which has all the advantages of active methods but at the same time does not require use of artificial sources of magnetic field, which is connected with use of complex and costly apparatus.

3. PASSIVE METHOD DESCRIPTION – CORESPONDINGS EFFECTS

The existence of the Earth's magnetic field is the basis for using passive magnetic methods. The Earth can be considered to be a homogeneously magnetized globe, having magnetic axis with south pole in the northern geographic hemisphere and magnetic north pole in the southern hemisphere. It is obvious that, every "physical substance" staying within the magnetosphere will have influence on the local magnetic area of earth, but the influence will vary, depending on the material of which a specific object is made. Taking into consideration the materials which are of interest to us, one must say that different types of steel can be both magnetic and non-magnetic (magnetic metals: cobalt alloy, iron, nickel alloy, steel (except stainless steel); non-magnetic metals: aluminum, brass, copper, gold, silver, titan, stainless steel).

When the stress changes in materials with magnetic properties, then transformation of a material to magnetic state proceeds – it can be found in magnetic memory metal (MMM) or in residual magnetic field (RMF). In general one could certify the existence of a relation between stress and degree of magnetization, but it is a complex task because additionally it depends on the type of magnetization, history of magnetization, strain and

temperature. These properties have been used to create passive diagnostics methods.

3.1. Magneto acoustic method

One of the popular techniques is magneto-acoustic emission for state diagnosis of microstructure of exploited ferromagnetic steels. It commonly use with external source of magnetic field but it is also consider as a passive magnetic method [16, 17]. As it turns out, Barkhausen phenomenon is accompanied by emission of an acoustic wave, which is termed as the magneto acoustic effect. The acoustic wave is much less susceptible to damping then the Barkhausen effect's signal. This can be exploited to obtain information on the status of stress deep inside the magnetized area. A serious drawback is lack of monotony of dependence of intensity of acoustic emission on stress, which restricts the research related to exploiting this phenomenon. So far the results show that for ferritic-pearlite and pearlite-bainite steels the method which relies on the magneto acoustic effect is characterized by very good properties from the point of view of non-destructive investigation techniques. The valuable property of this method is the intensity of magneto acoustic emission, which becomes monotonic for these steels and the strongly diminishing function of degradation grade, present already at the very early stage of the degradation process (before the defects of microstructure appear). In the case of magneto acoustic method, it is the effect whose intensity is the sum of the emission occurring in the whole magnetization area. Such properties of both effects result from considerable damping of electromagnetic waves in the metal and from the relatively insignificant (as compared to electromagnetic waves) damping of acoustic waves. Such a conclusion demonstrates that magneto acoustic method is particularly useful for nondestructive testing of 'heavy-walled' elements.

3.2. Magnetic memory method

Another interesting passive magnetic method for non destructive techniques was developed in Russia. It is a diagnostics method for products and machines which is based on magnetic memory effect in metal. The conditions of forming of magnetic residue in metal were specified, while reflecting structure of memory and condition of intensities and strains of object. This technology was given the name of Magnetic Memory Metal (MPM) [18] and it is based on the physical phenomenon of magnetic-elasticity, magnetostriction and their relation to creating and locating the limit of magnetic domains on wall of dislocation in concentration zones of intensity and on phenomenon of magnetic dissipation which causes by structural and mechanical heterogeneities in condition of natural magnetization made by the load.

Magnetic parameters which are useful in MPM testing:

- normal component of intensity dissipation of magnetic field - H_{py} ;
- gradient of magnetic field (dH_p/dx) for distance x .

Based on the above parameters, it is possible to define concentration zones, in which forming incipient developing faults, damages of structure in concentrations zones and heterogeneity of metal. During tests with MPM, natural magnetization in the Earth's magnetic field is used. The probes placed on the surface of the tested element register a component which is perpendicular to the surface of intensity magnetic field H_{py} . The analysis of the results obtained from the measurement concerns the qualitative change – change of sign, and quantity change - change of H_{py} value. Based on this research, the assessment of intensity and strains as well as on discovering the concentration zones' intensities is possible.

A quantitative parameter has been elaborated for measuring the concentration of stress. In MPM it is called the magnetic intensity factor of stress and it is determined as a gradient of vertical component of dissipation magnetic field on a fixed path, close to the perpendicular line crossing the stress concentration line.

$$K_{in} = \frac{|\Delta H_p|}{2 \cdot l_\sigma} \quad (1)$$

K_{in} - stress intensity factor

H_p – vertical component of eigenmagnetic

field

l_σ –fixed path near the perpendicular line crossing the line of stress concentration.

Summing up, the method of magnetic memory enables estimation of condition of stress and strains while taking into consideration the heterogeneity of the structure, both in terms of elasticity as well in terms of plastic strains. The method does not offer specific information about level of fault, but it allows distinction between the strains elasticity zone and plastic strains zone. If a crack already exists, method will allow determining the extent and the direction of the crack's development.

In general the group of passive magnetic methods is considered to be very promising and modern techniques of the 21st century. Compared to active methods, these methods have many advantages as they do not need any artificial source of magnetic field and thus they can be used not only for diagnostic tests but also continuously, for example in condition monitoring. This feature also allows their use in places where artificial sources of magnetic field could be dangerous. The passive methods do not require any preparations of the object and they can be used even in places to which access is difficult. For this and for other reasons it is worth developing this branch of diagnostic methods.

4. CONCEPTION OF NEW PASSIVE MAGNETIC METHOD

In general each magnetic method consists of exploiting the diversity of magnetic properties of the elements of a physical medium in the earth's or artificial magnetic field. When the quality (the method) of influence of the magnetic field and the effects of such influence on the examined object are taken into account, then the magnetic method of analysis of technical objects can be proposed. The aim of this method is to detect dangerous conditions of stress and deformation. The proposal seems to be correct when the evolution of magnetic methods is taken into account, and it seems indispensable in diagnosis of such objects since, as the statistics demonstrate, the known methods and techniques of technical condition analysis are insufficient to ensure full safety of use.

The proposal concerns use of the magnetic method for the purpose of detection of early phases of development of dangerous technical conditions as well as for defining the boundary conditions which can lead to a catastrophe or failure. The benefits of applying such a method can be invaluable.

Every "physical body" located within the magnetosphere has influence on the Earth's magnetic field in accordance with relevant mechanisms which are known in physics. The outcome of these changes is but one, that is these bodies (objects) can increase – in a varied degree – the density of the lines of magnetic field's power (they can increase the intensity of the field) or they can deflect the lines of the field's power away from the sample (they can decrease the intensity of the field). Analysis of magnetic phenomena in various publications has led us to the conclusion that an object's own magnetic field:

$$H = -\nabla(w) \quad (2)$$

where 'w' denotes the magnetic potential, is the function of the gradient of magnetization M:

$$w = w(\text{div } M). \quad (3)$$

Own magnetic field of object H, e.g. measured by a magnetometer, depends thus on the object's magnetization and distribution of this quantity in space. In addition, while bearing in mind the magneto-mechanical phenomena, it turns out that if the stress is changed in materials having magnetic properties, then the material is transformed into magnetic state. This phenomenon is described by the Villari effect, also called the magneto-elastic effect which is a reverse phenomenon to magnetostriction. It involves change of intensity of the magnetic field (or of magnetization) under the influence of mechanical forces applied to a material, with the forces introducing stress to the material, and it includes transformation of the mechanical energy associated with deformation of the material into magnetic energy. In general one

can conclude that there exists a quantitative change which describes relation between stress and degree of magnetization, and additionally there exists a qualitative change of magnetic permeability which is associated with the fact of reaching the condition of plastic deformations. This offers the possibility of obtaining new, extremely valuable diagnostic information on the degree of effort of the structure. The relationship we are interested in looks as follows: $M=M(\text{stress, plastic deformation})$. Assuming that the only magnetic field which will influence the object will be the Earth's magnetic field, then it can be clearly seen that the factor shaping the object's magnetization is the object's magnetic permeability μ , which for a given material is not constant and which depends on the above mentioned magneto-mechanical phenomenon.

An experiment was conducted: while using the samples made of steel designed according to our own needs, and then subjected to stretching without any additional sources of magnetic fields, we registered the changes in the intensity of the local magnetic field which were generated by the so-called Villari effect. The changes of the magnetic field were collected by a three axial fluxgate magnetometer. First configuration was investigating four different distances (25, 50, 100, 150 [mm]) (Fig. 1) from one sensor (the second one was stable) in a function of magnetization. During the test the load was changing from 0 to about 50% of force for R_e .

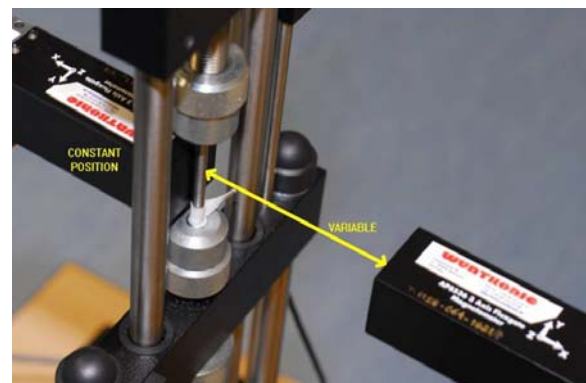


Fig. 1. Magnetometers configuration strategy

Based on the results (Fig. 2), it is easy to observe the change of magnetic field intensity which varies along with the change of the distance between the sensor and a specimen. It is important that the range of the change varies depending on measurement direction. So, the measurements performed by the three-axial fluxgate magnetometer allow exhibition of own magnetic field component (vertical direction) which is least sensitive to disturbances (magnetic field of environment) that are present in the real world and allows determine this direction as the most informative for stress assessment [19]. It is worth noting that in spite of the small size of the sample (sample diameter – 6mm), it was possible to observe the change of the magnetic field

as caused by Villary effect, even from the distance of up to 100mm.

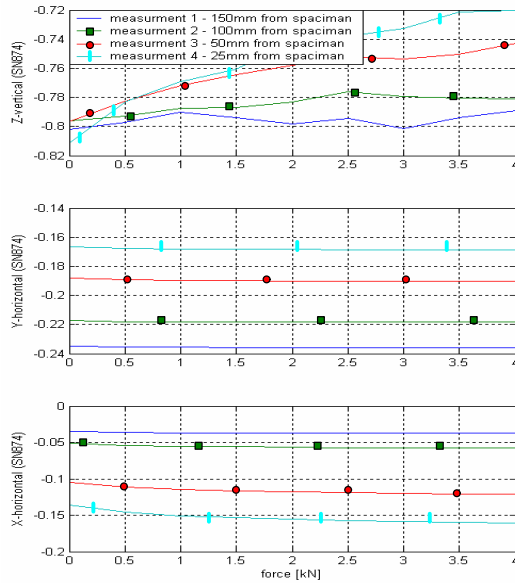


Fig. 2. Change of magnetization (in Gauss) in a function of force with different measurement distance

During the next stage of the test, the real specimen was replaced by the artificial source of magnetic field – an electromagnetic yoke. This enabled discovering the distribution of magnetic field's source in space. The intensity of the magnetic field was decreasing exponentially, which is presented in Figure 3.

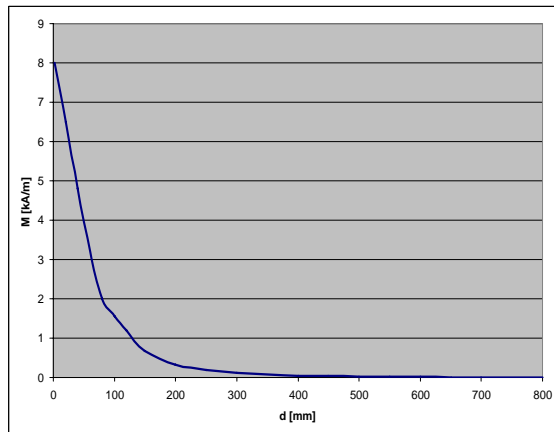


Fig. 3. Distribution of magnetic field along the horizontal direction from the specimen

The conducted research has demonstrated the existence of magnetoelastic phenomena for the designed samples. We have proven that the qualitative change of the magnetic field occurs in a situation when a sample subjected to stretching interacts with the surrounding magnetic field, and such a change is similar to the change of the field in a situation when the electromagnetic yoke is the source.

The tests have demonstrated that without using any additional external source of magnetic field it is possible to describe the state of prevailing mechanical stress, with varied correlation between the values of the magnetic field's components and the intensity of the generated magnetic field which depends on the direction of measurement.

The issues which have been analyzed here give hope that the method of passive magnetic diagnosis, which relies on quantitative and qualitative change of own magnetic field of an object, can offer a new possibility of detecting the early phases of hazardous conditions in technical objects. Few steps were made to get closer this opportunity [20, 21].

5. CONCLUSIONS

Further work related to development of the magnetic technique, which allows early fault condition detection in technical objects made of ferromagnetic materials, should be carried on. Exploiting the fact that without the use of additional external sources of magnetic field there exists a possibility of presenting the estimates of mechanical stress condition, with the correlation between the intensity of the changes which generate magnetic field depending on measurement direction, creates a possibility for rise of a new universal and efficient diagnostic method. The paper points out that innovative passive magnetic technique, which rely on quality and quantity changes of magnetic field, can bring good results to diagnosis of complex technical objects.

By controlling the plastic and the elastic range of specimen deformation, we have proven the existence of a relation between stress and magnetization degree, which is strictly connected with deformation and degree of effort. In our test three perpendicular directions were used, which clearly shows that changes of magnetization arising from the mechanical stress differ depending on the measurement direction. Additionally, the distribution of the eigenmagnetic field generated by a tensioned steel object offers hope for a possibility of remote stress assessment but the measurement settings should be properly chosen. In such a situation the properties of the technical object, for example the material, shape, structure and dimensions should be taken into consideration.

The paper was prepared on the basis of researches conducted within a project „Monitoring of Technical State of Construction and Evaluation of its Lifespan” (MONIT). Project is co-financed by the European Regional Development Fund in the Operational Programme Innovative Economy (PO IG 1.2)

BIBLIOGRAPHY

- [1]. Huang M., Jiang L., Liaw P., Brooks C., Seeley R., Klarstrom D., Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research, JOM (vol. 50, no. 11) Nov. 1998
- [2]. Sharkey A., Chandroth G., Sharkey N., Acoustic Emission, Cylinder Pressure and Vibration: A Multisensor Approach to Robust Fault Diagnosis, Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks, 2000. IJCNN 2000, pp:223 - 228 vol.6
- [3]. Proverbio E., Acoustic emission for detecting corrosion of rebar and prestressing steel in prestressed concrete structures, 2nd Workshop of COST on NTD Assessment and New Systems in Prestressed Concrete Structures, Kielce 2005, pp: 63-74
- [4]. NDT Database & e-Journal of Nondestructive Testing: <http://www.ndt.net>
- [5]. Radkowski S., Szczurowski K., „Badanie wpływu stanu naprężeń na proces propagacji fali naprężeniowej w strukturach sprężonych. „Diagnostyka” vol. 31; 2004 str. 89-94.
- [6]. Radkowski S., Szczurowski K.: (2005 B) Wykorzystanie demodulacji sygnału wibroakustycznego w diagnozowaniu stanu struktur sprężonych. Diagnostyka Vol. 36. str.25-32.
- [7]. M.O. Si-Chaib, H. Djelouah, T. Boutkedjirt, Propagation of ultrasonic waves in materials under bending forces, NDT & E Int. 38 (2005) 283–289.
- [8]. A quality control method for shotcrete strength by pneumatic pin penetration test. Iwaki, K. / Hirama, A. / Mitani, K. / Kaise, S. / Nakagawa, K. , NDT and E International, 34 (6), p.395-402, Sep 2001
- [9]. Comparison between thermographic techniques for frescoes NDT Carlomagno, G.M. / Meola, C. , NDT and E International, 35 (8), p.559-565, Dec 2002
- [10]. R. L. Hu, A.K. Soh, G. P. Zheng, Y. Ni, Micromagnetic modeling studies on the effects of stress on magnetization reversal and dynamic hysteresis, J. Magn. Magn. Mater. (2005).
- [11]. Józef Błachnio, Efekt Barkhausena w diagnostyce elementów maszyn, Biblioteka problemów eksploatacji, Warszawa 2009
- [12]. Sawade G., Krause H.J., Inspection of Prestressed Concrete Members Using the Magnetic Leakage Flux Measurement Method-Estimation of Detection Limit, Advances in Construction Materials 2007, part VII, pages 639-649.
- [13]. Oka M., Yakushiji T., Tsuchida Y., Enokizono M., Non-destructive Evaluation of Fatigue Damage in the Stainless Steel by Using Electromagnetic Method, E-Journal of Advanced Maintenance Vol.1(2009) 77-82, Japan Society of Maintenance
- [14]. H A. I. Pashagin¹ and N. P. Benklevskaya, Magnetic-powder testing of components using magnetic indicator packages, Russian Journal of Nondestructive Testing, Volume 36, Number 9 / September, 2000, 640-646
- [15]. G. Y. Tian, S. Rangarajan, A. Sophian, Stress Measurement using novel eddy current probe, in: Proceedings of the BINDT Annual Conference, Torquay, UK, 2004.
- [16]. D. H. L. Nga, J. P. Jakubovicsa, C. B. Scrubya and G.A.D. Briggs, Effect of stress on magneto-acoustic emission from mild steel and nickel, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volumes 104-107, Part 1, 2 February 1992, Pages 355-356
- [17]. M. Lindgren, and T. Lepistö, Relation between residual stress and Barkhausen noise in a duplex steel, NDT & E International, Volume 36, Issue 5, 1 July 2003, Pages 279-288
- [18]. A. Dubov, Principal features of metal magnetic memory method and inspection tools as compared to known magnetic ndt methods, in: Proceedings of the 16th Annual World Conference on Non-Destructive Testing, Montreal, Canada, 30 August–3 September, 2004.
- [19]. Szymon Gontarz, Stanisław Radkowski: Use of passive magnetic method for condition monitoring. Proceedings of the 3rd World Congress on Engineering Asset Management and Intelligent Maintenance Systems Conference (WCEAM-IMS 2008), 27-30 October, 2008, Beijing, China, str. 543-552 (CD-ROM).
- [20]. Szymon Gontarz, Stanisław Radkowski, Jin-Sheng DU: Use of passive magnetic method for stress assessment, Proceedings of ICRMS2009: International Conference on Reliability Maintainability and Safety Chengdu, China July 21-25, 2009.
- [21]. Szymon Gontarz, Stanisław Radkowski: Impact of different factors on relationship between stress and eigenmagnetic field in steel specimen. NDT & E International – submitted for publication - October 2009.



Szymon Gontarz, M.Sc., a Ph.D. student in SiMR Department of Warsaw University of Technology.

In his scientific work he deals with vibroacoustic analysis, security of technical systems, signal processing and non destructive techniques for technical diagnosis.



Prof. Stanisław Radkowski, a professor in Institute of Institute Automotive Engineering of Warsaw University of Technology, manager of Laboratory of Automotive Mechatronics System. In his scientific work he deals with vibroacoustic diagnosis and technical risk analysis.

LABORATORY TESTS OF THE SHM SYSTEM BASED ON MODAL FILTRATION

Krzysztof MENDROK, Wojciech MAJ, Tadeusz UHL

AGH University of Science and Technology, Department of Robotics and Mechatronics,
al. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland, e-mail: mendrok@agh.edu.pl

Summary

A modal filter is an excellent indicator of damage detection, with such advantages as low computational effort due to data reduction, ease of automation and low sensitivity to environmental changes [4, 5]. The damage detection method has been already described and tested numerically by the authors [7]. To apply it in a real SHM system, the measuring diagnostic unit has been designed and built. The paper briefly describes the SHM system assumptions and presents results of its laboratory testing. The test program included series of measurements on undamaged object in different ambient temperatures and with new sensor positioning. The main part of measurements, however was focused on analyses of different damage scenarios. Additionally selected cases were recorded parallel by the commercial measuring system for comparison.

Keywords: modal filter, damage detection, laboratory testing

BADANIA LABORATORYJNE UKŁADU MONITORINGU BAZUJĄCEGO NA FILTRACJI MODALNEJ

Streszczenie

Filtr modalny jest bardzo dobrym wskaźnikiem wykrywającym uszkodzenie, posiadającym takie zalety jak niewielkie wymagania obliczeniowe, łatwość automatyzacji procedury i niska wrażliwość na zmiany warunków zewnętrznych [4,5]. Metoda ta była już uprzednio opisywana i testowana symulacyjnie przez autorów [7]. Aby zastosować go w rzeczywistym układzie monitoringu, zaprojektowano i zbudowano urządzenie diagnostyczno pomiarowe. W artykule krótko opisano założenia konstrukcyjne systemu, a następnie pokazano wyniki jego badań laboratoryjnych. Program testów obejmował serię pomiarów na obiekcie bez uszkodzenia ze zmienną temperaturą otoczenia i przy powtarzającym rozkładaniu czujników. Główna część pomiarów dotyczyła różnych scenariuszy uszkodzenia. Dodatkowo dla celów porównawczych niektóre badania były rejestrowane równoległe przez komercyjny system pomiarowy

Słowa kluczowe: filtr modalny, wykrywanie uszkodzeń, badania laboratoryjne

1. INTRODUCTION

The vibration based methods are one of the widest described damage detection methods [1]. One of the techniques from this group is an application of modal filtration to the object characteristics. A modal filter is a tool used to extract the modal coordinates of each individual mode from a system's output [2, 3]. It decomposes the system's responses into modal coordinates, and thus, on the output of the filter, the frequency response with only one peak, corresponding to the natural frequency to which the filter was tuned, can be obtained. Very interesting way of using modal filtering to structural health monitoring was presented by Deraemaeker and Preumont in 2006 [4] Frequency response function of an object filtered with a modal filter has only one peak corresponding to the natural frequency to which the filter is tuned. When a local change occurs in the object – in stiffness or in mass (this mainly happens when damage in the object

arises), the filter stops working and on the output characteristic other peaks start to appear, corresponding to other, not perfectly filtered natural frequencies. On the other hand, global change of entire stiffness or mass matrix (due to changes in ambient temperature or humidity) does not corrupt the filter and the filtered characteristic has still one peak but slightly moved in the frequency domain. The method apart from the earlier mentioned advantages, which results from its low sensitivity to environmental conditions has very low computational cost, and can operate in autonomous regime. Only the final data interpretation could be left to the personnel. This interpretation is anyhow not difficult and it does not require much experience. Another advantage of the method results from the fact that it can operate on the output only data.

Method described above was in 2008 extended to damage localization by K. Mendrok [5]. The idea for extension of the method by adding damage localization, bases on the fact, that damage, in most

of the cases, disturbs the mode shapes only locally. That is why many methods of damage localization use mode shapes as an input data. It is then possible to divide an object into areas measured with use of several sensors and build separate modal filters for data coming from these sensors only. In areas without damage, the shape of modes does not change and modal filter keeps working – no additional peaks on the filter output. When group of sensors placed near the damage is considered, mode shape is disturb locally due to damage and modal filter does not filters perfectly characteristics measured by these sensors.

Because the method looks promising it can be applied in a real SHM system, however it first needs to be extensively tested both on numerically generated data and next on the laboratory test stand. The simulation verification was already performed and its results are described in [7]. General conclusions from these analyses can be summarized as follows. The following cases has been considered: verification of the method sensitivity to damage location, inaccuracy of sensor location in the consecutive experiments, measurement noise and changes in ambient conditions, such as temperature and humidity. Additionally the applicability of the method was examined for very complex structure – rail viaduct with elements made of steel, concrete, wood and soil. After these numerical tests it can be stated that the method detects damage with good sensitivity but users have to be aware that there is a significant impact of the accuracy of the sensor location in the subsequent measurements on the results of modal filtration. Also the temperature has some impact on the results, however it is lower than in other vibration based methods. In this paper authors describe the results of the second stage of method testing – the laboratory measurements results.

2. GENERAL ASSUMPTIONS OF THE MONITORING SYSTEM

As it was showed in the previous section the modal filtration can be a great tool for damage detection and further for structural health monitoring. For this reason the authors decided to implement as a practical measuring – diagnostic system. Its main assumption was that it should be completely independent. It means that the potential user should be able to perform full diagnostic procedure without necessity of usage of any additional measuring device or software. To fulfill above requirement the original 16-teen channel measuring – diagnostic unit MDU was design and the dedicated modal analysis and modal filtration software was written. Generally the system composed of both hardware and software is supposed to work in one of the three modes:

I. Operation in dynamic signal analyzer mode for the purposes of the modal testing. In this mode

the modal filter coefficients are estimated for the reference structure.

II. Operation in diagnostic mode:

- Acceleration / displacement of vibration measurements,
- Selected characteristics estimation (FRFs PSDs),
- Modal filtration of the above characteristics,
- Damage index calculation,
- Visualization of the filtered characteristics,

III. Operation in monitoring mode:

- Periodical acceleration / displacement of vibration measurements,
- Selected characteristics estimation (FRFs PSDs),
- Modal filtration of the above characteristics,
- Damage index calculation,
- Reporting of the object to the central unit.

3. MEASURING DIAGNOSTIC UNIT

From technical point of view the diagnosis process is divided into a few basic steps:

- simultaneous synchronous acquisition of analog signal (converted into digital domain) from 16 channels.
- digital signal processing applied to measured signal
- output processing results

The block diagram of MDU is described in Figure 1.

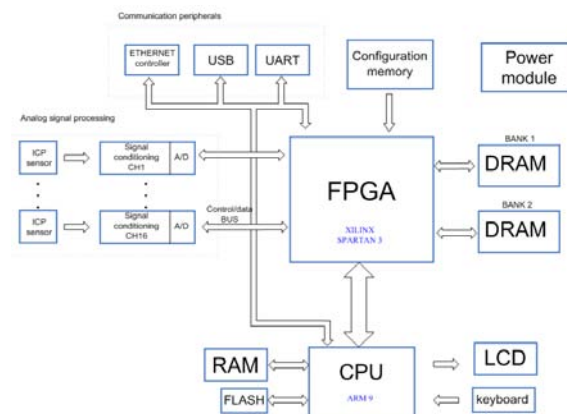


Fig. 1. Block diagram of design device

Diagnostic device contains of two fully independent and connected with each other modules: CPU and FPGA modules. The CPU module is included for control purposes – it implements user interface using some peripheral devices like keyboard, LCD display and communication peripherals. Using this interface it is possible i.e. to set gain or select required analog filter in each of 16 analog signal processing modules, or to start diagnostic process.

The FPGA module contains all logic modules needed for implementation of required digital signal processing. It is “seen” by CPU module as another peripheral device which can execute commands (like

start data processing command) and send processing results.

The MDU can be accessed via Ethernet or USB, which is needed in system calibration phase, or to read remotely processed results.

Analog signal processing module is shown in Figure 2.

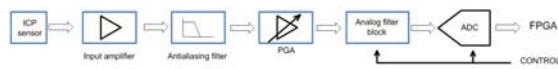


Fig. 2. Analog part of the circuit measuring

The input analog signal is delivered from ICP accelerometer sensors mounted on examined object. ICP signal standard is based on 4-20 mA current signal transmission standard, which main advantage is the ability of transmitting signal (with 1 kHz frequency band wide) without any distortion at ranges of 100 m and more.

4. DEDICATED SOFTWARE

The main goal of the software written for the described SHM system is the estimation of the modal filter coefficients. For this purpose, the application provides the following functionalities:

- Geometrical model definition of the tested object.
- Measurement points definition, namely the assignment of specific points of a geometric model to the sensors placed on an object.
- Execution of measurement and presentation of the results (time histories, PSD, FRF and coherence), and data archiving.
- Execution of modal analysis by:
 - calculation of stabilization diagram,
 - estimation and visualization of mode shapes for selected poles,
 - estimation of modal filter coefficients and visualization of filtration results.

The application was created in the .Net Framework 3.5 environment with use of additional external libraries:

- Developer Express v9.1 (tables and standard application controls)
- Steema TeeChart for .Net v3 (charts)
- Intel IPP (signal spectrum calculation)

All calculations related to the modal analysis are performed by the Matlab engine. The application provides the ability to debug these functions from Matlab level. For this reason, at the user-specified location, mat-files are stored that contain input parameters for the appropriate Matlab functions.

In Figure 3 the graphical user interface of described software allowing for impulse modal testing and mode shape visualization control is presented.

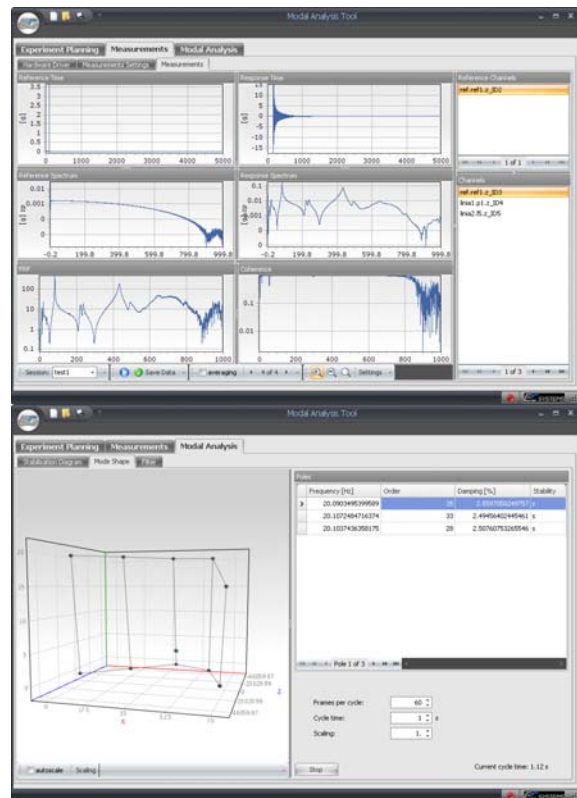


Fig. 3. GUI of described software

It was assumed that in order to fluently visualize the mode shapes it is necessary to refresh with a minimum speed of 30 fps. There are not available on the market sufficiently effective controls to allow the visualization and animation of 3D models with the assumed speed. Therefore, implementation of such control was done by using the XNA environment. The control uses a graphics accelerator which allows for refresh at 60 fps at 10,000 points of geometrical model.

5. PROGRAM OF TESTS

The tested object was a cantilever beam made of aluminum alloy. Its dimensions amounted 50 x 4 x 1000 mm. The object was divided into 9 measuring points equally spaced every 100 mm, placed along the longitudinal axis of the beam. The points were designated blk:1, ..., blk:9 starting from the top. The beam was excited with the electro-dynamic shaker attached via stinger in point blk:1. The excitation force was measured together with the acceleration of vibrations by the impedance head. In remaining points the acceleration of vibrations were measured by piezoelectric accelerometers. In Figure 4 the measuring stand is presented.

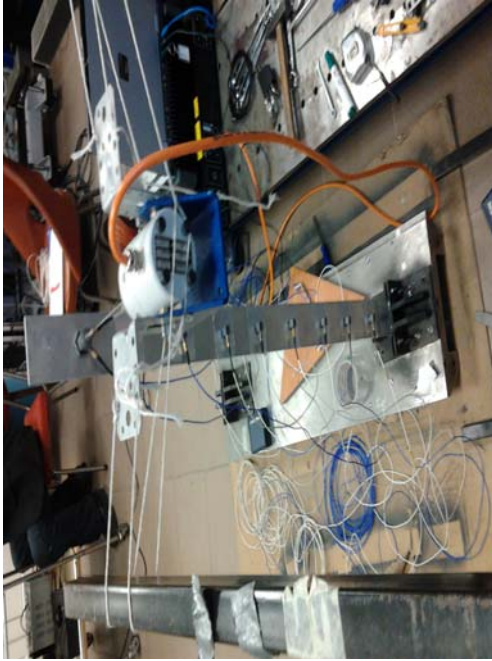


Fig. 4. Photo of the laboratory stand

The excitation signal had a band noise character with frequency range 0.1 – 512 Hz. The sampling frequency was set at 1024 Hz, the length of recorded time histories amounted 200 s.

The following measurements were performed:

- undamaged beam, ambient temperature 20⁰ C, measuring system – Scadas Mobile / TestLab 8A,
- undamaged beam, ambient temperature 20⁰ C,
- undamaged beam, ambient temperature 20⁰ C,
- undamaged beam, ambient temperature 20⁰ C, sensors reassembled,
- undamaged beam, ambient temperature 31⁰ C,
- damaged beam (added mass 4 g in point blk:5), ambient temperature 20⁰ C,
- damaged beam (added mass 4 g in point blk:9), ambient temperature 20⁰ C,
- damaged beam (added mass 15 g in point blk:5), ambient temperature 20⁰ C,
- damaged beam (added mass 15 g in point blk:9), ambient temperature 20⁰ C,

All the measurements except the first one were performed with use of the tested measuring-diagnostic unit. All the results were evaluated with use of damage index proposed in [6]:

$$DI = \frac{\int_{\omega_s}^{\omega_f} |x_i(\omega) - x_{ref}(\omega)|^2 d\omega}{\int_{\omega_s}^{\omega_f} x_{ref}(\omega)^2 d\omega} \quad (1)$$

where: ω_s , ω_f – starting and closing frequency of the analyzed band,

x_i , x_{ref} – characteristic in the current and reference state respectively..

Additionally the visual assessment of modal filtration results was performed.

6. RESULTS OF EXPERIMENTS

In this section the results of analyses will be presented. In the first step the measuring performance of the newly designed MDU was compared with the commercial modal analysis system provided by LMS Intl. In Figure 5 the comparison between corresponding FRFs measured and estimated with use of MDU and LMS system. Then, on the basis of measurements performed in the reference state, modal analysis was performed and eigenfrequencies, the corresponding modal damping ratios and mode shapes were estimated. Table 1 shows the identified modal parameters using the LMS system and the authors software.

Table 1. Comparison of beam's modal parameters

MS no.	NF - LMS [Hz]	NF - MDU [Hz]	MDC - LMS [%]	MDC - MDU [%]
1	24.7	24.7	0.62	0.69
2	68.5	68.5	0.26	0.39
3	133.7	133.8	0.32	0.27
4	222.9	222.8	0.34	0.28
5	331.9	331.9	0.22	0.24
6	461.2	461.2	0.24	0.28

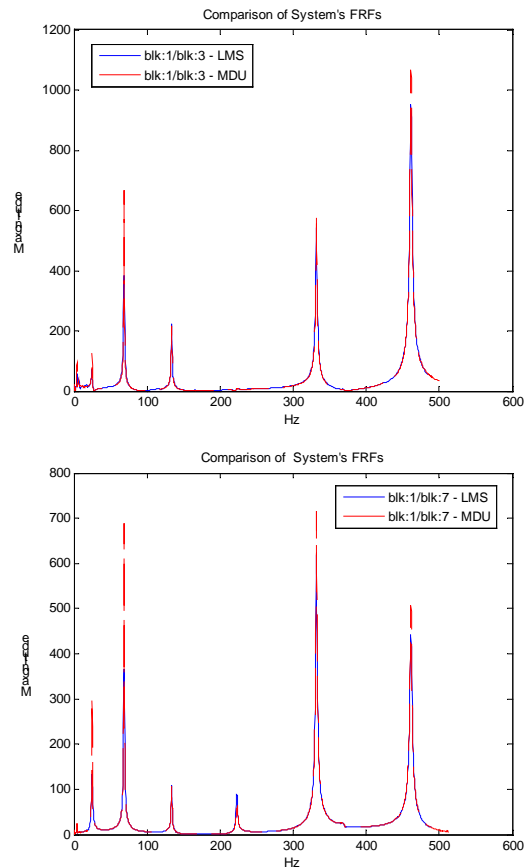


Fig. 5. Comparison of beam's FRFs obtained with use of two systems

Both results presented in Table 1 and characteristics from the Figure 5 seem to confirm the proper measuring performances of the MDU. Next its diagnostic abilities were investigated. All the measured scenarios listed in the previous section were evaluated for two cases. As a input to the diagnostic procedure based on modal filter two types of characteristics were considered: FRFs and PSDs. Firstly two measurements performed in identical condition were considered to verify the stability of the method and robustness for excitation differences (it has a form of band noise). In Figure 6 the damage index values calculated with use of Formula (1) for two measurements taken in the same conditions are presented. Both types of characteristics are considered – FRFs and PSDs.

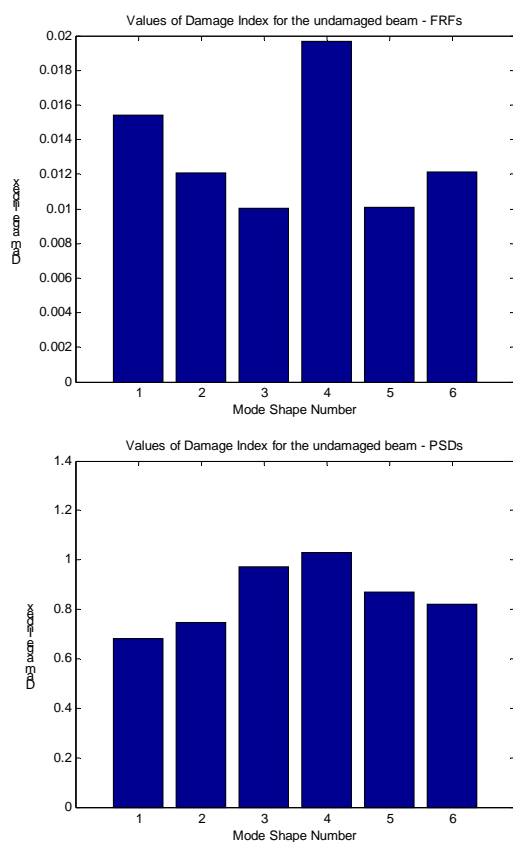


Fig. 6. Damage index values for the undamaged object

From the results placed in Figure 6 it is clearly visible that the method acts properly – damage index remained on very low level. It is however worth to notice that the PSDs taken to the analysis acts much worse than the FRFs. This difference result from the fact that the FRFs independent from excitation.

Further, the temperature in laboratory was increased of 11°C and kept at this level for 1 h. In Figure 7 the damage index values calculated for the beam in different temperature are presented, again for both FRFs and PSDs

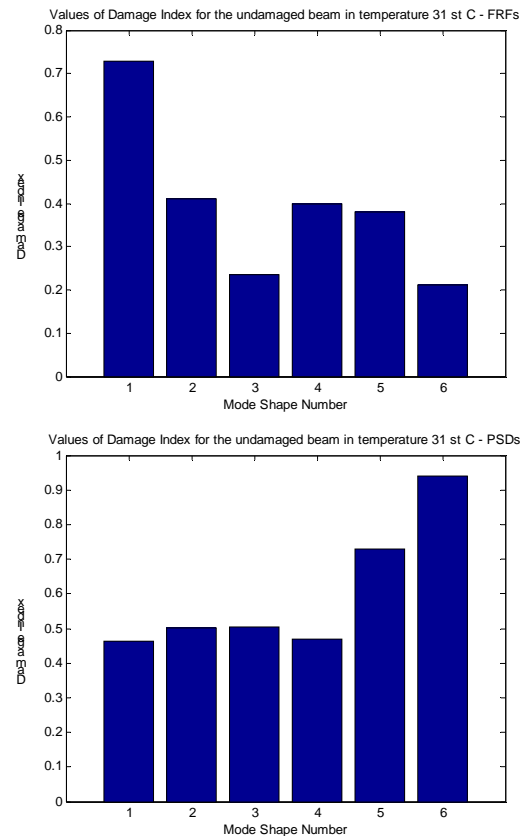


Fig. 7. Damage index values for different ambient temperature

This level of temperature difference does not affect the method. It influence is slightly visible on the FRF base calculations. Of course ambient temperature for the civil engineering object can change in bigger range than 11°C but one of the assumptions made during SHM system designing was, that it should be equipped with modal filter bank, namely the reference data should be collected for a set of ambient temperatures changing every 10°C. Results obtained during this analyses together with just mentioned assumption allow to state that the system is robust for ambient temperature changes.

Next stage of tests included the measurements also on the undamaged beam but this time the sensors were taken off an placed again possibly in the same position. In Figure 8 the damage index values calculated for this case are presented, again for both FRFs and PSDs.

For this case damage index values rose a slightly up, but they are still on the acceptable level. On the other hand, one has to keep it in mind that the sensors were re-mounted immediately after removing. In real non-destructive testing the period between measurements is usually much longer, and this increases the likelihood of committing bigger error in sensors placement. It is then recommended to apply the permanent or embedded sensor network.

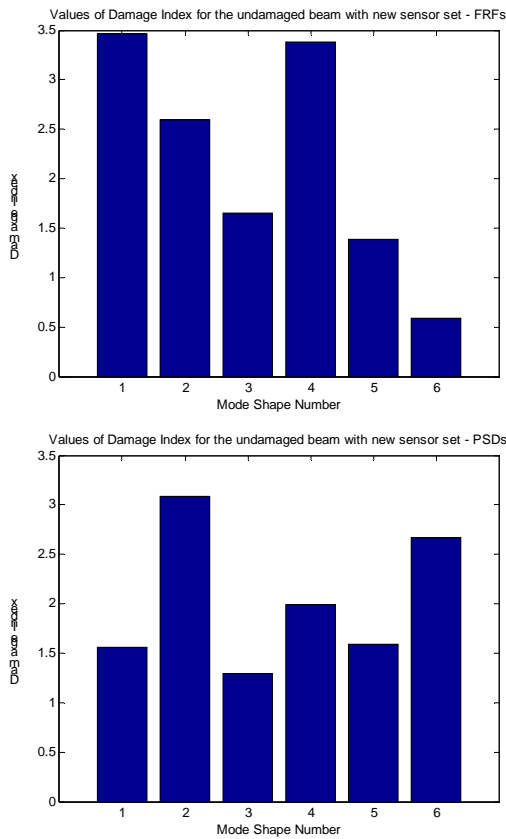


Fig. 8. Damage index values for the sensors re-mounted

Additionally in Figure 9 the comparison of modally filtered characteristics for the modal filter tuned to mode shape no. 1 is shown.

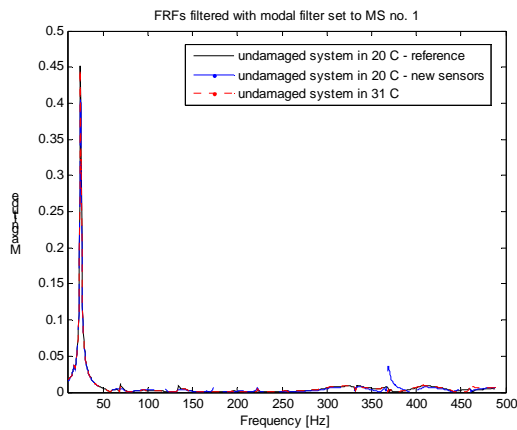


Fig. 9. Modally filtered FRFs for the sensors re-mounted an different ambient temperature

Figure 9 shows that the filtration is almost perfect for the different ambient temperature and there are very small peaks in regions of system natural frequencies for the case of sensors re-installation.

The last group of tests concerned the damage detection by the proposed system. Before the beginning of the tests, laboratory was cooled down

to the stable temperature 20°C, and reference modal filter coefficients were calculated for the data obtained after sensor re-installation. The damage was introduced in form of added mass to allow further tests on the beam. Total mass of the beam amounted 0.544 kg, added masses amounted 3.7 g and 15.5 g. It represents 0.68 % and 2.85 % of the beam mass and 6.8 % and 28.5 % of the 100mm surrounding (distance between consecutive measuring points) respectively. First added mass location was chosen in the middle of the beam – point blk:5, second location was near to the beam fastening – blk:9. In the figures from 10 to 13 damage index values for all damage cases are placed.

General conclusion that can be drawn from the results presented in the figures 10 to 13 is that all the damage cases were properly detected. Damage index values grew significantly and they are much bigger than for all undamaged beam cases. It can be observed that different damage location affects different modal filters, and as it was concluded in [6] the best detectability occurs when the modal filter is tuned to the mode shape that has biggest deflection in damage location. What is also interesting, the damage indexes calculated for PSDs differ from the ones calculated for FRFs. Different modal filters react on particular damage location. But apart from this difference the damage index values distribution

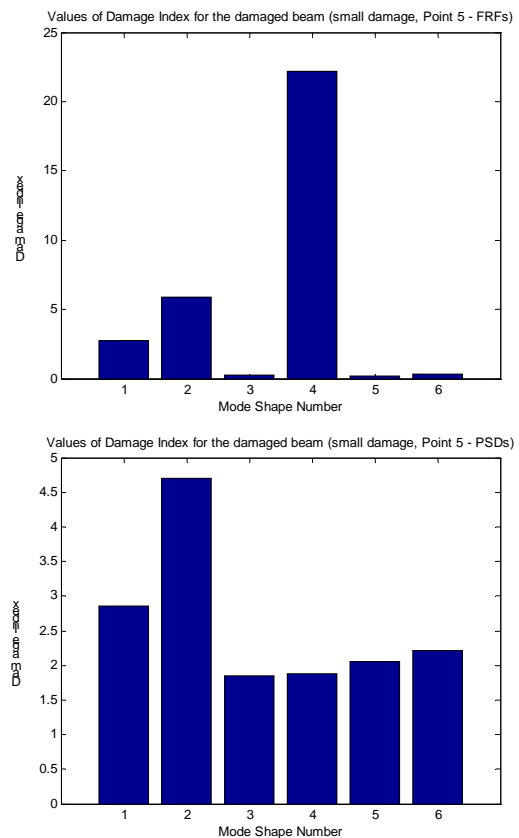


Fig. 10. Damage index values for the 3.7 added mass in point blk:5

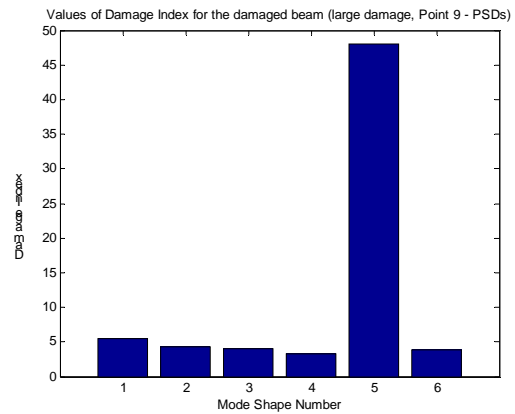
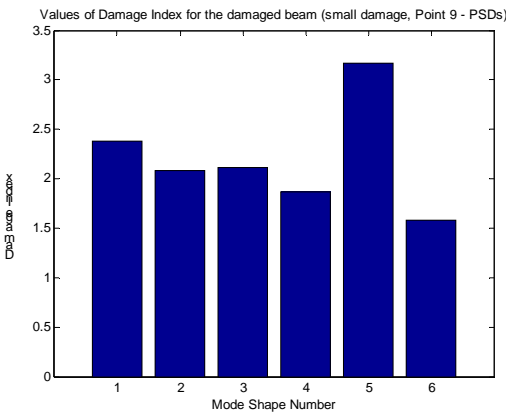
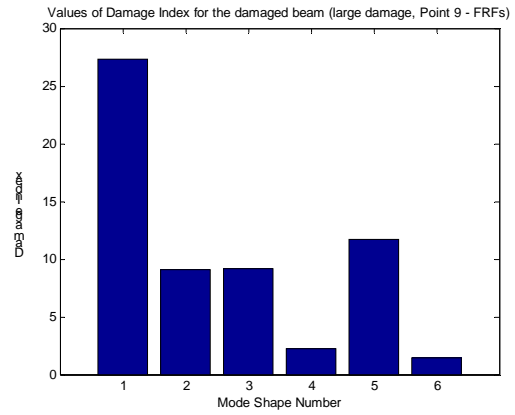
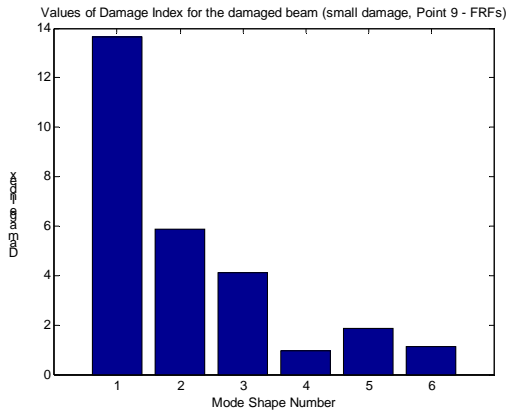


Fig. 11. Damage index values for the 3.7 added mass in point blk:9

Fig. 13. Damage index values for the 15.5 added mass in point blk:9

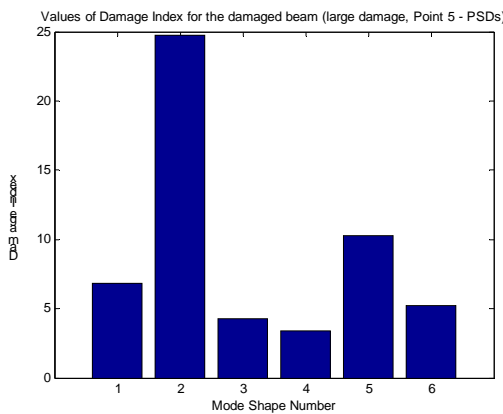
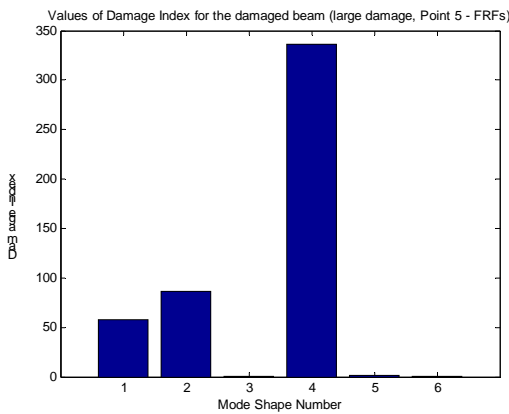


Fig. 12. Damage index values for the 15.5 added mass in point blk:5

looks similar for the selected damage location and filtered characteristic. Furthermore in Figure 14 the modally filtered characteristics (FRFs and PSDs) for the modal filter tuned to mode shape no. 5 for larger damage are shown.

In both plots from Figure 14 the damage is clearly visible in form of peaks near the 6th and 4th natural frequencies.

7. SUMMARY

The paper presents the results of laboratory tests for a damage detection procedure and monitoring system based on modal filtration. The following cases has been considered: verification of the measurement accuracy and modal parameters estimation results, stability of the method for invariant conditions, sensor re-mounting in the consecutive experiments, changes in ambient temperature and finally damage in different locations and sizes. Partial conclusions were presented in the previous section after the results of each study. A general conclusion is that the SHM system detects damage with good sensitivity, and ambient temperature does not affect the results under the assumption that there is bank of modal filters for different temperatures applied. Also the sensors should not be replaced during system operation. In the further development of the SHM system based on modal filtration, authors plan to install it on the

real structure such as bridge or football stadium to verify its monitoring ability.

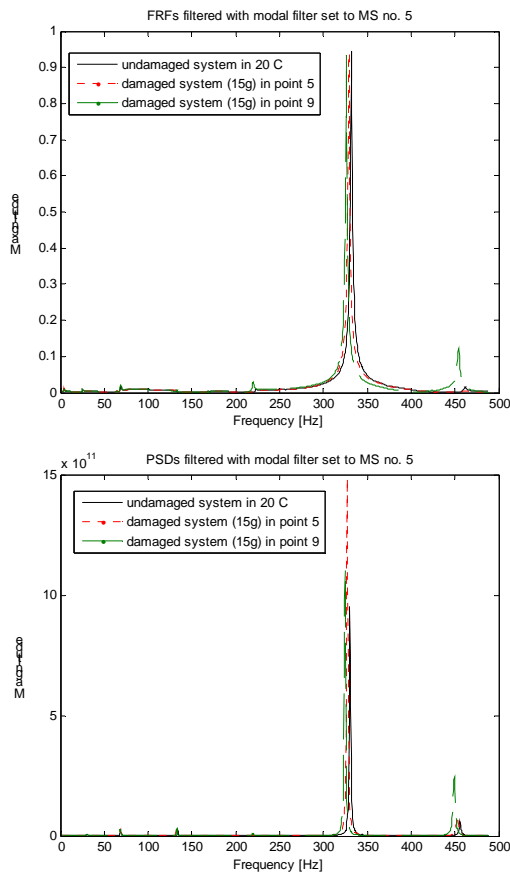


Fig. 14. Modally filtered FRFs and PSDs for the large damage

ACKNOWLEDGEMENT

Research funding from the Polish research project MONIT (No. POIG.01.01.02-00-013/08-00) is acknowledged by the authors.

REFERENCES

- [1] Mendrok K., Uhl T., “Overview of modal model based damage detection methods”, *Proceedings of 2004 ISMA*, Leuven, Belgium, (2004).
- [2] Zhang Q., Allemang, R.J., Brown, D.L., “Modal Filter: Concept and Applications”, *Proceedings of International Modal Analysis Conference*, pp. 487-496, (1990).
- [3] Meirovitch L., Baruh H., “Control of self-adjoint distributed parameter system”, *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 8 (6), 60-66, (1982).
- [4] Deraemaeker A., Preumont A., “Vibration based damage detection using large array sensors and spatial filters”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 20, Is. 7, 1615-1630, (2006)

- [5] Mendrok K., Uhl. T.: “Modal filtration for damage detection and localization”, *Proceedings of 4th EWoSHM*, Krakow, (2008)
- [6] Mendrok K., Uhl T.: “The application of modal filters for damage detection”, *Smart Structures and Systems*, Vol. 6, No. 2 115-133, (2010)
- [7] Mendrok K.: “Simulation verification of damage detection algorithm”, *Diagnostyka*, Vol. 3, 17–23, (2010)



PhD. Eng. Krzysztof MENDROK

is a senior researcher in the Department of Robotics and Mechatronics of the AGH University of Science and Technology. He is interested in development and application of various SHM algorithms. He mainly deals with low frequency vibration

based methods for damage detection and inverse dynamic problem for operational load identification.



MSc. Eng. Wojciech MAJ

is PhD student in the Department of Robotics and Mechatronics of the AGH University of Science and Technology. The main areas of his interest are digital signal processing and parallel computing architectures.



Prof. Tadeusz UHL

is a head of the Department of Robotics and Mechatronics, AGH-UST. His main research areas cover SHM, modal analysis, active vibration reduction, control systems and mechatronics.

IDENTIFICATION AND MODELING OF MULTIAXIAL FATIGUE LOADING NON-PROPORTIONALITY

Janusz SEMPRUCH, Dariusz SKIBICKI

Instytut Mechaniki i Konstrukcji Maszyn
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
85-796 Bydgoszcz, Kaliskiego 7, dariusz.skibicki@utp.edu.pl

Summary

The importance of fatigue non-proportional loadings in the estimation of fatigue life has been explained in the paper. The classification of computational methods of description of such load state has been presented. Authors introduced own fatigue criterion too. Also they presented a proposal of an experimental modeling of non-proportionality degree of fatigue loading, based on the methodology of programmed loading.

Keywords: fatigue, multiaxial loading, non-proportional loading, criteria.

IDENTYFIKACJA I MODELOWANIE NIEPROPORCJONALNOŚCI WIELOOSIOWEGO OBCIĄŻENIA ZMĘCZENIOWEGO

Streszczenie

W artykule wyjaśniono znaczenie zmęczeniowego obciążenia nieproporcjonalnego w szacowaniu trwałości zmęczeniowej. Przedstawiono klasyfikację metod obliczeniowych opisu tego stanu obciążenia. Zaprezentowano własne kryterium zmęczeniowe. Przedstawiono także propozycję eksperymentalnego modelowania stopnia nieproporcjonalności obciążenia zmęczeniowego, opartą na metodologii obciążeń programowanych.

Słowa kluczowe: zmęczenie, obciążenie wieloosiowe, obciążenie nieproporcjonalne, kryteria.

1. INTRODUCTION

Components of machines, vehicles and structures are frequently subjected to repeated loading which may lead to their failure due to fatigue. The majority of fatigue failure for the components in service is the multiaxial fatigue failure. The accuracy of prediction of fatigue properties on the basis of computational models depends, inter alia, whether rightly determined load quantities (such as: components of the stress/strain tensor, energy, stress intensity factor) and load parameters of these quantities (like amplitudes, the ranges of variability, the maximum values, average values or gradients) which affect the fatigue process. One of the load quantities, which may have a significant impact on the process of fatigue, is the loading non-proportionality. It exists always when there is non-proportionality between the stress and strain tensor components. Then we have to deal with the principle axis rotation.

The loading non-proportionality may cause different consequences. Depending on the non-proportionality degree and type of material, the effect of the non-proportionality may even lead to a 10-times decrease in fatigue life in relation to the proportionate loading of the same values of equivalent amplitudes [1]. The destructive influence

of non-proportionality decreases with the decreasing of load level [2], but in the range of fatigue limit is also visible. In the least favorable conditions, a decrease of fatigue limit may be reduced to 25% [3]. Changes in life and fatigue strength under non-proportional loading are accompanied by characteristic formations of dislocation structures, additional material hardening and the characteristic development of fatigue cracks.

There are very many, very different ways of assessing the non-proportionality degree, while very few methods of modeling. The paper contains a summary of methods for assessing the degree of loading non-proportionality and presentation of the author's method of non-proportionality modeling.

2. METHODS OF DETERMINING THE DEGREE OF LOADING NON- PROPORTIONALITY

2.1. Non-proportionality measures determined on the basis of the nominal stress or strain

The angle of the phase shift between the sinusoidal components of the load variables is a simple example of the quantity describing the course of the nominal size of the load, which affects the degree of non-proportionality. The idea was used in case of S. B. Lee's criterion [4], where non-

proportionality parts being functions of phase shift ϕ angle were proposed. However, this solution is always restricted to a particular loading case.

In the case of a random state of stress or strain to describe the degree of loading non-proportionality the correlation relations between the components of the state are used [5].

2.2. Non-proportionality measures formulated on the basis of the loading path geometry in one selected plane

The first sub-solutions are those for the load paths in the physical plane. Simple function of the non-proportionality for sinusoidal waveforms was proposed by Kanazawa [6]. To describe the non-proportional loading path of the coefficient called rotation factor was defined. This is a ratio of shear stress range at an angle of 45 degrees to the plane of maximum deformation range to the range of shear strain. For the phase shift angle $\phi=0^\circ$ this quantity assumes a value equal zero.

In author's proposition the non-proportionality degree was described with a filling coefficient, defined as a quotient of the area within the loading path and the area of the circle described on the hodograph [7]. Using weight function would mean acceptance of the assumption that loading non-proportionality is connected not only with the value of rotating vectors but also with their positions.

Loading paths may be considered not only in the physical plane but also on the octahedral plane. This way you'll be able to modify the criteria formulated on the basis of the stress tensor invariants. Methods of formulating non-proportionality measures of this group consist in replacing the shear octahedral stress amplitude by quantity formulated on the basis of the loading path lying on the octahedral plane. For example Duprat [8] considers load trajectory curve (ellipse) in the hyperplane of the deviatoric tensor.

2.3. Non-proportionality measures formulated on the basis of the loading path geometry in two planes

The idea of formulating of the non-proportionality measures by examining the stress/strain components in the two planes was used in the energy parameter criteria and the fatigue damage accumulation models. Solutions of this type are based on ideas proposed by Kanazawa [6].

An example can be a method based on a virtual strain-energy concept proposed by Liu [9]. Method introduces two parameters as a measure of fatigue damage on critical planes of crack nucleation, which precedes actual cracking. Mode-I fracture occurring on a critical plane is driven by the maximum principal stress and strain, and Mode-II fracture occurring on a different critical plane is driven by the maximum shear stress and strain.

2.4. Non-proportionality measures formulated on the basis of the loading path geometry in many planes

The idea of using multiple planes to describe the non-proportional load underlies the integral approach. This idea is based on the assumption that for a proper assessment of the fatigue behavior one must sum a cumulative damage parameter at all planes passing through the considered material point. For each of the planes the fatigue damage parameter is defined. Integral approach requires the calculation of the average square of the parameter.

As an example of this approach can be used Shear Stress Intensity Hypothesis developed by Zenner [10].

2.5. Non-proportional measures in cyclic plasticity models

In many fatigue models, such as energy models knowledge of the relationship between stress and strains in terms of plastic strain is required. These relationships are described by models of plasticity. In a complex multiaxial load models must recognize the impact of non-proportionality such as material hardening and changes of the average plastic strain during force controlled by the stress of the average (ratcheting). Describing the impact these models are describing the degree of loading non-proportionality simultaneously. Some models can be found in [11].

3. MODELING METHOD OF LOADING NON-PROPORTIONALITY

3.1. Description of the approach

In comparison with the number of numerical models, the number of experimental methods of modeling is small. In the section the method of non-proportional fatigue load modeling proposed by authors has been described [12]. The tests involved modeling non-proportional loading by two blocks loading program, whose blocks differed with the positions of principal axes. Control over the principal positions was gained using different types of loading for each block. Block I consisted of fully reversed torsion cycles whereas block II consisted of biaxial reversed cycles, that is, fully reversed torsion with biaxial torsion and compression. Change of the principal axes position range was controlled by principal axes position change in block II with invariable position of axes in block I. Position of axes in the block of torsion was the basic one from which positions of principal axes were calculated for other loading cases. Certain values of the principal axes position in block II was reached by establishing adequate values of the shear to normal stress ratio. Equivalent stress values were identical for both blocks. Lengths of blocks were also identical consisting of 5 000 cycles. Details of the research program were presented in Table 1 and Figure 1.

Table 1. Description of fatigue tests making up the research program

Denotation of the test kind	Description of the test	Position of the maximal shear stress vector β [°]	Ratio of nominal stresses $\sigma_{x(a)}/\tau_{xy(a)}$
'1'	uniaxial loading, reversed torsion	0.0	0.0
'2'	biaxial loading, torsion with tension/compression	7.5	0.5
'3'	biaxial loading, torsion with tension/compression	15.0	1.2
'4'	biaxial loading, torsion with tension/compression	22.5	2.0
'5'	programmable loading	block 1 – uniaxial '1'	0.0
		block 2 – biaxial '2'	7.5
'6'	programmable loading	block 1 – uniaxial '1'	0.0
		block 2 – biaxial '3'	15.0
'7'	programmable loading	block 1 – uniaxial '1'	0.0
		block 2 – biaxial '4'	22.5

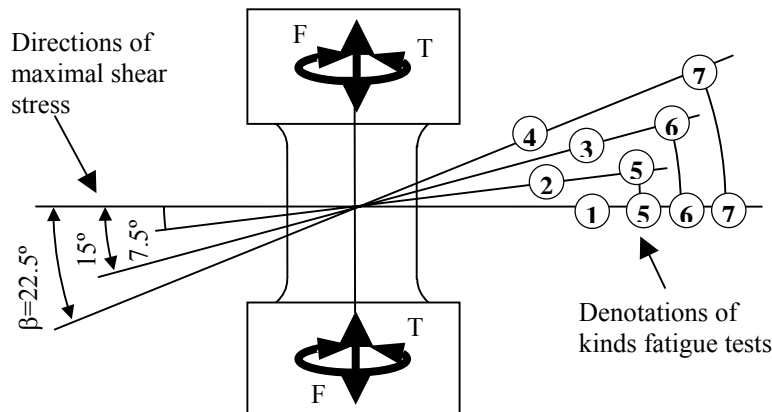


Fig. 1. Positions of maximal shear stress vectors for 7 kinds of fatigue tests.
 F – tension/compression, T – torsion.

Tests were carried out for two materials: austenitic steel X5CrNi 18-10 and aluminum alloy AW 6063. Austenitic steel is characterized by very high sensitivity to loading non-proportionality whereas aluminum alloy shows no sensitivity to such loading. At the microlevel, the material sensitivity is related to the material stacking fault energy. The materials with a high level of the stacking fault energy do not exhibit sensitivity to non-proportional loading, while those with a low energy are sensitive to a loading non-proportionality.

It was recognized that the examined effect of the modeled loading non-proportionality influence should be fairly visible with the use of austenitic steel. If the results obtained for a sensitive material are only the effect of modeled loading non proportionality then in the case of aluminum alloy such effects should not be noticeable.

3.2. Results

Fatigue life mean values were calculated for each kind of the test and they were presented in Fig. 2 and 3. Fatigue life for reversed torsion (test '1') corresponding to the level of principal tests stresses is marked in black color. Mean fatigue lives corresponding to the proportional loading, obtained in tests '2', '3' and '4' are marked in grey color. Mean lives obtained in non-proportional tests '5', '6' and '7' are marked in white color.

For X5CrNi18-10 steel fatigue life obtained in test '5' i.e. for small changes of the principal axes angle between loading blocks is statistically consistent with the base fatigue life (Fig. 2). In this case changes of the principal axes position angle do not affect the obtained fatigue life. For wider ranges of angle changes, i.e. for tests '6' and '7' the obtained lives are smaller in relation to the basic one and decreases along with the increase of β angle.

'5', '6' and '7' fatigue lives do not vary from the lives obtained in uniaxial test '1' and biaxial proportional tests '2', '3' and '4'.

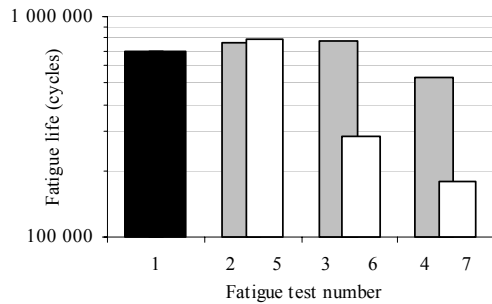


Fig. 2. Setting up of tests results for X5CrNi18-10

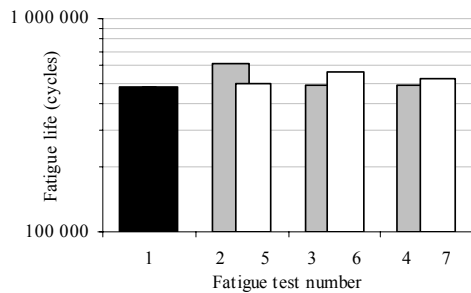


Fig. 3. Presentation of tests results in the form of mean fatigue lives for AW6063

On the basis of carried out tests it can be established that in case of material sensitive to loading non-proportionality there is an influence of the principal axes rotation range on fatigue life during programmable fatigue tests. In the case of material insensitive to load non-proportionality such a relationship is not found. The method can therefore be used to model the non-proportionality of fatigue load.

4. CONCLUSIONS

- 1) Development of fatigue damage parameters are in a state of rapid change. It can be said that researchers today are focusing most attention on critical plane damage parameters and some works continues to progress in the development of integral approaches for non-proportional loading cases.
- 2) In comparison with the large number of fatigue criterion the number of experimental methods of non-proportionality modeling is very small. Due to the large scatter of the calculated lives, the experimental structural durability tests under non-proportional loading must be carried out.

REFERENCE LIST

- [1] Socie D.: *Multiaxial Fatigue Damage Models*. Journal of Engineering Materials and Technology, 109, 1987, 293-298.
- [2] Ellyin F., Gołoś K., Xia Z.: *In-phase and out-of-phase multiaxial fatigue*. Transactions of the ASME, 113, 1991, 112-118.
- [3] McDiarmid D. L.: *Fatigue under out-of-phase bending and torsion*. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 9, 6, 1987, 457-475.
- [4] Lee S. B.: *A criterion for fully reversed out-of-Phase torsion and bending*. Multiaxial Fatigue, ASTM STP 853, eds. K.J. Miller, M.W. Brown, 1985, 553-568.
- [5] Łagoda T., Macha E.: *Wieloosiowe zmęczenie losowe elementów maszyn i konstrukcji. Część II. Studia i monografie*, 76, 1995, Wyższa Szkoła Inżynierska w Opolu
- [6] Andrews R. M., Brown M. W.: *Elevated temperature out-of-phase fatigue behavior of a stainless steel*. Biaxial and Multiaxial Fatigue, EGF 3, Mechanical Engineering Publications, 1989, 641-658
- [7] Skibicki D.: *Multiaxial fatigue life and strength criteria for non-proportional loading*, MP Metalprufung 2006, 48, 3, 99-102.
- [8] Duprat D.: *A model to predict fatigue life of aeronautical structures with out-of-phase multiaxial stress condition*. Proc. of the 5th International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture, 1, 1997, 111-123.
- [9] Liu K. C., Wang J. A.: *An energy method for predicting fatigue life, crack orientation, and crack growth under multiaxial loading conditions*. International Journal of Fatigue 23, 2001, 129-134.
- [10] Zenner H., Simbürger A., Liu J.: *On the fatigue limit of ductile metals under complex multiaxial loading*. International Journal of Fatigue 22, 2000, 137-145.
- [11] Benallal A., Cailletud G., Chaboche J. L., Marquis D., Nouailhas D., Rousset M.: *Description and modeling of non-proportional effects in cyclic plasticity. Biaxial and multiaxial fatigue*. Edited by Brown M.W., Miller K. J. EGF Publication 3. Mechanical Engineering Publications Limited, London 1989.
- [12] Skibicki D.: *Experimental verification of fatigue loading non-proportionality model*, 8th International Conference on Multiaxial Fatigue and Fracture, Sheffield Hallam University, 2007, S7B1.

ENERGETIC MODES IN DESCRIPTION OF STRUCTURAL DEGRADATION OF CONSTRUCTIONAL MATERIALS

Henryk KAŻMIERCZAK, Tadeusz PAWŁOWSKI, Jacek KROMULSKI
 Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych
 60-963 Poznań, ul. Starołęcka 31
 tel. 061.8712279, e-mail: kazmhenr@pimr.poznan.pl

Summary

This article presents results analysis of the structural degradation of technical materials samples. The results have been determined by the analysis of the distribution under dynamic load (a discrete model of structure dynamic load). The aim of this research is to describe the process of structural degradation of the basic technical materials. The structural changes of the constructional material samples subjected to impulsive loads have been measured. Information about the technical condition of the individual material samples have been obtained on the basis of the energy characteristics of power spectral density under degrading dynamic load. The results were presented in the form of power amplitude estimation of the dynamic stiffness forces and damping forces, changing with the ongoing samples degradation process.

Research conducted at the work station by the method of impulsive test helped to determine the initial load causing the damage in the material structure. Further analysis of the material structural changes allowed determining the limits of load, which will initiate the process of structural degradation (in. ex. cracking).

Keywords: degradation state, constructional material, structural changes, dynamic rigidity.

Streszczenie

MODY ENERGETYCZNE W OPISIE DEGRADACJI STRUKTURALNEJ MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH

W artykule przedstawiono ideę badania wytężenia materiałów konstrukcyjnych energetyczną metodą wyznaczania widmowych charakterystyk, opisujących zmiany strukturalne obiektów mechanicznych. Wytężenie materiału definiowane jest jako ogół zmian charakterystyk strukturalnych występujących w materiale w wyniku poddania go zewnętrznym obciążeniom mechanicznym. Wyznaczono miary tych zmian przy zmiennych obciążeniach dynamicznych.

Synergizm różnych procesów (np. rodzaj i amplituda obciążeń, przestrzenna i czasowa charakterystyka tych obciążeń, procesy korozji i starzenia, własności wytrzymałościowe materiałów, itp.) stanowi o zmianach strukturalnych obiektu mechanicznego. Charakterystyki zmian parametrów strukturalnych materiałów wyznaczano poprzez moce sił tłumienia (tarcie wewnętrzne) i moce sił bezwładności i sił sztywności dynamicznej, oraz wyznaczanej na tej podstawie pracy sił powodujących degradację próbek materiałów. Gęstości widmowe mocy obciążeń degradacji strukturalnej materiałów konstrukcyjnych (część rzeczywista i część urojona) obliczano metodą eksperymentalnej analizy modalnej.

Badania właściwości wytężenia materiałów obejmują wyznaczenie widmowych charakterystyk energetycznych ścinania, skręcania i zgniatania oraz miar zmiany parametrów strukturalnych (miar tarcia wewnętrznego i sztywności dynamicznej)

Słowa kluczowe: stan degradacji, materiał konstrukcyjny, zmiany strukturalne, sztywność dynamiczna.

1. ENERGY CHARACTERISTICS OF STRUCTURAL DEGRADATION OF A MECHANICAL OBJECT

The holistic model of machine load condition is described by the matrix of power spectral density of the dynamic load power in a mechanical system:

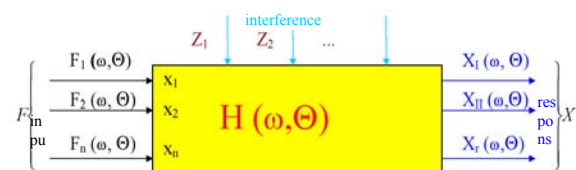


Fig. 1. Model of machine

$$N_{ik}(t, \Theta) = V_i(t, \Theta) \cdot F_k^{Tr}(t, \Theta) \quad (1)$$

$$\{G_{N_{ik}}(j\omega, \Theta)\} = \mathbf{H}_{V_{ik}}(j\omega, \Theta) \cdot \mathbf{G}_{F_k F_k}(j\omega, \Theta) \quad (2)$$

where: $\mathbf{H}_{V_{ik}}(j\omega, \Theta)$ – mobility matrix of machine,
 $\mathbf{G}_{F_k F_k}(j\omega, \Theta)$ – spectral density matrix of excitation forces.

$$H_{ik}(j\omega, D(r, \Theta)) = \begin{Bmatrix} H_{i1}[j\omega, D_{11}(\Theta)] & \dots & H_{in}[j\omega, D_{1n}(\Theta)] \\ H_{n1}[j\omega, D_{n1}(\Theta)] & \dots & H_{nn}[j\omega, D_{nn}(\Theta)] \end{Bmatrix} \quad (3)$$

The elements of the matrix of dynamic characteristics: are the functions of spatial degradation measure D of the mechanical system.

2. POWER CHARACTERISTICS OF THE STRUCTURAL DEGRADATION OF PRETENSIONED PRESTRESSED CONCRETE BEAMS

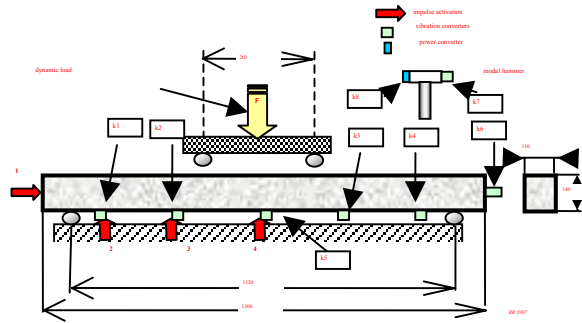


Fig. 2. Location of testing points of vibration acceleration and points subjected to forcing actions by a modal hammer

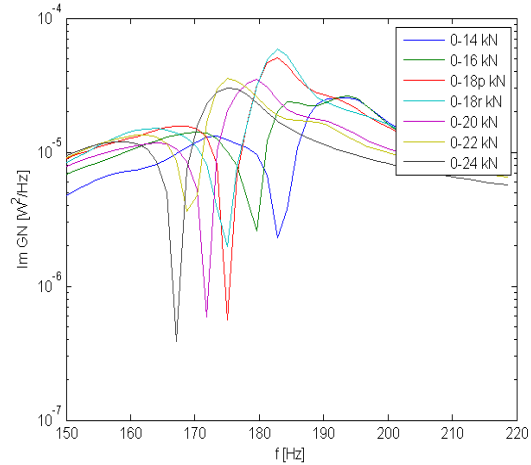
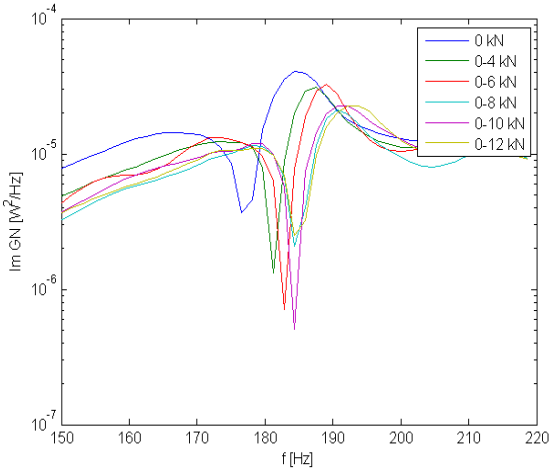


Fig. 3 Impulse loads power spectral density imaginary parts changes, describing object structural degradation (scope 150–220 Hz)

Technical degradation process of the sample resulted in either growth of mode frequency (greater rigidity) or a reduction of mode frequency. Relative change in dynamic rigidity of a mechanical object due to its structural degradation:

$$\frac{k_i - k_r}{k_i} \approx 1 - \frac{\omega_r^2}{\omega_i^2} \quad [\%] \quad (4)$$

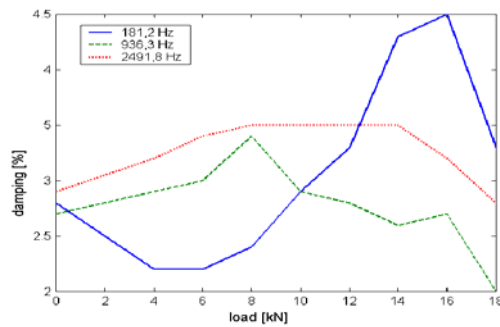


Fig. 4. Energetic modes damping changes resulting from beam degradation

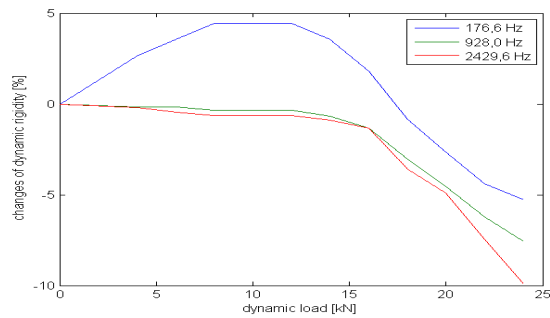


Fig. 5 The changes of dynamic rigidity of a pretensioned prestressed concrete beam as a result of a degrading dynamic load

3. STRUCTURAL DEGRADATION OF CONSTRUCTIONAL MATERIALS

Below are energetic characteristics of impulse loads causing structural degradation of a standard-dimension sample of constructional material. The key element of the test station was electric impact hammer (Fig. 6). Torsional moment of force was applied to samples of various constructional materials (e.g. steel, cast iron) of standard measurements.

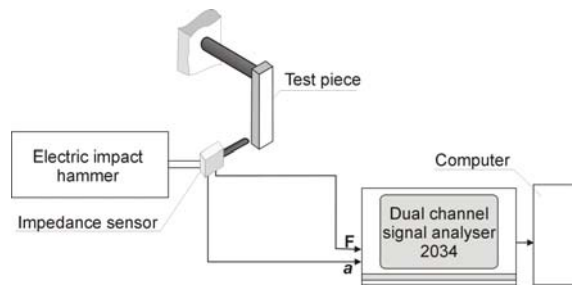


Fig. 6 The scheme of test stand to analyze dynamic degradation of constructional material samples

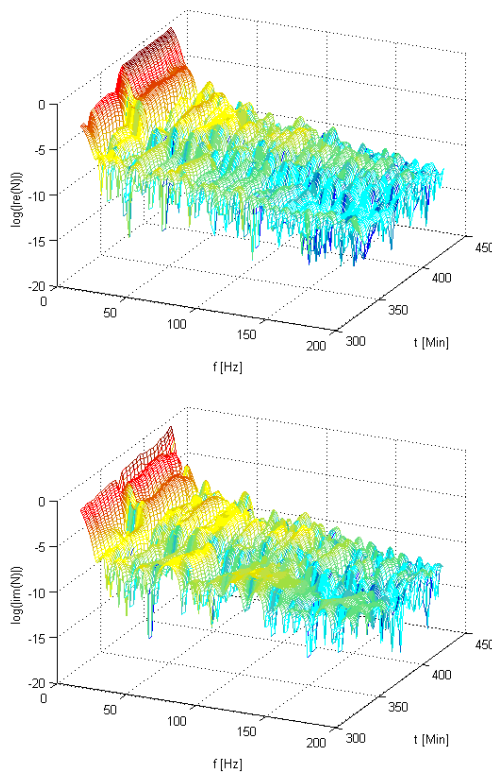


Fig. 7. The real (real changes) and imaginary parts (rigidity changes) of the power spectral density of the impulse loads power



Fig. 8. Crosssection of fatigue scrap

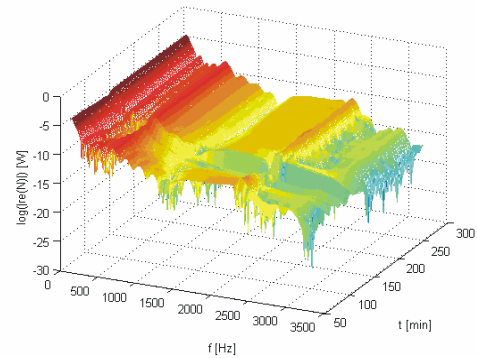


Fig. 9. The real (real changes) and imaginary parts (rigidity changes) of the power spectral density of the impulse loads power

High loads maxima characterised the process of sample cracking and breaking. The shift of characteristics extremes (Fig.7) and the occurrence of reduction (or growth) of minima frequency (anti-resonance) in energetic characteristics, serve as a confirmation of the degradation state of a mechanical object. Cracked samples are shown in Fig. 9.

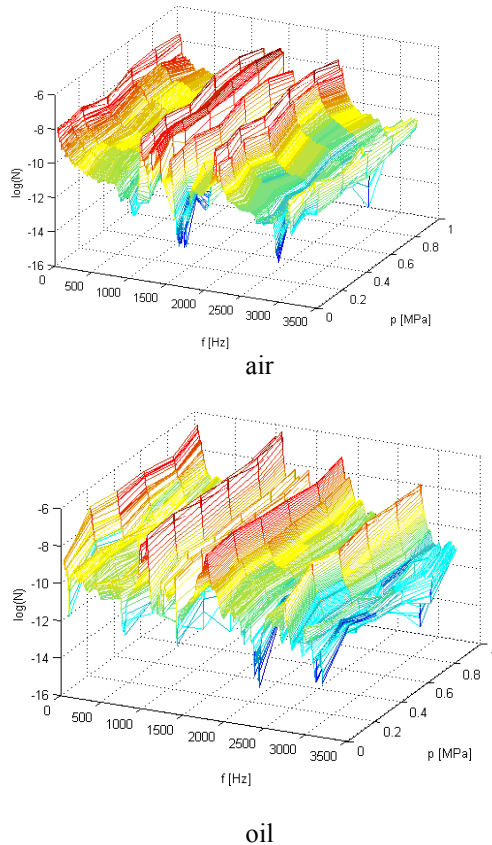


Fig. 10. Spectral characteristics of the power load N (f , p)

3. CONCLUSION

1. The processes determining the machine life characteristic and the measures of changes of its technical state have an energetic dimension. Therefore, one should use energetic methods in performing tests in the field of rigidity of mechanical objects.
2. In order to assess the dynamic condition of a machine, it is required to know dissipated power (real parts of dynamic load powers) and separate the powers of inertia forces and dynamic rigidity forces (imaginary parts of dynamic load powers). The method is applied in research into energy dissipation and structural changes in mechanical objects.
3. Information about the technical condition of an object can be obtained from energetic characteristics of power spectral density of dynamic load powers and amplitude estimates represented in the synthetic form for dynamic rigidity force powers and damping force powers, which change along the evolving process of their degradation. When analysing 3D diagrams of power spectral density for force powers in the function of frequency and the function of time, changes (maxima) in the run of these functions can be noticed.

REFERENCES

- [1] H. Kaźmierczak, *Analiza rozkładu mocy obciążeń dynamicznych w systemach mechanicznych*, Rozprawy Nr 363, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2001.
- [2] H. Kaźmierczak, *Dynamic load power distribution in mechanical systems*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, Zeszyt 3(127), 127-141, ITE Radom 2003.
- [3] H. Kaźmierczak, *Badania trwałości zmęczeniowej maszyn metodą analizy rozkładu mocy obciążeń dynamicznych*, Diagnostyka vol.26, 133-142, 2002, PTDT przy Wydziale Nauk Technicznych PAN.
- [4] H. Kaźmierczak, *Energetic description of the destruction process of machine structural nodes*, Machine Dynamics Problem, Vol. 27, No 3, 113-123, Warszawa 2003
- [5] H. Kaźmierczak, *Analiza destrukcji maszyny metodą rozkładu mocy obciążeń dynamicznych*, DIAGNOSTICS'2004 3rd International Congress on Technical Diagnostics
- [6] H. Kaźmierczak, J. Kromulski, T. Pawłowski *Energetyczne charakterystyki degradacji przyczepy*, Diagnostyka vol.33, 2005, PTT. N.
- [7] H. Kaźmierczak, J. Kromulski, C. Cempel, R. Barczewski, *Energetic description of the destruction process of steel concrete structures*, COST Action 534 New Materials and Systems for Prestressed Concrete Structures, Workshop of COST on NTD Assessment and New Systems in Prestressed Concrete Structures, Radom 2005.



dr hab. **Henryk KAŹMIERCZAK prof. nadzw.** – absolwent Wydziału Mat. Fiz. Chem. Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, stopień doktora nauk technicznych uzyskał w 1977r. na Wydziale Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej. Stopień doktora habi-

litowanego nauk technicznych z dziedziny mechanika uzyskał w 2002r. na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej. Jest autorem ponad 250 publikacji naukowych. Zajmuje się zagadnieniami z dziedziny dynamiki maszyn, diagnostyki technicznej, identyfikacji własności dynamicznych maszyn, w tym metodami analizy modalnej. Ostatnie publikacje dotyczą energetycznego modelowania obciążeń w maszynach oraz zastosowania metody analizy rozkładu mocy obciążeń dynamicznych do badań procesów degradacji i trwałości maszyn. Jest członkiem krajowych i zagranicznych towarzystw naukowych.



Dr inż. **Tadeusz PAWŁOWSKI** – dyrektor Przemysłowego Instytutu Maszyn Rolniczych w Poznaniu. Absolwent Politechniki Poznańskiej, autor lub współautor ponad 80 prac naukowych z zakresu nowoczesnych metod analiz wytrzymałości konstrukcji, symulacyjnego szacowania

obciążeń dynamicznych konstrukcji nośnych, analizy funkcjonalnej maszyn i urządzeń, komputerowego wspomaganie projektowania (CAD) oraz projektowania napędów hydrostatycznych w maszynach rolniczych. Autor rozprawy pt. „Dynamika cienkościennych konstrukcji nośnych maszyn rolniczych z uwzględnieniem sił uogólnionych III rzędu.



Dr **Jacek KROMULSKI** jest adiunktem w Przemysłowym Instytucie Maszyn Rolniczych. W działalności naukowej zajmuje się zagadnieniami dynamiki strukturalnej, modelowania, analizy modalnej oraz analizy sygnałów. Jest autorem ponad 80 prac

dotyczących tych zagadnień.

DEMONSTRATION OF A GREY-BOX APPROACH TOWARDS THE DIAGNOSTICS OF A FEEDWATER HEATER (PART I) – MODEL DEVELOPMENT

Piotr CZOP

AGH University of Science and Technology, Department of Robotics and Mechatronics
Al. Mickiewicza 30, piotr.czop@labmod.com

Summary

Work related to the first-principle modeling of a boiler feedwater heater operating in a power unit is presented, along with theoretical discussion concerning its structural simplifications, parameter estimation, and dynamical validation. The objectives of this work are as follows: (i) formulate a moderately complex first-principle model of a feedwater heater to reproduce operational measurements in real-time simulations, (ii) develop a tuning method for this model, (iii) propose key indicators of heater performance using a model-based approach, and finally (iv) automate the calculation process of the indicators. The first objective has been addressed in this paper while the remaining objectives are dealt with in the second paper. In the first part of this work, the development process of such a model is presented, including necessary simplifications for improving its performance and functionality. As a result of the proposed simplifications, performance approximate to the real-time was achieved on a regular PC workstation for a series of six low- and high-pressure heaters.

Key words: power plant, feedwater heater, modeling, system identification.

Streszczenie

Artykuł przedstawia proces modelowania podgrzewacza regeneracyjnego pracującego w systemie bloku energetycznego z wykorzystaniem równań fizycznych. Artykuł zawiera dyskusję dotyczącą uproszczeń struktury modelu, estymacji jego parametrów oraz walidacji. Celami pracy jest: (i) sformułowanie umiarkowanie złożonego modelu wymiennika odtwarzającego dane pomiarowe w rzeczywistej skali czasu, (ii) przedstawienie metody strojenia modelu, (iii) zaproponowanie wskaźników użyteczności podgrzewacza na podstawie podejścia wspartego modelem, oraz (iv) automatyzacja procesu wyznaczania tych wskaźników. Pierwszy z celów zawiera się w tej części pracy, a pozostałe w części drugiej. Pierwsza część pracy opisuje proces tworzenia modelu z uwzględnieniem koniecznych uproszczeń w celu podniesienia jego użyteczności oraz funkcjonalności. W wyniku zaproponowanych uproszczeń, uzyskano użyteczność zbliżoną do czasu rzeczywistego na stacji roboczej klasy PC, dla modelu obejmującego zespół sześciu wymienników nisko i wysokociśnieniowych.

Słowa kluczowe: elektrownia, podgrzewacz regeneracyjny, modelowanie, identyfikacja systemów.

INTRODUCTION

Virtual simulation plays an important role in reducing the time, cost and technical risk of developing new power plant systems and installations [1-2]. In 2005, the national research project “DIADYN”, founded from European Union structural funds, was initiated by a consortium of Polish technical universities and research institutes. The project name stands for “Integrated dynamic systems of risk assessment, diagnostics and control of structures and technological process” involving 40 research teams in its realization. Within the project, the Virtual Power Plant (VPP) modeling environment was proposed in [3] as an innovative approach towards reconstructing operation of a power plant unit based on a model and recorded process data. The VPP, described in detail in [4], provides a framework for integrating the range of models, data management system and visualization

methods into a single simulation environment. The VPP consists of a number of computers and software modules, interconnected by a fast computer network that is designed to allow plug-and-play functionality. The VPP was included in the project as a practical laboratory, which facilitates validation of diagnostic methodology implemented as software algorithms or available in the form of hardware solutions, like a controller with embedded fault detection and isolation functionality. The novelty of the proposed simulation environment is strong support for model-based diagnostics, which is one of the most potential and fast developing technologies. A comprehensive survey presenting model-based theory and practice can be found in [5]. Despite numerous analytical and experimental studies, the feasibility of the model-based approach is limited when it is applied to large, industrial installations, such as power plant units. Key problems in practical implementations are twofold. The first group of

problems are connected to the development of the model; in most cases, even if the underlying physical equations are known, the most important obstacle is to obtain the correct parameters, and thus – correct model behavior; on the other hand, when the “black-box” system identification approach is chosen – it is extremely important to acquire sufficient data, covering the operating range of the object. The second group is the lack of a flexible work environment; the process of model development and next – diagnostics requires the efficient cooperation of specialists from different fields: power plant staff should deliver data and technical documentation, diagnostic experts are responsible for modeling the process and drawing conclusions, results should be presented in a comprehensible way for the power plant experts and management; in practice, those tasks are executed with a set of heterogeneous tools, making the whole process hard to manage and inefficient. Therefore, the VPP environment is tailored for proper emulation of power unit functionality including: (i) a flexible structure enabling multiple configurations, (ii) the ability to import real data acquired at the object, (iii) the possibility to store models of a single component in different versions, (iv) the ability to achieve performance close to real time if model complexity is moderate, (v) the ability to present results in advanced and simplified forms, for experts and operational staff of power plants, respectively.

The structure of this paper is as follows. In the first section, the relevant aspects of constructing feedwater heaters are discussed together with functionalities of the model's underlying assumptions and simplifications. The second section provides literature survey. The third and fourth section describe six- and four-volume heater models' underlying assumptions as well as limitations. The last section is the summary.

1. FIRST-PRINCIPLE BUT DATA-DRIVEN MODEL OF A FEEDWATER HEATER

Investigation of power plant dynamics requires detailed models comprising sub-models representing particular components of a plant. These models are based on first-principle equations (e.g. mass, momentum and energy balance) that involve phenomenological correlations, like heat transfer coefficients. Such models are commonly utilized to gain an understanding of physical processes and also in process efficiency optimization. These models are knowledge models, thanks to which process dynamics can be understood. The complexity of these models may differ depending on the modeling purpose, ranging from compact, lumped-parameter models capturing only the first-cut dynamics, through moderately complex ones up to complex, large-scale, distributed-parameter models. In this

context, a feedwater heater, as one of the components of a power plant, requires at least a moderately complex model to capture its fundamental thermodynamic processes. The proposed model applies three categories of parameters, geometrical, physical and phenomenological. Geometrical parameters are deduced from construction or operational documentation. Nevertheless, models with deduced parameters are always biased, to some degree, by imprecision caused by the fact that a lumped-geometry model is used instead of a distributed-geometry one. The level of inaccuracy that is acceptable depends on the modeling purpose, available geometrical data and user preferences. Physical parameters can also be defined based on available documentation and, similarly to geometrical parameters, are also prone to the same error type during aggregation of a distributed-parameter representation into a lumped-parameter representation, e.g. a spatially distributed mass of a heater construction. The third category, the phenomenological parameters, describe physical processes, such as transfer or loss of energy, and are typically functions of functions of other sub-parameters, such as type of heat conduction surface, type of fluid, its density and velocity of the fluid flow. First-principle modeling is an excellent tool for understanding the physical phenomenon, however, it is insufficient for the fault detection purpose [5]. The reason for this is the lack of any formal approach allowing the model parameters to be updated according to the operational data. The authors noticed those limitations during the implementation of a large-scale model of a power unit [4]. First-principle models are frequently adjusted by trial-and-error, which can lead to non-optimal results. In order to avoid deficiencies of the trial-and-error approach, a formalized mathematical method using optimization techniques to minimize the error criterion, and find optimal values of tunable model parameters of a heater model, was developed and is described in the second part of this work. The approach proposed herein assumes that the number of tunable parameters is small compared to the number of known parameters. This, however, affects the correctness of the first-principle approach since, for example, the heat transfer phenomenon is treated using a combined coefficient which covers conduction, convection, and radiation phenomena. It is believed that the smaller the number of parameters, the more accurate the model and the faster the convergence of the algorithm used for model adjustment. To this end, the Fault Detection and Isolation (FDI) approach, based on the first-principle models, enables physics-based residuals, which have direct interpretation like trends in values of the heat transfer coefficients, to be generated

2. LITERATURE SURVEY

Heaters are key elements of the feedwater regeneration process, which is essential for the efficiency of a power plant. Heaters are shell-and-tube type recuperators installed in a power station plant between the condenser and the boiler, and serve to preheat the feedwater in a steam-water circuit by transferring energy from the steam to the feedwater [6-7]. The steam flows from the low- and high-pressure sections of the turbine and is directed into the heaters, where condensation occurs on the tubes and the heat is transferred to the feedwater [8]. The models presented here can serve for both types of heaters, i.e. low-pressure and high-pressure ones. From a physical point of view, a feedwater heater is a heat exchanger which transfers thermal energy from three-phase liquid (i.e. water, wet, and dry steam) to one-phase liquid (water feeding a boiler). Feedwater heaters are typically designed as two zones or three zones with a condensing section, desuperheater and integral subcooler. A mathematical description of the heat exchange process between two- or three-phase fluids is given in [9], and [10]. In turn, extended taxonomy of heat exchangers and a description of the heat exchanger design process, along with related engineering and constructional details is given by Shah and Sekulic [11] and Kuppan [12]. The role in power plant installations and a description of constructional details of feedwater heaters is given by Shah et al. [13] and Drbal et al. [6]. Numerical reliability aspects of modeling and simulation are raised by Henrik and Olsson in [14]. Furthermore, a simplified method of calculating the heat flow through a two-phase heat exchanger is described in [15]. Application of system identification techniques in estimating parameters of a heat exchanger working with a liquid medium is described in [16]. Boniventto et al. [17] discuss aspects of the predictive control vs. the PID control of an industrial heat exchanger. Focusing only on heaters operating in power plants, one can study an analysis of the influence of feedwater heaters on the operational costs of a steam power plant in [18-19]. Additionally, heater maintenance and typical operational malfunctions are described, for instance, by Andreone and Yokell in [20]. An engineering case-driven example of an implemented model of a steam-to-water heater is given by Hiltbrand and Choe [21], where a simulation model of the heater draining system is proposed towards improving the plant reliability. A simulation study of a condensate level control was presented in [7] where aspects of a feed-forward vs. a feedback control were highlighted. Heater models are also discussed as aspects of modeling power units; an example is a modular system consisting of numerous components utilized in [22] in building large-scale models of a power unit. From this

perspective, an advanced heater model is also discussed by Alessandri et al. [23]. In this model, the cavity is divided into three control volumes corresponding to (i) the desuperheating area, (ii) the condensing area, and (iii) the subcooling area. In the desuperheating area, the superheated steam is cooled down through heat exchange with the feedwater flowing in the tube-bundle until it reaches the saturated steam condition. In the condensing area the saturated steam condenses, i.e. the transition of vapor to liquid occurs, while in the subcooling area the condensed steam and the drain coming from the downstream heaters undergo a process of heat exchange with the feedwater. The model involves an assumption that the heat exchange surface between the cavity and the fluid and the tube bundle is fixed in the desuperheating area, with the heat exchange magnitude depending on the condensing and subcooling areas. The heater model discussed in this paper has a structure similar to the one considered in Alessandri et al. [23]. However, the version considered in this paper was formulated without the assumption that the heat exchange area for the desuperheating volume is fixed. The proposed model describes the behavior of the three-phase fluid inside the heater cavity using the equations for the conservation of the mass of drain water, the conservation of the mass of water and steam, and the conservation of the energy of subcooled water. Moreover, the model describes the behavior of the fluid in the tube-bundle by heat exchange in the desuperheating, condensing, and subcooling volumes. The heater model consists of two separate circuits, i.e. steam-condensate circuit and feedwater circuit. The steam circuit captures a highly nonlinear and coupled process of mass and energy accumulation in steam and water. On the other hand, the feedwater circuit only considers the energy accumulation process for water, and thus the differential equations have a simple linear form, which does not require significant computational power. Therefore, model reduction, a topic of this paper, is focused on the steam circuit.

The process of model development is described in detail in Sections 3+4. Two simplifications of a steam circuit model are considered. The first simplification not discussed in this paper involves reduction of the number of equations in the initial six-volume model. The second simplification of the model, presented in more detail in Section 4, is a four-volume model.

This section discusses the methodology and development stages in the formulation and simplification of the feedwater heater model. The development was initiated with a six-volume model and ended up with a four-volume one. A schematic representation of two versions of the heater models discussed is shown in Figures 1-2, respectively.

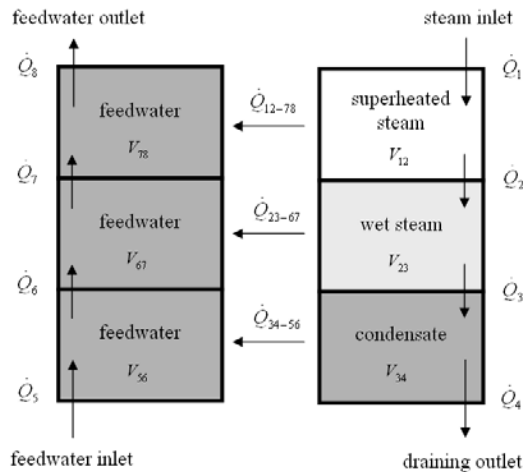


Fig. 1. Schematic representation of heat energy transfer in the six-volume heater model

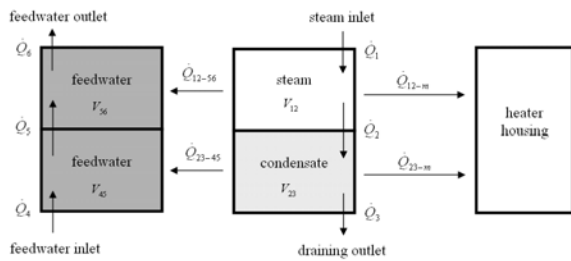


Fig. 2. Schematic representation of heat energy transfer in the four-volume heater model

The particular control volumes are defined by input and output variables, namely mass flow rate, pressure and enthalpy. For instance, the control volume V_{12} is characterized by the input enthalpy h_1 and output enthalpy h_2 as indicated by the arrows in Figures 1+2. Heat energy leaving the control volume is calculated as a product of the enthalpy and mass flow rate

$$\dot{Q}_2 = h_2 \cdot \dot{m}_2 \quad (1)$$

The transfer of heat energy between the corresponding control volumes V_{12} of the steam circuit and the control volume V_{78} of the feedwater circuit is described by the formula (2). This uses logarithmic means temperature difference for counterflow conditions under the assumption of uniform physical properties of the tube-bundle metal and longitudinal heat conduction in both the pipe metal and the fluid

$$\dot{Q}_{12-78} = k_{12-78} \cdot A_{12-78} \cdot \frac{(T_1 - T_8) - (T_2 - T_7)}{\ln\left(\frac{T_1 - T_8}{T_2 - T_7}\right)} \quad (2)$$

where the heat exchange area is a non-linear function of the heater height (volume of the heater cavity). The assumption of uniform and average

enthalpy distribution within the control volumes of the heater is constituted by the following equation of internal energy in particular control volumes, as follows:

$$H_{12} = m_{12} \cdot (h_1 - h_2) \quad (3)$$

The same formulation of equations should be repeated for the remaining control volumes in both cases of the six- and four-volume heater models.

The computation of a heater model requires many steam property evaluations at each step of the solver, which integrates the differential equations in an iterative manner. It is necessary for one or more properties to be evaluated from different couples of entry variables, typically (p, h) , and (p, T) , where p is the pressure, h enthalpy, and T temperature. In some cases, viscosity, conductivity and thermodynamic partial derivatives, such as specific heats at the constant pressure c_p or line derivatives along the saturation curve, are required. These water-steam fluid properties are evaluated using look-up tables based on empirical formulas which are the implementation of the IAPWS IF97 standard [25]. The look-up tables provide accurate data for water, steam and mixtures of water and steam for the pressure range of 0-100 MPa and for the temperature range of 0-2000°C.

3. SIX-VOLUME HEATER MODEL

The feedwater heater model consists of two separate flow circuits for steam-condensate and feedwater respectively. Equations (4-8) describe the steam circuit model while Equations (9-11) describe the feedwater circuit model. In the steam-condensate circuit model, Equation (4) is formulated for the conservation of the energy in the draining volume. This equation follows from the assumption concerning uniform distribution of the water density(condensate). The volume V_{34} of the drain chamber is obtained from the difference between the total volume of the shell cavity and the space allocated by the steam. Equation (4) for the conservation of the energy in the subcooling volume V_{34} gives

$$\frac{dH_{34}}{dt} = \dot{Q}_3 - \dot{Q}_4 + V_{34} \frac{dp_{34}}{dt} - \dot{Q}_{34-56} \quad (4)$$

The term \dot{Q}_4 represents the outgoing energy rate of the condensate from the actual heater to the upstream heater corrected by the term of the incoming energy and mass rate of the condensate from the downstream heater. Equations (5-6) for the conservation of the energy in the desuperheating

and condensing volumes are formulated separately for the steam volumes V_{12} and V_{23} respectively.

$$\frac{dH_{12}}{dt} = \dot{Q}_1 - \dot{Q}_2 + V_{12} \frac{dp_{12}}{dt} - \dot{Q}_{12-56} \quad (5)$$

$$\frac{dH_{23}}{dt} = \dot{Q}_2 - \dot{Q}_3 + V_{23} \frac{dp_{23}}{dt} - \dot{Q}_{23-67} \quad (6)$$

where $p_{34}=p_{23}=p_{12}$ is equal to the inlet steam pressure p_1 . Equations (7-8) for the conservation of the mass in the desuperheating and condensing volumes are formulated separately for m_{12} and m_{23} respectively.

$$\frac{dm_{12}}{dt} = \dot{m}_2 - \dot{m}_1 \quad (7)$$

$$\frac{dm_{23}}{dt} = \dot{m}_3 - \dot{m}_2 \quad (8)$$

In the feedwater circuit model (Fig. 1), the following equations

$$\frac{dH_{56}}{dt} = \dot{Q}_6 - \dot{Q}_5 + V_{56} \frac{dp_{56}}{dt} + \dot{Q}_{34-56} \quad (9)$$

$$\frac{dH_{67}}{dt} = \dot{Q}_7 - \dot{Q}_6 + V_{67} \frac{dp_{67}}{dt} + \dot{Q}_{23-67} \quad (10)$$

$$\frac{dH_{78}}{dt} = \dot{Q}_8 - \dot{Q}_7 + V_{78} \frac{dp_{78}}{dt} + \dot{Q}_{12-78} \quad (11)$$

where $p_{78}=p_{67}=p_{56}$ equal to the inlet feedwater pressure p_5 are formulated for the conservation of the energy in the volumes corresponding to volumes of the steam circuit model, i.e. draining, condensing, and superheating volumes. The level of the condensate inside the heater is calculated using the following formula

$$x = \frac{V_{34} - V_{340}}{A_{con}} \quad (12)$$

where A_{con} is the area of a condensate surface in a heater cavity and V_{340} is the nominal height of the condensate volume.

As shown in Equations (4-8), considering three steam fractions separately leads to a system of five highly-coupled differential equations for a steam circuit. Nonlinear properties of the steam-water fluid are major contributors to the complexity of the nonlinear form of the model.

4. FOUR-VOLUME HEATER MODEL

The four-volume model of a heater involves further simplifications regarding the steam circuit model of the six-volume model (Fig. 2). In the four-volume model, the desuperheating zone is neglected thanks to the assumptions that the steam, after entering the heater cavity, immediately turns into the condensing phase. This assumption implies that the volume V_{12} is negligible so that the heat exchange area between the desuperheating and the corresponding feedwater section approaches zero.

In turn, the heat transfer rate \dot{Q}_{12-78} between the volumes V_{12} and V_{78} also approaches zero (see Fig. 1). Nevertheless, the energy rate of the incoming steam is taken into account entirely by the energy balance of the condensing zone V_{23} . The assumption is valid when the mass of the superheated steam is relatively small in comparison with the entire mass of the steam in the heater cavity. Such conditions are true for typical power unit installations equipped with low- and high-pressure lines of feedwater heaters.

The model formulated in this section constitutes the form arising from the discussed assumptions. In the new four-volume model, that zone is replaced by the condensing zone of the same nomenclature of indexes. Equation (13), describing conservation of the energy in the condensing and subcooling volumes, is formulated separately for the steam volumes V_{12} and V_{23} , respectively. Equation (13), describing conservation of the mass in the condensing and subcooling volumes, is formulated separately for the mass of steam m_{12} and mass of water (condensate) m_{23} , respectively.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \frac{dm_{12}}{dt} \\ \frac{dH_{12}}{dt} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial m_{12}}{\partial V_{12}} & \frac{\partial m_{12}}{\partial p_{12}} \\ \frac{\partial H_{12}}{\partial V_{12}} & \frac{\partial H_{12}}{\partial p_{12}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dV_{12}}{dt} \\ \frac{dp_{12}}{dt} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dV_{12}}{dt} \\ \frac{dp_{12}}{dt} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

The volume V_{12} and the pressure p_{12} of the condensate inside the steam cavity were selected as the state variables and are related to the mass and the energy flow rates via the matrix of partial derivatives. Equation (13) can be rearranged in the following form

$$\begin{aligned} e_{11} \frac{dV_{12}}{dt} + e_{12} \frac{dp_{12}}{dt} &= \dot{m}_1 - \dot{m}_2 \\ e_{21} \frac{dV_{12}}{dt} + e_{22} \frac{dp_{12}}{dt} &= \dot{Q}_1 - \dot{Q}_2 - \dot{Q}_{12-56} - \dot{Q}_{23-45} \end{aligned} \quad (14)$$

where particular elements of the partial derivative matrix, including the assumption that $\frac{\partial \rho_{12}}{\partial V_{12}} \equiv 0$,

$\frac{\partial V_{12}}{\partial p_{12}} \equiv 0$, yield

$$\begin{aligned}
 e_{11} &= \frac{\partial m_{12}}{\partial V_{12}} = \frac{\partial(\rho_{12} \cdot V_{12})}{\partial V_{12}} = \\
 &= \rho_{12} + \frac{\partial \rho_{12}}{\partial V_{12}} V_{12} = \rho_{12} \\
 e_{12} &= \frac{\partial m_{12}}{\partial p_{12}} = \frac{\partial \rho_{12}}{\partial p_{12}} \cdot V_{12} + \frac{\partial V_{12}}{\partial p_{12}} \cdot \rho_{12} = \\
 &= \frac{\partial \rho_{12}}{\partial p_{12}} \cdot V_{12} \\
 e_{21} &= \frac{\partial H_{12}}{\partial V_{12}} = \frac{\partial(\rho_{12} V_{12} h_{12})}{\partial V_{12}} \\
 &= \rho_{12} h_{12} + \frac{\partial \rho_{12}}{\partial V_{12}} h_{12} V_{12} + \frac{\partial h_{12}}{\partial V_{12}} \rho_{12} V_{12} = \\
 &= \rho_{12} h_{12} - p_{12} \\
 e_{22} &= \frac{\partial H_{12}}{\partial p_{12}} = \frac{\partial(\rho_{12} V_{12} h_{12})}{\partial p_{12}} = \frac{\partial \rho_{12}}{\partial p_{12}} V_{12} h_{12} + \\
 &+ \frac{\partial V_{12}}{\partial p_{12}} \rho_{12} h_{12} + \frac{\partial h_{12}}{\partial p_{12}} \rho_{12} V_{12} - V_{12} = \\
 &= V_{12} \left(h_{12} \frac{\partial \rho_{12}}{\partial p_{12}} + \rho_{12} \frac{\partial h_{12}}{\partial p_{12}} \right) - V_{12}
 \end{aligned} \tag{15}$$

and, additionally,

$$V_{12} = V_{total} - V_{23} \text{ then } dV_{12} = -dV_{23} \tag{16}$$

The mass of the water in the condensate cavity is determined from the assumption written as follows

$$\begin{aligned}
 \text{if } \frac{dm_{12}}{dt} &= \dot{m}_1 - \dot{m}_2, \text{ and } \frac{dm_{23}}{dt} = \dot{m}_2 - \dot{m}_3, \\
 \text{then } \frac{dm_{23}}{dt} &= \dot{m}_1 - \dot{m}_3 - \frac{dm_{12}}{dt}
 \end{aligned} \tag{17}$$

Variables obtained from (17) are substituted to Equations (14)

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_3 - \dot{m}_2 &= e_{11} \frac{dV_{12}}{dt} + e_{12} \frac{dp_{12}}{dt} \\
 \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_2 h_2 - \dot{Q}_{12-m} - \dot{Q}_{23-m} &= \\
 = e_{21} \frac{dV_{12}}{dt} + e_{22} \frac{dp_{12}}{dt}
 \end{aligned} \tag{18}$$

Unknowns are determined as follows

$$\begin{aligned}
 dp_{12} &= \frac{m_3(h_3 - h_2) - (e_{21} - e_{11}h_2) \frac{dV_{12}}{dt}}{(e_{22} - e_{12}h_2)} \\
 &+ \frac{-\dot{Q}_{12-m} - \dot{Q}_{23-m}}{(e_{22} - e_{12}h_2)} \\
 \dot{m}_2 &= \frac{(e_{12}e_{21} - e_{11}e_{22}) \frac{dV_{12}}{dt}}{(e_{22} - e_{12}h_2)} \\
 e_{12} \frac{(\dot{Q}_{12-m} - \dot{Q}_{23-m}) - (e_{12}h_3 - e_{22})\dot{m}_3}{(e_{22} - e_{12}h_2)}
 \end{aligned} \tag{19}$$

Equations (20-21) are formulated for the conservation of the energy in the draining volumes, assuming uniform density of the feedwater.

$$\frac{dH_{45}}{dt} = \dot{Q}_4 - \dot{Q}_5 + \dot{Q}_{23-45} \tag{20}$$

$$\frac{dH_{56}}{dt} = \dot{Q}_5 - \dot{Q}_6 + \dot{Q}_{12-56} \tag{21}$$

The level of the condensate inside the heater is calculated using the following formula

$$x = \frac{V_{23} - V_{230}}{A_{con}}, \tag{22}$$

where A_{con} is the area of the condensate surface in a heater cavity and V_{230} is the nominal height of the condensate volume. The heat transfer from the heater cavity to the metal of the heater was additionally taken into account since the numerical performance of the model was significantly improved. The heat transfer is formulated using conservation of energy as follows

$$\frac{dH_m}{dt} = \dot{Q}_{12-m} + \dot{Q}_{23-m} \tag{23}$$

where

$$H_m = m_m \cdot c_{pm} \cdot T_m \tag{24}$$

A model of the controller uses the feedback from the condensate level sensor to control the opening of the condensate outlet drain. A controller uses a group of gain controls, i.e. proportional (P), integral (I), and derivative (D).

Equations of the feedwater model were implemented in a convention required by Simulink [25].

5. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The paper presents a feedwater heater model intended for model-based diagnostics compromising performance and functionality, which is, in its advanced-physics form, very complex and deteriorates the execution time of a whole power plant model. An advanced heater model allows the thermodynamics of the heat exchange process to be correctly captured, however, the model complexity does not enable on-line simulation of a complete power block model. Thus, the simplified heater models were proposed to reduce numerical complexity and model tuning effort. The goal behind model simplification was to develop a model capable of achieving performance at the level permitting real-time simulation, yet at the same time not dramatically sacrificing accuracy. The proposed simplification of the heat exchanger model has provided the greatest improvement towards numerical stability of a power unit model and significantly shorter computation time.

The development process of a feedwater heater model is presented in three steps through Sections 3+4. The initial six-volume model was used as the starting point for the simplification process. The four-volume model described in this paper has the potential to increase the level of understanding of modeled processes and play a diagnostic role. Another advantage of the four-volume model is that the model is characterized by only two adjustable coefficients instead of three for the six-volume model. The first one describes the thermal energy transfer (conduction, convection, and radiation) between the condensate and the feedwater, while the second one describes the thermal energy transfer between the steam (the mixture of superheated and wet steam) and the feedwater. Taking advantage of the better numerical performance of a four-volume model, heat accumulation in the heater jacket was implemented to allow simulation of a start-up operation.

The validation process and application of a feedwater heater model will be presented in the second part of this work.

REFERENCES

- [1] H. van Putten, P. Colonna, *Dynamic Modeling of Steam Power Cycles. Part I – Simulation of a Small Simple Rankine Cycle System*, Applied Thermal Engineering 27 (2007) 467-480.
- [2] H. van Putten, P. Colonna, *Dynamic Modeling of Steam Power Cycles. Part II – Simulation of a Small Simple Rankine Cycle System*, Applied Thermal Engineering 27 (2007) 2566-2582.
- [3] T. Barszcz, *Virtual Power Plant in Condition Monitoring of Power Generation Unit*, Proceedings of the 20th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, Faro, Portugal 2007, June 13–15.
- [4] T. Barszcz, P. Czop, *Methodologies and Applications of Virtual Power Plant - New Environment for Power Plant Elements Modeling*, Institute of Sustainable Technologies, Radom 2007.
- [5] R. J. Patton, P. M. Frank, R. N. Clark (eds.), *Issues of fault diagnosis for dynamic systems*. Springer-Verlag, London, 2000
- [6] M. Youssef, *Header type feedwater heaters as retrofits for cycling units*, Power-Gen Europe 93, Paris 1993, May 25-27.
- [7] BW. Surgenor, *A Simulation Study of a Feedwater Heater Level Control*. Summer Computer Simulation Conference SCS, Chicago 1985.
- [8] L. Drbal, K. Westra, P. Boston, *Power plant engineering*, Springer 1995.
- [9] J.H. Lienhard IV, J.H. Lienhard V, *A heat transfer textbook*, Phlogiston Press, 2004, US.
- [10] G.F. Naterer, C.H. Lam, *Transient Response of Two-Phase Heat Exchanger With Varying Convection Coefficients*, Journal of Heat Transfer, 128 (2006) 953-962.
- [11] R.K. Shah., D.P. Sekulic, *Fundamentals of Heat Exchanger Design*, John Wiley and Sons 2000.
- [12] T. Kuppan, *Heat Exchanger Design Handbook, Mechanical Engineering*, Marcell Dekker Inc 2000.
- [13] R.K. Shah, E.C. Subbarao, R.A. Mashelkar, *Heat transfer equipment design*, Taylor & Francis 1998.
- [14] K. Henrik, A. Olsson, *Model Order Reduction of a Heat Exchanger Model*, Numerical Analysis and Computer Science (NADA) Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden 2005..
- [15] Y.G. Yohanis, O.S. Popel, SE. Frid, *A simplified method of calculating heat flow through a two-phase heat exchanger*, Applied Thermal Engineering, 25 (2005) 2321–2329.
- [16] G. Jonsson, O.P. Palsson, *An Application of Extended Kalman Filtering to Heat Exchanger Models*, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 116 (2) (1994) 257-264.
- [17] C. Bonivento, P. Castaldi, D. Mirota, *Predictive Control vs PID Control of an Industrial Heat Exchanger*, The 9th Mediterranean Conference on Control and Automation, Dubrovnik, Croatia 2001, June 27-29.

-
- [18] J. Szargut, *Influence of Regenerative Feed Water Heaters on the Operational Costs of Steam Power Plants and HP Plants*,. Int. J. of Thermodynamics, 8 (3) (2005) 137-141.
- [19] K. Roth, V. Scherer, K. Behnke, *Enhancing the dynamic performance of electricity production in steam power plants by the integration of transient waste heat sources into the feedwater pre-heating system*. Int. J. Energy Technology and Policy, 3 (1/2) (2005) 50-56.
- [20] C.F. Andreone, S. Yokell, *Tubular Heat Exchanger Inspection, Maintenance, and Repair*, McGraw Hill 1995.
- [21] D.W. Hiltbrand, G.W. Choe, *Heater drains system redesign at Comansche Peak using the RETRAN-03 transient analysis computer code*, Heat Transfer, Proceeding of 11th IHTC, vol. 6, Kyongju, Korea 1998.
- [22] B. Elmegaard, *Simulation of Boiler Dynamics - Development, Evaluation and Application of a General Energy System Simulation Tool*, PhD Thesis ET-PhD 99-02, Technical University of Denmark, 1999.
- [23] D. Flynn (eds.), *Thermal Power Plants - Simulation and Control*, The Institution of Electrical Engineers, London 2000.
- [24] M. Holmgren, X Steam for Matlab, 2006, available: [http:// www.x-eng.com](http://www.x-eng.com). Author1 A.: Title of a paper. *Journal of Science*, 1997, Vol. 1, No. 2, pp. 78-94.

Dr. **Piotr Czop** received his M.Sc. in 1998 and Ph.D. in 2001, both from the Silesian University of Technology. He worked on R&D projects at Energocontrol Ltd. and AITECH Ltd. during 1998-2004. He joined Tenneco Automotive Eastern Europe Ltd. in 2004, where he is responsible for the Control & Measuring Systems department. His research interests include modeling and identification of multi-domain systems consisting of hydraulic, electrical and mechanical components

DEMONSTRATION OF A GREY-BOX APPROACH TOWARDS THE DIAGNOSTICS OF A FEEDWATER HEATER (PART II) – MODEL TUNING BASED ON OPERATIONAL DATA

Piotr CZOP

AGH University of Science and Technology, Department of Robotics and Mechatronics
Al. Mickiewicza 30, piotr.czop@labmod.com

Summary

Work related to the first-principle modeling of a boiler feedwater heater operating in a power unit is presented, along with theoretical discussion concerning its structural simplifications, parameter estimation, and dynamical validation. The objectives of this work are as follows: (i) formulate a moderately complex first-principle model of a feedwater heater to reproduce operational measurements in real-time simulations, (ii) develop a tuning method for this model, (iii) propose key indicators of heater performance using a model-based approach, and finally (iv) automate the calculation process of the indicators. The first objective has been addressed in the first paper while the remaining objectives are dealt with in this paper. The paper discusses a nonlinear least-square optimization technique used to adjust the phenomenological parameters of the feedwater heater model, i.e. heat transfer coefficients. The model variables (e.g. variability of the power rate of energy exchange) and estimated parameter values were used to formulate key performance indicators intended for a model-driven diagnostics approach. The computational process was organized in an iterative process of updating model parameters and indicators. The validation was successfully performed using operational data from a 225MW coal-fired power unit.

Key words: power plant, feedwater heater, modeling, system identification

Streszczenie

Artykuł przedstawia proces modelowania podgrzewacza regeneracyjnego pracującego w systemie bloku energetycznego z wykorzystaniem równań fizycznych. Artykuł zawiera dyskusję dotyczącą uproszczeń struktury modelu, estymacji jego parametrów oraz walidacji. Celami pracy jest: (i) sformułowanie umiarkowanie złożonego modelu wymiennika odtwarzającego dane pomiarowe w rzeczywistej skali czasu, (ii) przedstawienie metody strojenia modelu, (iii) zaproponowanie wskaźników użyteczności podgrzewacza na podstawie podejścia wspartego modelem, oraz (iv) automatyzacja procesu wyznaczania tych wskaźników. Pierwszy z celów zawiera się w pierwszej części pracy, a pozostałe w części drugiej. Artykuł zawiera dyskusję wyników zastosowania nieliniowej metod najmniejszych kwadratów w celu dostrojenia parametrów fenomenologicznych modelu podgrzewacza wody zasilającej, tj. współczynników wymiany ciepła. Zmienne modelu (np. chwilowy transfer energii) oraz wartości estymowanych parametrów zostały użyte w celu sformułowania wskaźników odpowiednich dla diagnostyki bloku energetycznego wspartej modelem. Proces obliczeniowy został zorganizowany w sposób iteracyjnego uaktualniania parametrów modelu oraz wskaźników, na podstawie danych operacyjnych pochodzących z 225 MW bloku opalanego węglem kamiennym.

Słowa kluczowe: elektrownia, podgrzewacz regeneracyjny, modelowanie, identyfikacja systemów.

INTRODUCTION

Recently, two trends concerning the maintenance of power plants have been noticeable in the market. The first trend concerns the so-called “smart maintenance” strategy to outsource maintenance services in small- and mid-scale power plants. This is done in order to minimize the involvement of the in-house resources to only necessary and basic maintenance activities. In this respect, leading Original Equipment Manufacturers (OEMs) of power plant equipment (turbine, control system, generator) offer to such power plants services of remote monitoring and continuous plant follow-up

in the form of maintenance packages involving third-parties’ equipment [1]. Typically, smart maintenance agreements oblige service providers to support power plants in achieving designed performance with more operational flexibility and better control of the risk of operational interruptions. Implementing a “smart maintenance” strategy ensures reliable daily operation of power units and provides, essential for the power plant, availability of advanced engineering knowledge in case any malfunction or severe failure mode occurs. Such a maintenance strategy requires vital components and configuration settings to be monitored remotely and data to be automatically logged. Process data are

available on-line to the service center for trending and analysis against fleet operating characteristics [1]; process parameters may be viewed and controlled by software systems, and analyzed virtually from remote location systems featuring multiple diagnostic tools related to tracking critical machinery parameters and enabling early warning notification to be communicated, and therefore preventive actions to be undertaken. The second trend concerns the tendency to concentrate the research staff, development laboratories and knowledge in engineering centers, and is becoming clearly recognizable in the market. These integrated resources can provide daily monitoring services remotely to many power plants under a "smart maintenance" strategy and allow maintenance costs to be significantly reduced, flex engineering and maintenance resources to be utilized with higher flexibility, and risk of failure to be reduced. From a research and development perspective, "smart maintenance" stimulates development of model-based methodologies that create high-level physical insight into the monitoring process and defines new key indicators of process performance. For instance, a heat transfer coefficient is a high-level indicator, as opposed to low-level indicators measured directly by the plant instrumentation system, e.g. pressure or temperature. Nevertheless, models require measurements of numerous variables for which a well-developed instrumentation and software infrastructure has to be available in power plants. Therefore, engineering centers providing "smart maintenance" services tend to equip monitored power plants with a number of sensors greater than justified by usual power plants safety and availability requirements. Such investments in infrastructure are paid back by savings in time and costs related to shortening the reaction time in case of a failure mode, as well as a decreased number of direct interventions in power plants. Additionally, only the procedure for fixing a failure mode is communicated to the power plant without engaging highly skilled engineering resources in analyzing the situation directly in the power plant. Development of a model-based approach is nevertheless costly, and is profitable only when knowledge is concentrated and utilized simultaneously for the monitoring of many power plants. This requires not only advanced engineering knowledge but also well-organized business and information processes.

The method, involving the combination of first-principle and data-driven approaches towards assessing efficiency and diagnosing power units, is presented in this paper. The methodology proposed herein allows physical characteristics of a feedwater heater to be reconstructed in order to analyze performance using key process indicators. The power of this approach lies in tracking key process indicators by means of instantaneously adjusting, based on process data, parameters of the first-

principle model developed in [2]. The method is called the greybox approach, to indicate the fact that it combines the "white box" approach, which is based on analytical physical models, but requires knowledge of several detailed parameters of the machine, and the "black box" approach, which is purely based on data, but does not yield any physically interpretable parameter values.

Models developed using the greybox method reconstruct estimates of the physical process, such as the amount of exchanged heat energy (i.e. transferring power) that, in turn, enable dynamic energy balances of components (e.g. feedwater heater) to be created. These power balances can be integrated into a complete dynamic energy balance of a power unit and enable process imperfections (e.g. hysteresis) to be visualized. These imperfections, corresponding to energy wastage in the power generation process, contribute to the overall efficiency of a power unit. A decrease in the performance of components may also indicate a technical issue resulting from a faulty mode or non-optimal settings.

The method proposed in this work is not intended to detect severe faults, which activate the safety systems of a power unit; but aims at detecting relatively slow, i.e. of hours or days, changes in processes, e.g. internal leakage through a cracked pipe. A key process indicator, namely the power rate of energy exchange in a component reflects such a fault, enabling first-level analysis and indicating deviation from the targeted efficiency. The second-level analysis, including utilization of the engineering expertise and technical indicators which are reconstructed parameters of a first-principle model, e.g. heat transfer coefficients, energy heat exchange rates, enthalpies, is performed. Investigations of this kind can be supported by process and control data, e.g. a tendency of the system to deviate from a required setpoint of a controller. Among the greatest challenges, though beyond the scope of this paper, is definition, e.g. by means of 2D/3D graphs reflecting relationships among critical variables of patterns of key process indicators corresponding to a healthy system. These graphs require statistical bounds defining confidentiality range and involving process uncertainty to be imposed.

The structure of this paper is the following. In the first section, tuning and validation of a first-principle model of a feedwater heater are presented. The second section discusses a proposal of performance indicators of a feedwater heater, while the third section provides an exemplary case study where these indicators were obtained based on operational data from a 225MW unit. The last section is the summary.

1. TUNING OF A FEEDWATER HEATER MODEL

The procedure of model tuning consists of two in-a-loop phases: (i) simulation of a model by solving differential equations numerically, and (ii) numerical minimization in the parameter space with respect to an error-related criterion function. The function describing the error has to be a positive and decreasing function of the differences between the measurement signals and model responses. The interested reader may find more information concerning the available methods and algorithms that support identification of first-principle models in [3-4].

1.1. Estimation of model parameters

A physical model can conveniently be represented as a set of nonlinear state-space equations formulated in the continuous-time domain as:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}x(t) &= f(t, x(t), u(t), w(t); \theta) \\ y(t) &= h(t, x(t), u(t), v(t); \theta) \\ x(0) &= x_0 \end{aligned} \tag{1}$$

where the vector $f(\cdot)$ is a nonlinear, time-varying function of the state vector $x(t)$ and the input vector $u(t)$, while the vector $h(\cdot)$ is a nonlinear measurement function; $w(t)$ and $v(t)$ are sequences of independent random variables and θ denotes a vector of unknown parameters. In nonlinear systems, the state vectors and the measurement vectors may have non Gaussian distribution. The sum of squared errors is used as an error criterion. This problem is known in numerical analysis as “the nonlinear least-square problem” [3]. The objective of the estimation is to minimize the error function between the measurement signals and model responses by means of an iterative numerical technique.

1.2. Parameters of the modeled heater

A high-pressure heater denoted as XW1 was used as a reference system characterized by the operational and constructional data presented in Table 1. The heater is a part of a feedwater regeneration circuit in which feed pumps pass the condensed steam (feedwater) from a condenser through heater banks, heated by the steam extracted from the high, intermediate and low-pressure sections of a steam turbine. The condensate is pumped to the deaerator, through the bank of low-pressure heaters XN12, XN3, XN4 and XN5, and further, from the deaerator to the steam generator (boiler) through the bank of high-pressure heaters XW1, XW2 and XW3.

1.3. Settings of the Optimization and Simulation Algorithms

The simulation and optimization settings used in the parameter adjustment process are presented in Table 2. The Newton-Gauss method, `lsqnonlin(.)` routine implemented in the Optimization Toolbox of Matlab, was used to minimize the function describing the error in the measurement signals and model responses.

1.4. Adjustment of Model Parameters Based on Operational Data

The simulation model considered in this section consists of a heater model and a model equivalent to a control system installed in a power plant. The control system could not be directly reconstructed in the simulation, due to its complexity and limited relevance to the functionality required in the model (e.g. trip logic). Hence, the module maintaining a constant level of the condensate inside the heater was simplified using a PID controller model. Geometrical and physical parameters of the heater model (Table 1) were extracted from the operational documentation and were assumed to be known. Four phenomenological heat transfer parameters were identified and the two selected model responses are presented graphically in Fig. 1.

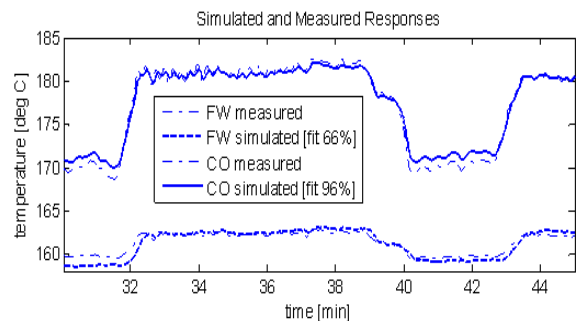


Fig. 1. Graphical representation of the results (FW – feedwater, CO – condensate)

The model reproduced the trend in the condensate and the feedwater temperatures with acceptable accuracy. The model was run and tested on a PC with an Intel Pentium 2.8GHz CPU and 4 GB RAM under Microsoft Windows XP Professional x64 Edition. Matlab version 7.2 (R2006a) was used. Convergence trajectory plots (not presented here) show a stable trend towards constant values of the parameters, which correspond to a convergence towards the minimum of the criterion function, within less than 6 iterations.

Table 1. Parameters of the high-pressure heater XW1 used in simulation.

Type of parameter	Parameter	Symbol	Unit	Value
Geometrical	Heat Exchange area – steam	A_{12}	[m ²]	$f_A(V_{12})$
	Heat Exchange area – condensate	A_{23}	[m ²]	$A_{tot} - f_A(V_{12})$
	Overall heat exchange area	A_{tot}	[m ²]	600
	Steam and condensate volume ($V_{12} + V_{23}$)	V_{total}	[m ³]	2.9
	Feedwater volume	$V_{45} + V_{56}$	[m ³]	4
	Heater height	x	[m]	10
Physical	Mass of the metal of a heater	m_m	[kg]	35500
	Specific heat of a metal	c_{pm}	[J/kg·K]	$500 \cdot 10^{-3}$
Phenomenological	Heat transfer coefficient steam to metal	k_{12-m}	[kW·m ⁻² ·K ⁻¹]	1.5
	Heat transfer coefficient condensate to	k_{23-m}	[kW·m ⁻² ·K ⁻¹]	0.6
PID-settings	Proportional	P	[-]	0.8
	Integration	I	[s]	53
	Derivative	D	[s ⁻¹]	0

Table 2. Simulation and optimization settings

Simulation		Optimization (minimization)	
Option	Value	Option	Value
Solver	ode23tb (stiff/TR-BDF2)	Gradient type	basic
Max step size	auto	Algorithm	lsqnonlin
Min step size	auto	Cost type	SSE
Zero crossing control	disable all	DiffMaxChange	0.1
Relative tolerance	auto	DiffMinChange	1E-08
Absolute tolerance	auto	Large scale	true
		MaxIter	28
		RobustCost	False
		TolCon	1E-6
		TolFun	1E-6

2. PERFORMANCE INDICATORS FOR A FEEDWATER HEATER

The range of operating conditions corresponds to the range of the power ratio of the turboset, i.e. between 140 and 225MW. Execution of the procedure for numerical adjustment of these parameters allowed values of these parameters that assure the heater model that best fits to the data to be found. The model was tested on the same PC configurations as presented in the previous section. Parameters of the feedwater heater model were updated according to the flowchart presented in Fig. 2 for low and high-pressure heaters, designated as XN4 and XW1 respectively. The results for models of both heaters are qualitatively the same, so only results for the XW1 will be presented in this section.

Parameters of the first-principle model are sequentially updated based on operational data. Every sequence of data has a length of 60 samples and corresponds to 60 minutes of operation time.

The Newton-Gauss method, lsqnonlin(.) routine implemented in the Optimization Toolbox of Matlab, used to update model parameters is sufficiently efficient, as proved in Fig. 3, to follow the operational data in the real-time mode.

Values of updated parameters are used as initial guess conditions in an algorithm adjusting model parameters for the next data sequence. As a result, the minimization algorithm has a better starting point and so a smaller number of iterations is required in each sequence. The value of an objective function error and the number of iterations are used as stopping criteria for the parameter updating process.

3. PERFORMANCE INDICATORS IN DETECTION OF ABNORMAL OPERATION OF A FEEDWATER HEATER

Two types of indicators, efficiency and technical ones, have been defined in order to assess the technical state of an object. Typically, such indicators take the form of a scalar value (e.g. amount of transferred energy) or a characteristic (e.g. power rate vs. amount of transferred energy) and allow a pattern of values corresponding to different regimes of operation (e.g. low vs. high power rate) to be defined. Bounds imposed on the pattern of normal operation of a power unit define the tolerance range beyond which the performance is unacceptable.

The diagnostic process proposed in this paper consists of two stages (i) the fault detection, and (ii) the fault recognition. Firstly, symptoms of a malfunction are detected based on variation of an efficiency indicator, i.e. by detecting the efficiency indicator crossing tolerance bounds. Secondly, a technical indicator enables a problem to be addressed more precisely. The methodology proposed herein does not eliminate the need for specialists and experts to contribute to the fault recognition process, as their role is to interpret trends in indicators. The method is an extension of available symptom indicators to provide new early warning indicators of physical meaning.

Fig. 4 presents an example of an efficiency indicator based on an operational curve, i.e. a relation of the electrical power rate to corresponding overall energy transfer rate from the steam to the feedwater (cf. left-most plot in Fig. 4).

The overall energy transfer rate can be split into the steam-to-feedwater and the condensate-to-feedwater transfer, for the upper and lower volume of a heater respectively (cf. middle and right-most plot in Fig. 4). These two energy transfer rates are governed by respective heat transfer coefficients present in the heater model. As shown in Fig. 4, data points approximately lay along a line (solid line) and are bounded by 95% confidence intervals (dashed lines). An example of technical indicators can be a hysteresis loop of the energy transfer in the steam-to-feedwater and the energy transfer in the condensate-to-feedwater, corresponding to two heat transfer coefficients used in the heater model. The size of a hysteresis loop, among others, is an indication of heat accumulation in the metal.

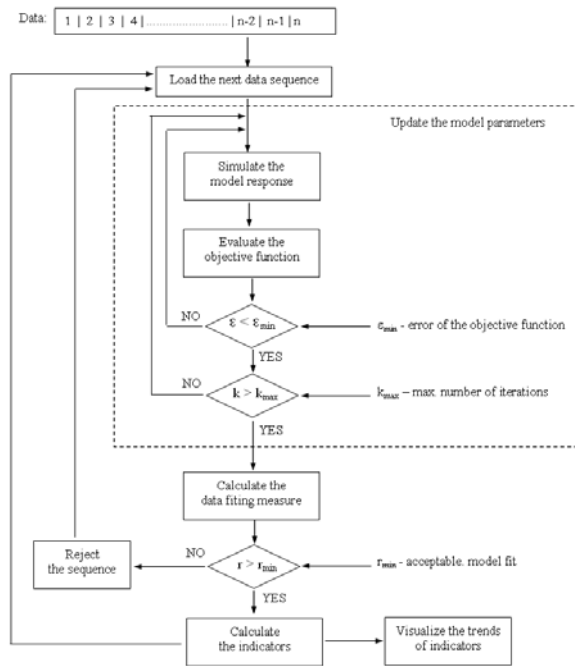


Fig. 2. Procedure of updating model parameters

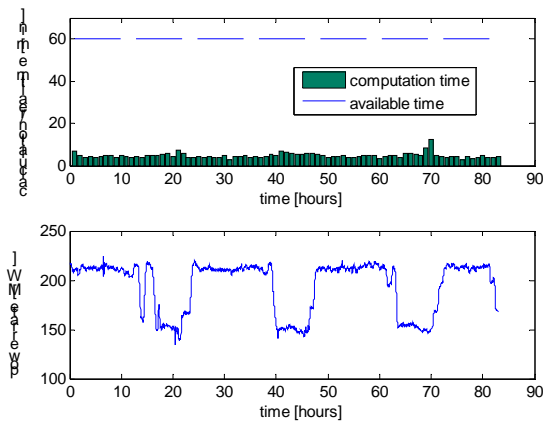


Fig. 3. Actual time vs. available real time for computations of a single heater

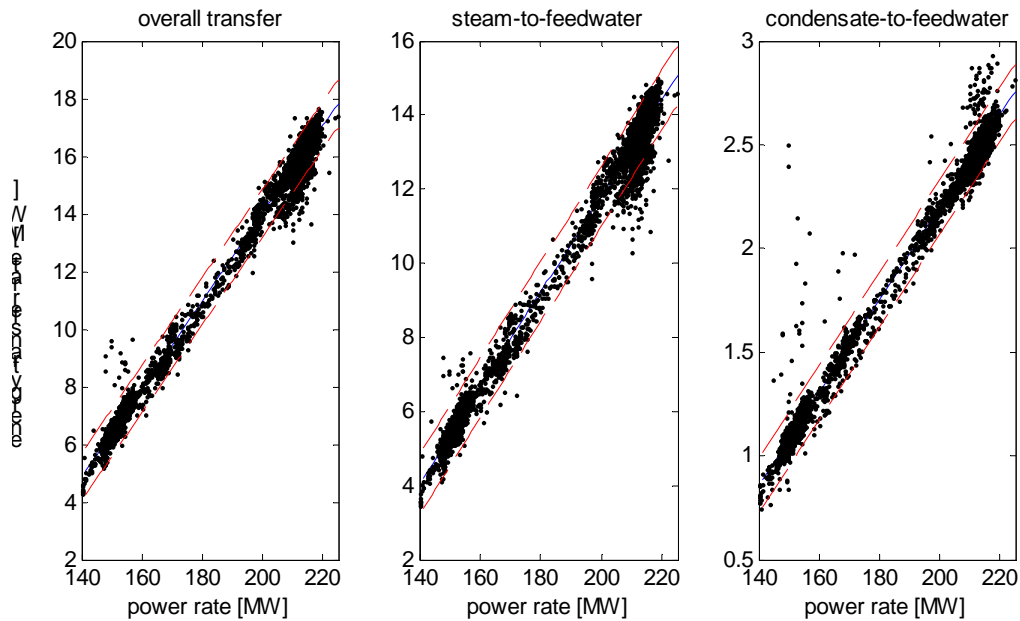


Fig. 4. Procedure of updating model parameters

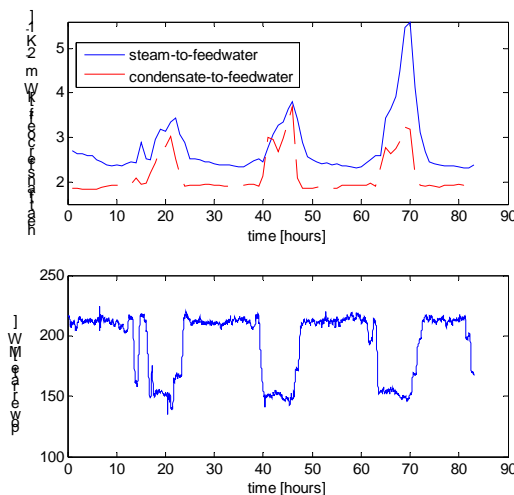


Fig. 5. Values of heat transfer coefficients over operational time

Another option for constructing a diagnostic tool is to investigate trends in heat transfer parameters versus the operational time (Fig. 5). Values of these parameters vary depending on the operating point of the power unit, however, and thus yet another possibility of constructing a technical indicator should be considered, namely the relationship between the value of the heat transfer coefficient and the temperature of the feedwater leaving the heater.

4. DISCUSSION OF RESULTS AND CONCLUSIONS

This paper focuses on the tuning and validation process of the first-principle feedwater heater model intended for model-based diagnostics as a part of the

entire model of a power unit. Moreover, the paper proposes key performance indicators which reflect operational changes in the process of heating the feedwater versus assumed statistical bounds.

The proposed model tuning approach is advocated for industrial conditions when the values of physical and geometrical parameters are known, while the values of phenomenological ones have to be adjusted as only their rough initial guess values are available. The development process of a feedwater heater model is presented in [2]. Measurement data from a 225MW coal fired unit were used to validate the model's accuracy. The validation process presented in the paper indicates that the performance in steady and transient conditions is good, achieving a correlation between the simulations and measurements at a level of 60-90%. This proves that the model can be used in further studies and the development of techniques related to model-based diagnostics.

Efficiency and technical performance indicators were formulated using a statistical approach to facilitate the recognition of specific patterns in data. Pattern-based analysis was proposed as the most suitable form of analysis because of the availability of a high amount of operational data. Pattern analysis allows a few scenarios, represented by different patterns which correspond to sequential operation of power units, to be created. A power unit can be in a few operational states corresponding to its rotational speed expressed in rpm; these states usually are: idle ($\text{rpm} = 0$), turning gear ($0 < \text{rpm} < 30$), transient ($500 < \text{rpm} < 2950$) and synchronized ($2990 < \text{rpm} < 3010$). Sequential operation of a power unit enables two groups of patterns, belonging to transient and steady operation, to be obtained. Typically, the indicators (measures)

introduced in this paper reflect nonlinear relationships and are therefore represented by first- or second-order trend curves. Parametric representation of the performance indicators allows boundary conditions to be easily imposed. These boundaries can be automatically detected and, as such, are able to be utilized in an early warning malfunction notification function. Moreover, such parametric representation facilitates the quantification of the uncertainty of the diagnosis. There are numerous statistical methods supporting the decision-making process which are based on sets of uncertain and inconsistent data [5]. Such methods should be considered to reject false alarms.

Future investigations are planned to focus on the repeatability and reproducibility of the system identification results separately, based on a number of data sets measured in similar operational conditions. Repeatability and reproducibility indicators are important from the diagnostic point of view since these indicators directly yield confidence intervals for adjusted parameters and confirm, statistically, the correctness of the proposed approach.

REFERENCES

- [1] Bachmann R, Nielsen H, Warner J, R.Kehlhofer (eds.). *Combined - Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants*, PennWell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma 1999.
- [2] Czop P.: *Demonstration of a grey-box approach towards the diagnostics of a feedwater heater (Part I) – Model development*. Journal of Diagnostics.
- [3] L. Ljung, *System identification - Theory for the User*, Prentice-Hall 1999, US.
- [4] T. Bohlin, *Practical grey-box process identification, Theory and Applications* (Advances in Industrial Control), Springer-Verlag, London 2006.
- [5] R. J. Patton, P. M. Frank, R. N. Clark (eds.), *Issues of fault diagnosis for dynamic systems*. Springer-Verlag, London, 2000

Dr. **Piotr CZOP** received his M.Sc. in 1998 and Ph.D. in 2001, both from the Silesian University of Technology. He worked on R&D projects at Energocontrol Ltd. and AITECH Ltd. during 1998-2004. He joined Tenneco Automotive Eastern Europe Ltd. in 2004, where he is responsible for the Control & Measuring Systems department. His research interests include modeling and identification of multi-domain systems consisting of hydraulic, electrical and mechanical components.

ERRONEOUS USE OF BAYES' THEOREM IN TECHNICAL DIAGNOSTIC

Paweł SZCZEPAŃSKI

paszczep@neostrada.pl

Summary

The root cause of erroneously using Bayes' theorem is considered to be a discrepancy between a *series system* and the *independence* of the failures – this *independence* being a required assumption in order to employ the theorem. To substantiate the presented ideas it was proposed to diagnosis the selected wiring equipped with a small light bulb and a battery.

Keywords: Bayes' theorem, Bayesian critique, false, diagnostics program.

BŁĘDNE UŻYCIE WZORU BAYESA W DIAGNOSTYCE TECHNICZNEJ

Streszczenie

Istotę błędu upatruje się w sprzeczności *szeregowej struktury niezawodnościowej* obiektu z *niezależnością* uszkodzeń jego elementów – *niezależnością* będącą warunkiem zastosowania wzoru Bayesa. Dla potrzeb weryfikacji przedstawionych myśli zaproponowano badanie wybranych połączeń drucików z wykorzystaniem baterijki i żaróweczki.

Słowa kluczowe: wzór Bayesa, krytyka podejścia bayesowskiego, fałsz, program diagnozowania.

1. GENEZA TEMATU

Błędu można upatrywać w metodach, gdzie zawsze diagnozuje się tylko jedną niezdatność, gdzie dostępność pomiarowo – kontrolna do każdego elementu to zasada i gdzie brak pętli i elementów wielowyjściowych to konieczne założenie. Błąd to także uzasadnione podejrzenie w metodach, których rzekome powodzenie zauważa się w diagnozowaniu obiektów typu radiolokator i samolot, przy ich zupełnej bezradności w diagnozowaniu połączeń kilku podstawowych elementów elektronicznych, ba – połączeń zwykłych drutów! W pierwszym przypadku „błąd” odnosi się do bardzo prostych w swej budowie obiektów jednoelementowych jednowyjściowych, natomiast w drugim - do tych obiektów, dla których praktyczna weryfikacja wymagałaby stosownych zezwoleń i ogromnych nakładów.

Podstawy teoretyczne wzoru Bayesa można znaleźć niemalże, w każdej pozycji literatury poświęconej w całości lub w swej części rachunkowi prawdopodobieństwa. Wydaje się, że ich studia mogą dać jasność jego zastosowań i pozwolić rozpoznać jego postać bez względu na użyty zapis. Niestety, ogromna prostota wzoru jest często zaciemniana przez szczególnie niezręczną terminologię [6], a przytaczane przykłady nie dają jednoznacznej interpretacji użytej symboliki. To rodzi nieporozumienia i wzbudza słuszny protest

przeciwko pozorowanym i niejednokrotnie kazuistycznym uzasadnieniom jego użycia.

Zagrożenia występujące w obszarze błędnego użycia wzoru Bayesa ocenia się jako bardzo wysokie, stanowiące niedostrzegalne „na pierwszy rzut oka” źródło poważnych strat w wielu dziedzinach nauki i techniki. W ostatnim dziesięcioleciu dostrzeżono to między innymi w medycynie [8], ekonometrii [9], rynku [5], psychologii [11] i hydrologii [2]. Znanie są bezpowrotne skutki jego zastosowania, objawiające się wydaniem błędnej diagnozy, błędnego orzeczenia czy też błędnej decyzji [20]. – Wartym odnotowania jest fakt, iż prawdopodobieństwa warunkowe są niezdefiniowane, gdy prawdopodobieństwo hipotezy jest równe zeru.

Uciążliwe i niejednokrotnie czasochłonne czynności, związane z odnową wskazanego elementu, nie dość, że okazują się zbędne, to na dodatek powtórzenie wyników poprzedniej diagnozy pozwala domniemywać niezdatność użytej aparatury kontrolnej, potem – być może - naruszenie zasad obsługi technicznej, a w ostateczności - zdatność wskazanego elementu. Czas upływa, a stwierdzenie tego ostatniego wymusza zwykle lokalizację uszkodzeń opartą o tzw. „intuicję inżynierską”. Dla obiektów o bardzo złożonej strukturze zadanie to - wykonywane w taki sposób - staje się praktycznie rzecz biorąc niewykonalne.

2. ISTOTA ZASTOSOWANIA WZORU BAYESA

Zamiast kolejnego wyprowadzenia wzoru Bayesa proponuje się prześledzić dość symptomatyczny przykład jego zastosowania [1]. Mniema się, że jego rozważenie pozwoli dostrzec liczne analogie z wieloma (wadliwymi niestety) opracowaniami diagnostycznymi, zgłębić jego sens i poznać istotę wnoszonych przez niego zagrożeń.

Przykład wprowadzający

Do celu oddano trzy strzały. Należy ocenić prawdopodobieństwo $P(A)$ porażenia celu, jeśli przy prawdopodobieństwach: chybiecia i trafienia jednym, dwoma i trzema pociskami:

$$P(B_0) = \frac{1}{8}, \quad (1.a)$$

$$P(B_1) = \frac{3}{8}, \quad (1.b)$$

$$P(B_2) = \frac{3}{8}, \quad (1.c)$$

$$P(B_3) = \frac{1}{8}, \quad (1.b)$$

prawdopodobieństwa jego porażenia są odpowiednio równe:

$$P(A | B_0) = 0, \quad (2.a)$$

$$P(A | B_1) = 0, \quad (2.b)$$

$$P(A | B_2) = \frac{3}{6}, \quad (2.c)$$

$$P(A | B_3) = \frac{5}{6}. \quad (2.d)$$

Choć w [1] nie podaje się pochodzenia prawdopodobieństw $P(B_i)$; $i = 0, 3$, należy tu wyraźnie powiedzieć, że wynikają one pośrednio z zastosowania zależności (3).

$$\prod_{i=1}^N (q_i + p_i); \quad q_i + p_i = 1 \quad (3)$$

której zasadniczym zadaniem jest wyznaczenie następujących jednomianów:

$$\prod_{m=1}^N p_m + \quad (4)$$

$$+ \sum_{i=1}^N \left(q_i \prod_{m=1, m \neq i}^N p_m \right) + \quad (5)$$

$$+ \sum_{\substack{i=1 \\ j=i+1}}^{i=N-1} \left(q_i q_j \prod_{m=1, m \neq i, j}^N p_m \right) + \quad (6)$$

⋮

$$+ \prod_{m=1}^N q_m \quad (7)$$

Jednomiany te, przy znajomości prawdopodobieństw q_i i p_i , (tj. – dla analizowanego przykładu – prawdopodobieństw chybiecia i trafienia poszczególnych pocisków i o liczebności

N) określają prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych zdarzeń o liczebności. Ponieważ

$$\forall i: q_i + p_i = 1 \quad (8)$$

wartość iloczynu sum (patrz zał. (3)) – z racji neutralności jedynki w procesie mnożenia – także będzie równa jedności:

$$\prod_{i=1}^N (q_i + p_i) = 1 \quad (9)$$

Dla analizowanego strzelania iloczyn tychże sum określa zał. (10):

$(p_1+q_1)(p_2+q_2)(p_3+q_3) =$	
$q_1 q_2 q_3 +$	$P(B_0)$
$+ p_1 q_2 q_3 +$	
$+ q_1 p_2 q_3 +$	$P(B_1)$
$+ q_1 q_2 p_3 +$	
$+ q_1 p_2 p_3 +$	
$+ p_1 q_2 p_3 +$	$P(B_2)$
$+ p_1 p_2 q_3 +$	
$+ p_1 p_2 p_3$	$P(B_3)$

Z podstawienia wartości $P(B_i)$; $i = 0, 3$, określonych zał. (10), i uwzględnienia równania: (8) wynika, że prawdopodobieństwa chybiecia i trafienia poszczególnymi (pojedynczymi) pociskami są sobie równe i równe 0,5 –zał (11).

$$\forall i: q_i = p_i = \frac{1}{2} \quad (11)$$

Poznanie wartości p_i i q_i wcale jeszcze nie wyjaśnia ich faktycznego pochodzenia. Być może wynikają one z umiejętności strzelca? W tym aspekcie prawdziwą zagadką pozostanie także sposób określenia prawdopodobieństw (2). Można przypuszczać, że zależą one od fizycznych właściwości celu i pocisków. Wartym zauważenia jest fakt, że suma tych prawdopodobieństw – tak jak tu – może być większa od jedności:

$$\sum_{i=0}^3 P(A | B_i) > 1 \quad (12)$$

Zdarzenia: B_0, B_1, B_2 i B_3 tworzą zupełny układ zdarzeń zatem prawdopodobieństwo $P(A)$ porażenia celu – zgodnie z zależnością na prawdopodobieństwo całkowite – jest równe:

$$P(A) = \sum_{i=0}^3 P(B_i) \cdot P(A | B_i) = \frac{1}{8} \cdot 0 + \frac{3}{8} \cdot 0 + \frac{3}{8} \cdot \frac{3}{6} + \frac{1}{8} \cdot \frac{5}{6} = \frac{7}{24}. \quad (13)$$

Jest regułą, iż bezpośrednie obliczenie wartości $P(A)$ nie wymaga uwzględnienia pewnych hipotez. W tym przypadku dotyczą to hipotez: B_0 i B_1 . Prawdopodobieństwa: $P(B_i)$ i $P(B_i | A)$ – *urealnijające* i *wypełniające* hipotezę B_i oraz obliczane *bezw warunkowo* i *warunkowo* wobec zaistnienia zdarzenia A – nazywane są odpowiednio *apriorycznymi* i *aposteriorycznymi*.

Prawdopodobieństwa aposterioryczne: $P(B_i | A)$,
 wynikające z twierdzenia Bayesa:

$$P(B_i | A) = \frac{P(B_i) \cdot P(A | B_i)}{\sum_{j=0}^n P(B_j) \cdot P(A | B_j)} = \frac{P(B_i) \cdot P(A | B_i)}{P(A)} \quad (14)$$

są (w odniesieniu do przykładu „strzeleckiego”) odpowiednio równe:

$$P(B_0 | A) = \frac{1 \cdot 0}{\frac{8}{7}} = 0,$$

$$P(B_1 | A) = \frac{3 \cdot 0}{\frac{8}{7}} = 0,$$

$$P(B_2 | A) = \frac{3 \cdot 3}{\frac{8 \cdot 6}{7}} = \frac{9}{14},$$

$$P(B_n | A) = \frac{1 \cdot 5}{\frac{8 \cdot 6}{7}} = \frac{5}{14}.$$

(15)

odróżnieniu od wartości sumy (12) – suma:

$$\sum_{i=0}^3 P(B_i | A) = 1 \quad (16)$$

jest równa jedności. Prawdopodobieństwo to jest typowe bez względu na istotę rozważanego problemu.

3. KRYTYKOWANE ZASTOSOWANIE WZÓRU BAYESA

O ile warunkiem zastosowania wzoru Bayesa (14) w „przykładzie strzeleckim” było wyznaczenie prawdopodobieństwa porażenia celu $P(A)$ (13), o tyle już w diagnostyce technicznej istotne staje się wyznaczenie jego odpowiednika – prawdopodobieństwa niezdatności obiektu $P(A)$. Można powiedzieć, iż zamiast skutku strzałów określa się skutek niezdatności elementów. Z pomocą temu wyznaczeniu przychodzi przyjęcie tzw. „szeregowej struktury niezawodnościowej”. Zgodnie z tą strukturą uszkodzenie jednego dowolnego elementu uszkadza cały obiekt bez możliwości powstania w nim dalszych uszkodzeń. To najczęściej oznacza także, że w obiekcie niezdatnym istnieje jeden i tylko jeden niezdatny element. Przy prawdopodobieństwach

wynikających odpowiednio: z braku niezdatności, z jednej niezdatności, z dwóch niezdatności i ... z „ N ” niezdatności:

$$P(B_0) = \prod_{m=1}^N p_m = a, \quad (17)$$

$$P(B_1) = \sum_{i=1}^N \left(q_i \prod_{m=1, m \neq i}^N p_m \right) = b, \quad (18)$$

$$P(B_2) = \sum_{\substack{i=1 \\ j=i+1 \\ j=N-1}}^{i=N-1} \left(q_i q_j \prod_{m=1, m \neq i, j}^N p_m \right) \cong 0, \quad (19)$$

⋮

$$P(B_n) = \prod_{m=1}^N q_m \cong 0. \quad (20)$$

stosowne prawdopodobieństwa niezdatności obiektu (zdarzenia A) wynoszą:

$$P(A | B_0) = 0, \quad (21)$$

$$P(A | B_1) = 1, \quad (22)$$

$$P(A | B_2) = 1, \quad (23)$$

⋮

$$P(A | B_n) = 1. \quad (24)$$

Zdarzenia $B_0, B_1, B_2, \dots, B_n$ stanowią zupełny układ zdarzeń, zatem prawdopodobieństwo niezdatności obiektu, zgodnie z zależnością na prawdopodobieństwo całkowite jest równe:

$$P(A) = \sum_{i=0}^N P(B_i) \cdot P(A | B_i) = a \cdot 0 + b \cdot 1 + 0 \cdot 1 + \dots + 0 \cdot 1 = b.$$

(25)

Przy bezpośrednim obliczaniu prawdopodobieństwa $P(A)$ można pominąć zdarzenie B_0 oraz zdarzenia B_2, \dots, B_n . W przypadku pierwszego z nich istnieje zerowe prawdopodobieństwo uszkodzenia obiektu, natomiast w przypadku pozostałych – z racji *szeregowej struktury niezawodnościowej* – znikome prawdopodobieństwo powstania ich samych.

Stosowne prawdopodobieństwa aposterioryczne, tzn. prawdopodobieństwa warunkowe zdarzeń B_i w sytuacji niezdatności obiektu A – określone wzorem Bayesa (14) – są, przy: braku niezdatności, jednej niezdatności, dwóch niezdatnościach i ... „ N ” niezdatnościach, odpowiednio równe:

$$P(B_0 | A) = \frac{1 \cdot 0}{b} = 0, \quad (26)$$

$$P(B_1 | A) = \frac{b \cdot 1}{b} = 1, \quad (27)$$

$$P(B_2 | A) = \frac{0 \cdot 1}{b} = 0, \quad (28)$$

$$\vdots$$

$$P(B_N | A) = \frac{0 \cdot 1}{b} = 0. \quad (29)$$

Wartość prawdopodobieństwa warunkowego (27) wyraźnie wskazuje, że jeśli obiekt jest niezdatny to z pewnością przyczyną tej niezdatności jest zdarzenie $B_1^i \subseteq B_1$, polegające na niezdatności jakiegoś pojedynczego elementu e_i . Wtedy dla każdego $i = 1, \bar{N}$:

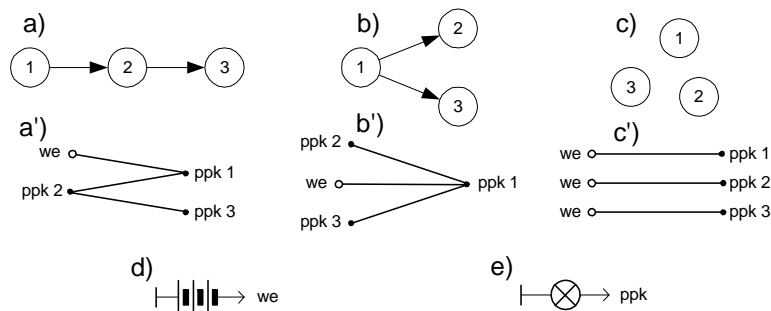
$$P(B_1^i) = q_i \prod_{m=1, m \neq i}^N p_m = b_i, \quad (30)$$

$$\sum_{k=1}^N b_k = b, \quad (31)$$

$$P(A | B_1^i) = 1, \quad (32)$$

$$P(B_1^i | A) = \frac{b_i}{b} = q_i'. \quad (33)$$

Najwymowniejszym i najbardziej przekonywującym przykładem, potwierdzającym „zasadność” wprowadzenia „szeregowej struktury niezawodnościowej” – swoistego „katalizatora” teorii diagnostyki technicznej – była i zwykle jest analiza diagnostyczna obiektu, który podobnie jak ta struktura jest łańcuchem szeregowo połączonych elementów. Dla obiektu trójelementowego może być nią struktura przedstawiona na rys. 1.a,a'. Rozpoznanie niezdatności (zdarzenia A) polega wtedy na sprawdzeniu sygnału wyjściowego ostatniego elementu tego łańcucha, natomiast lokalizowanie niezdatności – na analizie wyników sprawdzeń sygnałów na wyjściach pozostałych elementów. Warty uwagi jest fakt, że pierwsza z czynności pozwala jedynie stwierdzić niezdatność bądź zdatność całego obiektu (stwierdzić obecność bądź też brak zdarzenia A), natomiast druga – na wskazanie tylko jednego niezdatnego elementu (zdarzenia $B_1^i \subseteq B_1$). Niestety, takiej samej jednoznaczności wyników badań nie można już odnieść do każdego innego obiektu (patrz. rys. 1.b,b' 1.c,c').



Rys. 1. Wybrane struktury obiektów trójelementowych (a, b, c) wraz z najprostszymi przykładami ich rzeczywistych realizacji (a', b', c') i propozycjami urządzeń ich diagnozowania: źródła sygnału testującego (d) i przyrządu pomiarowo kontrolnego (e)

4. ISTOTA PARADOKSU

Metodom bayesowskim trudno odmówić racji bytu o ile zdarzeniom przypisana jest ich wzajemna *niezależność*. Niestety, wprowadzenie *szeregowej struktury niezawodnościowej* do diagnostyki obiektów złożonych przeczy tej *niezależności*. Jej obecność jest świetnym pretekstem i jednocześnie kazuistycznym uzasadnieniem eliminacji hipotez niezdatności mnogich. Pierwsze stwierdzenie odnosi się do pętli sprzężeń zwrotnych i łańcuchów szeregowo połączonych elementów, drugie natomiast – do struktur rozproszonych, pozbawionych jakichkolwiek sprzężeń między elementami. Wyraźnie wynika to z pryncypiów diagnostyki technicznej, zgodnie z którymi:

po pierwsze-element obiektu uważany jest za niezdatny jeżeli wszystkie jego sygnały wejściowe są dopuszczalne a sygnał wyjściowy – niedopuszczalny, i

po drugie-choćby jeden niedopuszczalny sygnał wejściowy elementu prowadzi do powstania na jego wyjściu sygnału niedopuszczalnego.

Paradoks (rozumowanie o pozornie oczywistej prawdziwości) tkwi w przypisaniu dowolnej strukturze cech typowych dla struktury rozproszonej, podobnej do tej z „przykładu strzeleckiego” i rys. 1c.c'. Złudna adaptacja jej właściwości, określonych zależnością (3) polega – po uwzględnieniu zależności (5) i (33) – na sprowadzeniu wartości prawdopodobieństw warunkowych q_i' do postaci:

$$q_i' = \frac{q_i \prod_{m=1, m \neq i}^N p_m}{\sum_{i=1}^N \left(q_i \prod_{m=1, m \neq i}^N p_m \right)}. \quad (34)$$

Dzieląc licznik i mianownik prawej strony równania (34) przez iloczyn (4), wartość prawdopodobieństwa q'_i można przedstawić także w postaci:

$$q'_i = \frac{\frac{q_i \prod_{m=1, m \neq i}^N p_m}{\prod_{m=1}^N p_m}}{\frac{\sum_{i=1}^N \left(q_i \prod_{m=1, m \neq i}^N p_m \right)}{\prod_{m=1}^N p_m}} = \frac{q_i}{\sum_{m=1}^N \frac{q_m}{p_m}} \quad (35)$$

Przyjmując, iż

$$\forall i: (q_i = q) \wedge (p_i = p) \quad (36)$$

i podstawiając:

$$p = 1 - q; \quad (37)$$

prawdopodobieństwo warunkowe przyjmuje postać:

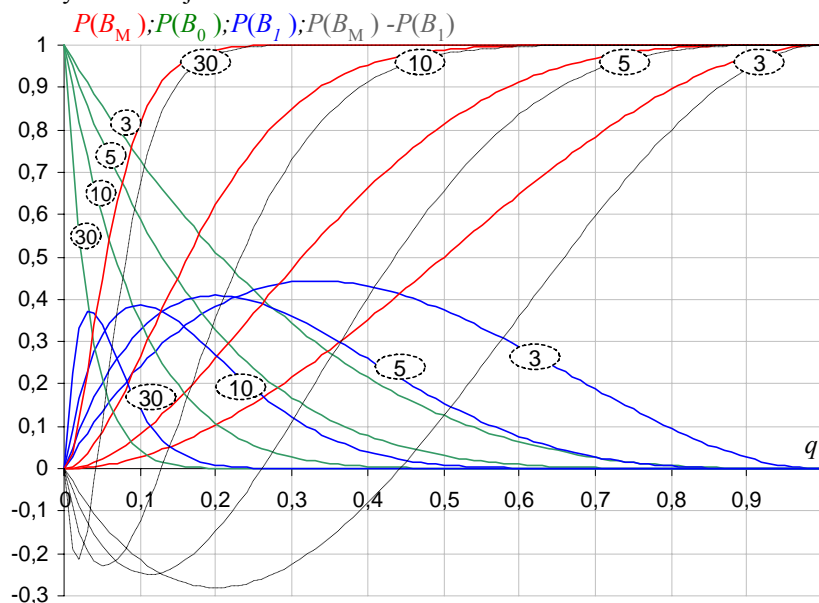
$$q'_i = \frac{\frac{q}{1-q}}{N \frac{q}{1-q}} = \frac{1}{N} = q' \quad (38)$$

Należy zauważyć, że wartość tego prawdopodobieństwa może przeczyć wszelkiej intuicji – nie przystaje ona do jakichkolwiek zdarzeń, w których prawdopodobieństwo bezwarunkowe q zostanie wyobrażone raz jako równe jedności, a innym razem jako równe zero.

Wystarczy zapytać w tym kontekście o sens użycia choćby jakiegokolwiek programu podziału połówkowego. Przecież dla pierwszej z wymienionych wartości obiekt jest w całości niezdatny, natomiast dla drugiej – przeciwnie – w całości zdalny. Wyrażanie prawdopodobieństwa warunkowego q' (przy jednorodnych prawdopodobieństwach bezwarunkowych q) odwrotnością liczebności elementów jest tu wyraźnym nadużyciem.

Prawdziwym kuriozum jest wyobrażenie o pojedynczej niezdatności z punktu widzenia wieloelementowych struktur rozproszonych. Od razu można sobie wyobrazić chociażby zbiór samochodów w Polsce. Jakie jest prawdopodobieństwo, że w danej chwili jest uszkodzony tylko jeden z nich? Nie tylko intuicja podpowiada, że jest ono bardzo małe. Wyjaśnia to zmienność prawdopodobieństw: $P(B_M) = 1 - P(B_0) - P(B_1)$ (17) i $P(B_1)$ (18) oraz relacji: $P(B_M) - P(B_1)$, przedstawiona na wyk. 1., gdzie zdarzenie B_M jest właśnie tym, które polega na wystąpieniu więcej niż jednej niezdatności. Zmienność zbadano dla trzech liczebności N : 3, 5, 10 i 30, zakładając jednorodność prawdopodobieństw niezdatności elementów. Wszystkie wyróżnione na wyk. 1. prawdopodobieństwa wiążą ze sobą zależność:

$$\begin{aligned} P(B_M) &= 1 - P(B_0) - P(B_1) = \\ &= 1 - (1-q)^N - Nq(1-q)^{N-1} \end{aligned} \quad (39)$$



Wyk. 1. Przebieg zmienności prawdopodobieństw $P(B_0)$, $P(B_1)$ i $P(B_M)$ oraz ich różnicy $P(B_M) - P(B_1)$ (linia przerywana) w funkcji zmian liczebności elementów obiektu N i jednorodnych prawdopodobieństw ich niezdatności q

Maksimum $P(B_1)$ (linia niebieska) przypada każdorazowo dla $q = N^{-1}$ i dla $N \rightarrow \infty$ zbliża się

asymptotycznie do wartości e^{-1} . Istotną rolę waga wartości $P(B_M)$ nad wartością $P(B_1)$

(punkt przecięcia linii czerwonej z niebieską) następuje już dla wartości q nieznacznie większych od N^{-1} , natomiast wartość minimalna różnicy $P(B_M) - P(B_1)$, także dla $N \rightarrow \infty$, wynosi tylko: $1 - 2 \cdot e^{-1/2}$ (około: -0,213061).

Analityczne wyznaczenie przedstawionych wartości wymaga w pierwszej kolejności wyznaczenia pierwszych pochodnych cząstkowych wielkości $P(B_1)$ i $P(B_M) - P(B_1)$:

$$\frac{\partial(P(B_1))}{\partial q} = \frac{\partial(Nq(1-q)^{N-1})}{\partial q}, \quad (40)$$

$$= N(1-Nq)(1-q)^{N-2}$$

$$\frac{\partial(P(B_M) - P(B_1))}{\partial q} =$$

$$= \frac{\partial(1 - (1-q)^N - 2Nq(1-q)^{N-1})}{\partial q} \quad (41)$$

$$= N(1-q)^{N-2} (2Nq - q - 1)$$

i przyrównanie tychże do zera, celem wyznaczenia wartości q , dla której rzeczony wielkości osiągają ekstrema - zależności (42) i (43).

$$N(1-Nq)(1-q)^{N-2} = 0 \Rightarrow q = \frac{1}{N}, \quad (42)$$

$$N(1-q)^{N-2} (2Nq - q - 1) = 0 \Rightarrow q = \frac{1}{2N-1} \quad (43)$$

Kolejnym krokiem jest podstawienie do $P(B_1)$ i $P(B_M) - P(B_1)$ wyznaczonych wartości q :

$$P(B_1) \left(q = \frac{1}{N} \right) = \left(1 - \frac{1}{N} \right)^{N-1}, \quad (44)$$

$$(P(B_M) - P(B_1)) \left(q = \frac{1}{2N-1} \right) =$$

$$= 1 - 2^N \left(\frac{N-1}{2N-1} \right)^{N-1} \quad (45)$$

Wyznaczenie granic:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{N} \right)^{N-1} = \frac{\lim_{N \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{-1}{N} \right)^N}{\lim_{N \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{N} \right)} = \frac{e^{-1}}{1} = e^{-1} \quad (46)$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \left(1 - 2^N \left(\frac{N-1}{2N-1} \right)^{N-1} \right) = 1 - 2e^{\frac{1}{2}}. \quad (47)$$

ostatecznie potwierdza wskazane wartości.

Podczas wyznaczania granic posłużono się znaną wartością granicy [21]:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{a}{N} \right)^N = e^a. \quad (48)$$

Groźną konsekwencją koncepcji pojedynczych niezdatności jest dość powszechna praktyka eliminacji tzw. „informacji nadmiarowej”. Można to przybliżyć drogą analizy procesu diagnozowania obiektu o strukturze przedstawionej na rys. 1.b,b'. Uważa się, że przy poszukiwaniu co najwyżej jednego niezdatnego elementu wystarczy sprawdzenie sygnałów tylko na wyjściach

elementów e_2 i e_3 . Kiedy oba sygnały będą dopuszczalne obiekt uznaje się za zdalny, kiedy – tylko na wyjściu elementu e_2 mówi się o niezdatności elementu e_3 , i odwrotnie, kiedy – tylko na wyjściu elementu e_3 orzeka się niezdatność elementu e_2 . Znamiennym jest fakt, że kiedy oba te sygnały będą niedopuszczalne wskazuje się na niezdatność elementu e_1 , choć faktyczną przyczyną ich niedopuszczalności może być niezdatność elementów e_2 i e_3 .

5. ŚCIEŻKA RATUNKU

Wadliwa adaptacja wzoru Bayesa w diagnostyce jak dotychczas nie znajduje stosownego odporu środowiska naukowego. Nadal dostrzega się potrzebę jego użycia [3, 7]. Z pewną przykrością należy stwierdzić, że przyczyną tego stanu rzeczy nie jest bynajmniej brak stosownej informacji na ten temat. Już tylko staraniem autora niniejszej publikacji, problem fałszywej diagnozy przedstawiono w [4, 13, 14, 15, 17, 19].

Czy lepiej natychmiast zburzyć to, co zostało zbudowane na fałszywych podstawach, niż uparcie trzymać się wątpliwych konstrukcji, narażonych prędzej czy później na rozpad? Niniejsze daje się pod rozwagę przede wszystkim Tym, których rozważania zasadzają się wokół takich pojęć jak:

- kontrola zdalności → lokalizacja uszkodzeń;
- rozpoznanie niezdatności → lokalizowanie niezdatności [10],
- detekcja (wykrycie) → lokalizacja (wyodrębnienie) → identyfikacja (określenie rozmiaru) [4].

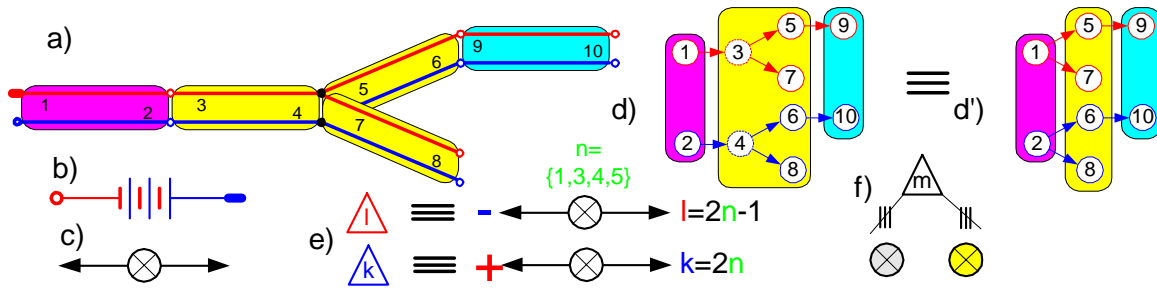
Hasła te odnoszą się do tego zakresu „wiedzy”, o której się mówi, że teoria nie podąża za praktyką. Probierzem niniejszego niech będzie próba podjęcia (z ich wykorzystaniem) diagnozowania fragmentu instalacji elektrycznej, której laboratoryjną rekonstrukcję przedstawiono na rys. 2.a.

Kto z Czytelników podejmie się porównania tego diagnozowania z propozycjami autora, przedstawionymi na rys 3.?

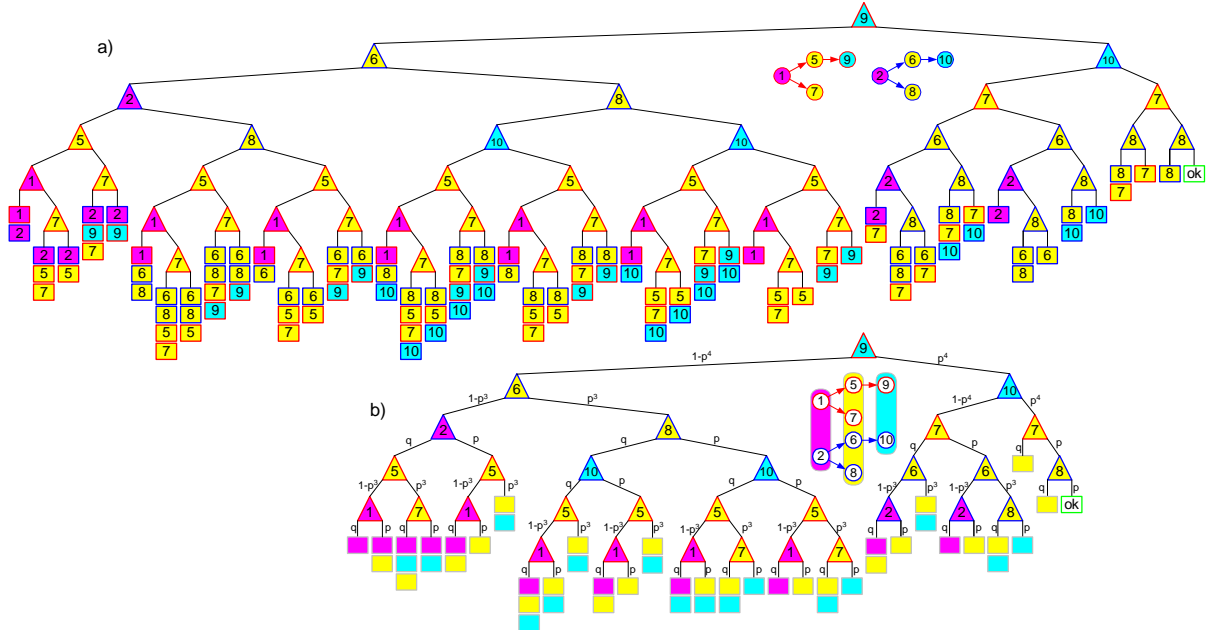
Kto uzasadni sens dwuetapowego procesu diagnozowania – rozpoznania i lokalizowania niezdatności?

Kto – mając na uwadze wartości prawdopodobieństw niezdatności odcinków tej instalacji – zaproponuje diagnozowanie wg metody *skuteczności probabilistycznej* czy też metody *skuteczności informacyjnej*?

A kto przedstawi program diagnozowania wg metody *podziału połówkowego* jeśli prawdopodobieństwa przesyłu napięcia przez odcinki tego obwodu choć będą sobie równe, to jednak z możliwością wystąpienia ich dowolnej wartości z przedziału od zera do jedności?



Rys. 2. Laboratoryjna rekonstrukcja fragmentu instalacji elektrycznej (a) wraz z propozycją urządzeń jej diagnostowania: źródła sygnału testującego (b) i przyrządu pomiarowo kontrolnego (c), gdzie: d, d' – model obiektu w wersji pełnej i uproszczonej (wynikającej z pominięcia wierzchołków bez dostępu pomiarowo – kontrolnego); e – symbole sprawdzeń w punktach parzystych i nieparzystych wraz ze sposobem ich realizacji; f – symbolika gałęzi symbolu sprawdzenia (jego wyników): lewej – wyniku negatywnego (wygaszona żarówka) i prawej – wyniku pozytywnego (świecąca się żarówka).



Rys. 3. Programy diagnostowania obiektu przedstawionego na rysunku 2, gdzie: a – szczegółowy, uwzględniający pełny zbiór rozróżnialnych stanów niezawodnościowych, b – hierarchiczny, z naniesionymi prawdopodobieństwami wyników poszczególnych sprawdzeń, przy jednakowych prawdopodobieństwach zdatości p (niezdatości q) odcinków sieci

Obecnie nie tylko ścieżką, ale całą drogą wyjścia z błędnej teorii diagnostyki jest porzucenie wszelkich myśli podporządkowanych pojedynczym niezdatnościom. Oczekiwanych rezultatów nie przynosi także rozszerzenie repertuaru o lokalizację dwóch, trzech i większej liczby niezdatności, mniejszej od liczebności elementów. - W wielu przypadkach prowadzone o nich rozważania są oderwane od struktury i problemu przesłania [4]. W tym aspekcie racjonalna i naturalna zarazem metoda diagnostowania powinna wynikać przede wszystkim z bardzo dobrej znajomości budowy i zasady funkcjonowania obiektu, a analizowanym zbiorem jego stanów – zbiór stanów rozróżnialnych [4, 12]. Przykładowo, dla obiektu przedstawionego na rys. 2.a liczebność tego zbioru jest równa tylko 49 (patrz rys. 3.a), a jednym z sensowniejszych programów badawczych – program diagnostowania hierarchicznego,

przedstawiony na rys. 3.b. Dalszej poprawy diagnostowania (skrócenia jego czasu) można byłoby upatrywać w zastosowaniu metody wielotorowej [18]. – Warto zauważyć, że obiekt składa się z dwóch osobnych sieci, z których każda może być badana osobno i jednocześnie z drugą. Tu należałoby jednak zaangażować jeszcze jednego diagnostyka z dodatkową żaróweczką.

Dla dobra procesu diagnostowania należy wyzbyć się roztrząsania kwestii niezdatności obiektu – określania prawdopodobieństwa $P(A)$ (25). Wystarczającymi i zdroworozsądkowymi czynnikami optymalizacji badań diagnostycznych są przecieź: prawdopodobieństwa niezdatności pojedynczych elementów q_i i struktura wzajemnych połączeń tychże [16].

6. LITERATURA

1. Абезгауз Г.Г., Тронь А.П., Копенкин Ю Коровина И.А., *Справочник по вероятностн расчтам*. Воениздат, Москва 1970, сс.14-16.
2. Beven K. J., Smith P. J., Freer J. E. – *So just why would a modeler choose to be incoherent?* Journal of Hydrology Volume 354, Issues 1-4, 2008, (pp 15-32)
3. Będkowski L., Dąbrowski T. - *Diagnozowanie na podstawie niepewnych syndromów stanu obiektu*, Diagnostyka, nr 37/ 2006, (ss. 55-60).
4. *Diagnostyka procesów (Modele, Metody sztucznej inteligencji, Zastosowania)* pod redakcją J. Korbicza, J. M. Kościelnego, Z. Kowalczuka i W. Cholewy, WNT, Warszawa 2002 (ss. 57-114)
5. Dunne P. G. – *A generalized Bayesian model of market microstructure behavior applied to the market in Irish government securities*, International Review of Financial Analysis, Volume 9, Issue 4, 2000, (pp 369-388)
6. Feller W. – *Wstęp do rachunku prawdopodobieństwa*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007, (s 110)
7. Grabski F., Jaźwiński J. - *Metody bayesowskie w niezawodności i diagnostyce*, WKŁ, Warszawa 2001, (ss. 1-320).
8. Jonson N. E. – *Everyday diagnostics – A critique of the Bayesian model*, Medical Hypotheses, Volume 34, Issue 4, 1991, (pp 289-295)
9. Lubrano M.- *Annals of econometrics: Bayesian and classical econometric modeling of time series*, Journal of Econometrics, Volume 69, Issue 1, 1995, (pp 81-109)
10. PN-93/N-50191 *Niezawodność; jakość usługi. Słownik terminologiczny elektryki*.
11. Schroyens W., Schaeken W. – *A critique of Oaksford, Chater, and Larkin's (2000) conditional probability model of conditional reasoning*, Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, Volume 29, Issue 1, 2003, (pp 140-149)
12. Szczepański P., *Określanie i zastosowanie prawdopodobieństw występowania rozróżnialnych stanów wadliwego funkcjonowania obiektu*. Biuletyn WAT. Nr 8/2001.(ss. 25-40)
13. Szczepański P., *Funkcjonalna struktura niezawodnościowa obiektu na przykładzie diagnozowania szeregowo połączonych elementów*, Diagnostyka, nr 28/2003. (ss. 53-62)
14. Szczepański P., *Diagnozowanie bez wstępnej informacji o stanie technicznym obiektu*., Biuletyn WAT. Nr 1/2005. (ss. 17-27)
15. Szczepański P., - *Nie dzielmy diagnozowania na rozpoznanie i lokalizowanie niezdatności*, Diagnostyka (materiały III Międzynarodowego Kongresu Diagnostyki technicznej, Diagnostyka 2004), nr 30/2004. (ss. 117-121)
16. Szczepański P. – *Entropia struktury obiektu w ujęciu addytywnym*, Biuletyn WAT, nr 3/2009. (ss. 169 – 192), Warszawa, 2009.
17. Szczepański P. – *Krytycznie o wzorze Bayesa w diagnostyce obiektów technicznych*. Konferencja Naukowo – Techniczna AUTOMATION'2005 nt.: Automatykacja – nowości i perspektywy. Warszawa 6-8 kwietnia 2005, (ss. 179-186)
18. Szczepański P. - *Wielotorowość w warunkowym programie diagnozowania złożonego obiektu technicznego*. Biuletyn WAT., nr 2/1997. Warszawa, 1997.
19. Szczepański P. - *Propozycja metody lokalizacji uszkodzeń wielokrotnych w złożonych obiektach technicznych*. – Biuletyn WAT nr 7/1985 (ss. 93÷101).
20. Weakliem D. L. – *A critique of the Bayesian information criterion for model selection*, Sociological Methods & Research, Vol. 27, No. 3, 1999 (pp 359-397).
21. *Tablice matematyczne* pod redakcją W. Mizerskiego, Wydawnictwo Adamantan. Warszawa 2004, (s. 89)



Dr inż. **Paweł SZCZEPAŃSKI**.

(l.55). Absolwent Technikum Radiowego im. M. Kasprzaka w Warszawie. W latach 1976-1981 studia w WAT na Wydziale Mechatroniki. Specjalność: eksploatacja urządzeń radioelektronicznych. Rok 1990 - obrona rozprawy doktorskiej nt.: „Diagnozowanie złożonych obiektów technicznych z uszkodzeniami wielokrotnymi”. W latach 1983 - 2009 pracownik naukowo - dydaktyczny WAT. Obecnie emeryt. Próbuje: mieć zdrowie i szczęśliwe życie, wygrać w totolotka, i - uzyskać kolejny stopień naukowy. Żywi przekonanie, że tylko mądry wie wszystko, a sprytny zna wszystkich. Jest niepokornym poszukiwaczem prawdy. - Zgadza się z opinią głoszącą, że "smutna jest epoka, której w życiu publicznym ucziwie zwie się naiwnym, a szczerze głupim" (K. Przerwa-Tetmajer).
Zainteresowania: działka, grill, filatelistyka.
Sporty: brydż, szachy, pływanie.
Zrzeszony w PTDT i w PNTTE.
Dorobek naukowy obejmuje ponad 55 publikacji w tym dwa skrypty.
Zainteresowania naukowe: diagnostyka techniczna.

DIAGNOSTYKA TECHNICZNA – SPOJRZENIE SYNTETYCZNE¹

Czesław CEMPEL

Politechnika Poznańska, ul Piotrowo 3, 60-965 Poznań,
email; czeslaw.cempel@put.poznan.pl

Streszczenie

Diagnostyka techniczna, a pod tym pojęciem rozumiemy diagnostykę maszyn i urządzeń, jako nauka zaczęła się zwolna wyłaniać w latach siedemdziesiątych. Wpierw w dziedzinie tej panowały normy drganiowe typu ISO 1940, lub nawet ustalenia prywatnych firm (*IRD Mechanalysis*) zajmujących się diagnostyką maszyn. A trzeba dodać, że możliwości badawcze procesów drganiowych, i wiedza o drganiach maszyn nie była wtedy duża. Mierzono amplitudy drgań prędkości, przemieszenia, czy też przyspieszenia, za pomocą dość prostych przetworników, rejestratorów i analizatorów. Ale stopniowo łącząc tę wiedzę z podstawami dynamiki maszyn i wibroakustyki maszyn modelami i relacjami udało się ze *'sztuki pomiaru i interpretacji'*, jaką była wtedy diagnostyka, zrobić *'prawie'* dyscyplinę wiedzy i umiejętności, niezwykle przydatną w praktyce utrzymania ruchu maszyn. Przyczyniły się do tego znacznie hardwarowe i softwarowe postępy w przetwarzaniu sygnałów i rosnące powiązanie tej wiedzy szczególnie z dynamiką i eksploatacją maszyn, ze sposobem ich zużywania się i wyłaniającymi się zwolna modelami diagnostycznymi, technologiami informatycznymi i sztuczną inteligencją.

W chwili obecnej metody i środki diagnostyki technicznej, zwłaszcza wibroakustycznej, znalazły zastosowanie we wszystkich fazach życia obiektów, od projektowania przez wytwarzanie, eksploatację, aż do reużytkowania. W pracy będą scharakteryzowane głównie sposoby rozumowania i osiągnięcia diagnostyki, a w sposób zwarty najlepiej to ilustruje załączona w podsumowaniu mapka myślowa.

MACHINE CONDITION MONITORING – HISTORIC OVERVIEW

Summary

The beginning of machine condition monitoring (MCM) starts in a half of a previous century, mainly as a help in critical machines maintenance. At that time, the knowledge on machine acoustic noise and vibration was not large, mainly due to small possibilities in measuring and analysis of these processes. Hence it was based mainly on application of some vibration standards like ISO 1940, and the guidelines of some consulting firms like *IRD Mechanalysis*. The accumulation of knowledge on vibrational behavior of machines and improvements in measuring and analysis of vibration signals, mainly due to introduction of digital signal processing and analysis, has made substantial increase in machine fault detection and condition forecasting. Moreover vibration condition monitoring of the machines is now applied not only to the running machines, but in all phases of machine life, in the design, manufacturing, the usage, and recycling. We can measure, process and use for these purposes several vibration processes simultaneously, enabling the precise fault detection assessment and forecasting of residual life of the machine, sometimes far away from the machines, like in case of large wind turbines and farms.

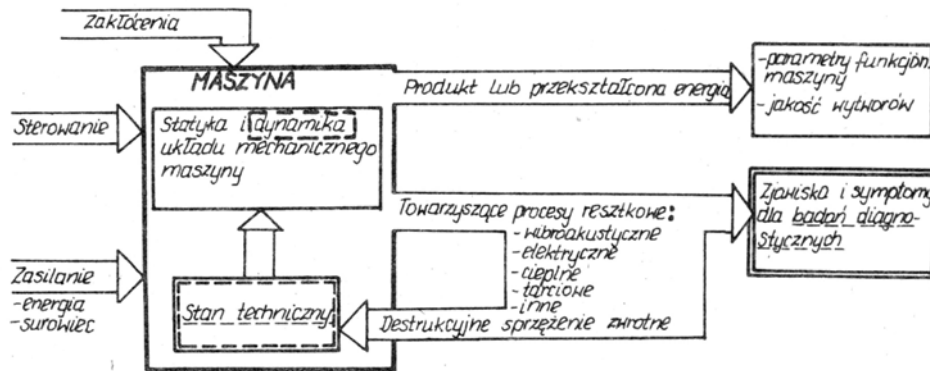
Key words: vibration condition monitoring, historical overview, signal generation models, symptom life time models, multidimensional symptom processing.

1. WSTĘP

Oddalenie człowieka operatora od indywidualnej maszyny, stopniowe grupowanie maszyn we wzajemnie zależne ciągi technologiczne, zaczęło narastać od początku wieku 20tego. Stało się to przyczyną odcięcia wiedzy o stanie konkretnej maszyny od człowieka operatora, odpowiedzialnego za stan produkcji, oraz stan i ekonomię przedsiębiorstwa. Najwcześniej i najbardziej dotkliwie dało się to we znaki dla **maszyn²** i systemów technicznych, które spełniła krytyczna funkcje w systemie, takich jak np. turbogeneratory silniki napędowe w przemyśle i w transporcie. Tutaj najwcześniej zaczęła się rodzić i kumulować wiedza o sposobach i procesach

zużywania³ się obiektów i o **symptomach⁴** towarzyszących procesowi zużywania się. Warto na te procesy spojrzeć z szerszego punktu widzenia, jeśli maszynę potraktujemy jako system działaniowy zgodnie z ideą rysunku 1.

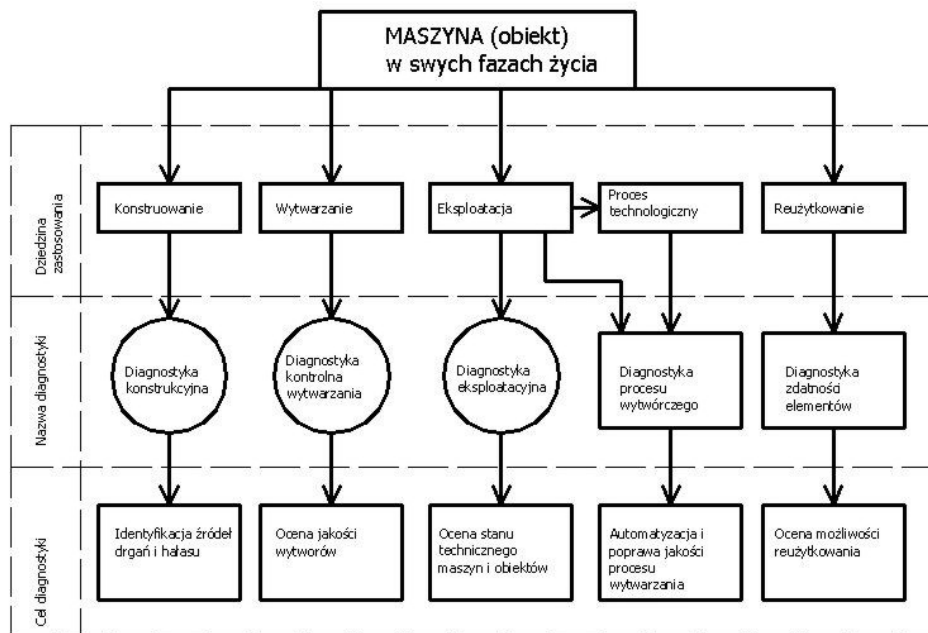
1. Tekst główny to referat zamawiany na 56 Konferencję Inżynierów Budownictwa, Krynica, wrzesień 2010.
2. Będziemy zamiennie używać pojęcia; maszyna, obiekt, system techniczny, itp. zależnie od szczegółowego kontekstu.
3. Procesy zużyciowe w maszynach można z grubsza podzielić na; zmęczeniowe, tarciove i erozyjne.
4. Symptom, wielkość obserwowalna i mierzalna współzmiennicza ze stanem obiektu.



Rys.1. Maszyna jak system działaniowy z przepływem energii i informacji oraz możliwości jej obserwacji diagnostyczne [1]

Jak widać z rysunku wszystkie wyjścia maszyny niosą informację o jej **stanie technicznym**⁵ (zużyciowym), lecz nie wszystkie obserwowane procesy są jednakowo dogodnie do obserwacji diagnostycznej, lub niosą ten sam zasób informacji diagnostycznej. Jak się okazuje, największy zasób informacji o stanie niosą procesy dynamiczne, takie jak drgania, dźwięk (*hałas*), które łatwo przekształcić

w **sygnaly**⁶ do dalszej obróbki informacji diagnostycznej. Stąd też procesy wibroakustyczne (WA) maszyn najwcześniej (*lata 60te i 70te ubiegłego wieku*) zaczęto używać do diagnostyki stanu maszyn [16, 17], ale nie tylko jak to widać z kolejnego rysunku 2.



Rys.2. Syntetyczne ujęcie celów i rodzajów diagnostyki wibroakustycznej w przemyśle (w ślad za [1] ze zmianami)

Obserwując procesy WA już w procesie konstruowania i badań prototypu, możemy dowiedzieć się jak poprawić jakość dynamiczną konstrukcji, co później odzwierciedli się w jej charakterystykach zużyciowych, trwałościowych i niezawodnościowych. Widać również z rysunku 2, że diagnostyka towarzyszy każdej fazie cyklu życia maszyny, nawet w reużytkowaniu podzespołów i/lub elementów i materiałów.

Najważniejsze jednak miejsce we wszystkich rodzajach diagnostyki przypada w udziale diagnostyce eksploatacyjnej, gdyż od niej zależy

efektywność transformacji zaangażowanych zasobów, a przede wszystkim bezpieczeństwo coraz bardziej skomplikowanych maszyn i systemów technosfery. Stąd też gros wysiłku badawczego i wdrożeniowego jest zawsze kierowane w tę stronę zastosowań diagnostyki.

5. Stan techniczny odzwierciedla zaawansowanie procesów zużyciowych w obiekcie.

6. Sygnal, wielkość szybkozmienna będąca informacyjnym odwzorowaniem dynamicznego procesu zachodzącego w obiekcie.

2. EWOLUCJA STANU TECHNICZNEGO MASZYN, USZKODZENIA, SYMPTOMY SYGNAŁY

Ewolucja ta zachodzi podczas użytkowania, czyli tzw. eksploatacji maszyn, obiektów i szerzej mówiąc systemów. Siła napędową tej ewolucji stanu są procesy robocze zachodzące w maszynie, zaś jej źródłem są początkowe niesprawności tkwiące w materiale (*defekty struktury, dyslokacje, itd.*), w wykonaniu (*tolerowane niewyrównoważenie*) i dopasowaniu elementów (*tolerowana nieosiowość*), itp. Początkowo, dla czasu życia⁷ obiektu $\theta \approx 0$ uszkodzenia te rozwijają się niezależnie, a ponieważ jest to na ogół nie pojedyncze uszkodzenie oznaczmy je jako:

$$F_i(\theta), \quad 0 < \theta < \theta_b; \quad i=1\dots t, \quad (1)$$

gdzie θ_b czas życia elementu i/lub obiektu.

W miarę ich rozwoju niektóre z uszkodzeń, pobierając energie z ruchu roboczego, zaczynają dominować napędzając rozwój pozostałych przez drgania, stając się pod koniec życia systemu coraz bardziej współzależne dając tzw. syndrom starego człowieka [1]. Relacja (1) definiuje nam tzw. przestrzeń uszkodzeń U naszego obiektu, i jak widać jest ona zawsze wielowymiarowa rozwijająca się z czasem θ , przy czym jak łatwo się domyślić nie wszystkie uszkodzenia F_i muszą być zauważalne dla $\theta \approx 0$, ich szybkość narastania $dF_i/d\theta$ może być różnorodna, nawet niewspółmierna. Zatem do pewnych celów może być potrzebna zbiorcza miara zaawansowania wszystkich uszkodzeń

w naszym obiekcie w danej chwili czasu θ , np. w postaci tzw. kumulanty uszkodzeń

$$F(\theta) = \sum^t F_i(\theta), \text{ lub też: } F(\theta) = \sum^t w_i F_i(\theta), \quad (2)$$

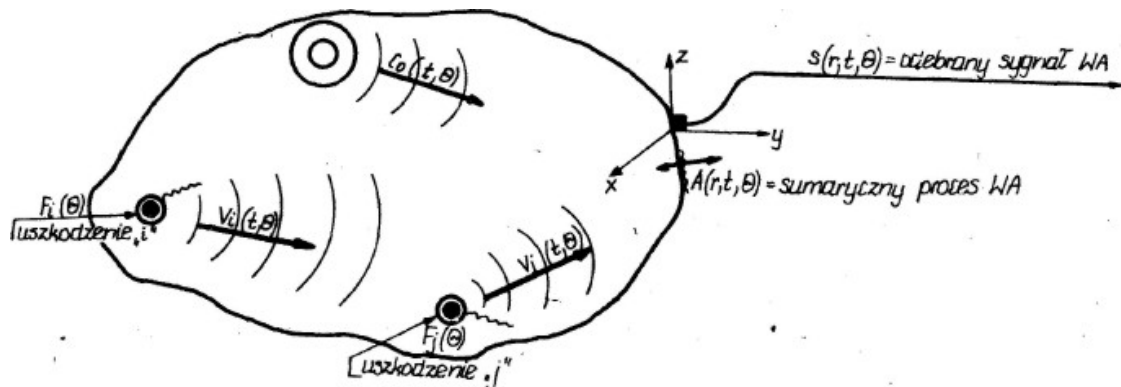
z wagami w_i unormowanymi do jedności. Uszkodzenia te mają swoje wibroakustyczne sygnatury $v_i(t, \theta)$, będące ich dynamiczną transformacją poprzez ruch roboczy w maszynie i czas dynamiczny t , w miejscu powstania uszkodzenia o współrzędnej wektorowej r_i . Możemy więc napisać transformację dynamiczną uszkodzenia w sygnał:

$$F_i(\theta) \Rightarrow v_i(t, \theta, r_i); \quad (3)$$

Jeśli przypomnimy sobie, że każda struktura mechaniczna może być scharakteryzowana zbiorem charakterystyk impulsowych $h_i(t, \theta, r_i)$ możliwych do poznania przez identyfikację [8], to sygnał odbierany przez przetwornik drganiowy w określonym miejscu r może być wyrażony jako suma sygnałów od uszkodzeń pierwotnych F_i , ruchu roboczego obiektu i zakłóceń, zgodnie z rysunkiem 3, jak niżej.

$$S(r, t, \theta) = \sum^t h_i(t, \theta, r_i) * v_i(t, \theta, r_i) + c(t, \theta, r) + n(t, \theta, r), \quad (4)$$

gdzie $c(t, \theta, r)$ jest tzw. sygnałem znamionowym (*pracy*) obiektu, natomiast $n(t, \theta, r)$ jest szumem generowanym w pracującym obiekcie, oznaczenie * symbolizuje splot dynamiczny (t) odpowiedzi impulsowej i sygnału charakterystycznego uszkodzenia.



Rys. 3. Model obserwacji diagnostycznej struktury maszyny [1]

Jak widać z (4) model sygnału wibroakustycznego pracującej maszyny z uszkodzeniami nie jest taki prosty i ekstrakcja informacji diagnostycznej może nie być łatwa, choćby z tytułu dominacji sygnału znamionowego pracy obiektu $c(\cdot)$, czy też dużej składowej szumowej $n(\cdot)$ panującej w miejscu odbioru r . Zatem mamy dwie składowe zakłóceniami i jedną składową informacyjną będącą sumą odpowiedzi dynamicznych kilku uszkodzeń. Jeśli więc

przykładowo szukamy sygnału uszkodzenia F_3 to sygnały pozostałych uszkodzeń też odgrywają rolę zakłóceń i muszą być minimalizowane za pomocą odpowiedniej procedury uogólnionej filtracji, o czym bardziej szczegółowo w następnym punkcie.

7. Czas życia obiektu θ , wielkość wolnozmienne o wymiarze czasu, mierzona w dniach, tygodniach, miesiącach, latach, zależnie od intensywności procesów zużyciowych w obiekcie.

3. SELEKCJA SYGNAŁÓW, ICH MIARY – SYMPTOMY

W czasach analogowej obróbki sygnałów, dominującej prawie do końca wieku 20tego, wiele trzeba się było natrudzić koncepcyjnie i instrumentalnie by dokonać odpowiedniej ekstrakcji sygnałów. Bowiem jak wynika z (4) mamy tu cztery dziedziny do uogólnionej filtracji informacji diagnostycznej; dziedzinę amplitudy $S(\cdot)$, dziedzinę czasu dynamicznego t , dziedzinę czasu życia θ , oraz dziedzinę lokalizacji punktu odbioru r . W tych dziedzinach możemy poszukiwać największego ilorazu stosunku sygnału do szumu dla relacji (4), który w zagadnieniach przetwarzania informacji jest zawsze pierwszoplanowy.

W badaniach diagnostycznych sygnałów maszyn zawsze dysponujemy pewną wstępną wiedzą, która mówi nam, że poszukując określonego uszkodzenia największy stosunek sygnału do szumu uzyskamy w określonym miejscu r korpusu maszyny, bądź obudowy łożyska. Jeśli do tego mamy kierunkowe przetworniki drgań, to również mamy wstępną wiedzę czy obserwować drgania osiowe czy też w kierunku radialnym. Zatem optymalizacja miejsca odbioru w dziedzinie r jest jakoby już przesądzona. Podobnie większość badań procesów WA i stowarzyszonych sygnałów WA jak w (4) wykonuje się dla ustalonego $\theta = \theta_p$, zatem w dalszych rozważaniach sygnału (4) możemy czasem opuścić notacje tych dwu zmiennych pisząc jedynie oznaczenie sygnału jedynie zależnego od czasu, lub obu czasów zależnie od potrzeb;

$$S(r, t, \theta)^r = s(t, \theta) \quad (5)$$

Dla tak zapisanego sygnału WA jak w (5), łatwiej będzie przedstawić zagadnienie filtracji w pozostałych trzech dziedzinach amplitudy, czasu dynamicznego i częstości. Wpierw jednak zdefiniujemy miary amplitudy sygnału. Ponieważ obserwowane procesy i uzyskane sygnały zawierają część szumową, przypadkową nie są więc procesami deterministycznymi, a przypadkowymi, probabilistycznymi. Zatem ich miary powinniśmy definiować po zbiorze obserwacji, jako momenty statystyczne procesu, ale jeśli założyć ergodyczność procesów [7] to średnią po zbiorze możemy zastąpić średnią po czasie obserwacji (T) z operatorem uśredniania $E_t(\cdot)$. Zatem uogólniona miarę procesu $s(t)$ możemy wyrazić jak niżej;

$$s_q(\theta) = E_t(s) = \left| \frac{1}{T} \int_0^T |s(t, \theta) dt|^q dt \right|^{1/q},$$

$$q=1,2,3,4; \quad (6)$$

gdzie q jest rzędem momentu statystycznego i dla pierwszych całkowitych wartości istnieje dobra fizykalna interpretacja; dla $q=1$ mamy amplitudę średnią procesu, $q=2$ średniokwadratowa (*rms*) amplituda często nazywana też miarą energetyczną, a dla $q=\infty$ mamy tzw. amplitudę szczytową (*peak*)

procesu (*sygnału*). Najczęściej w badaniach diagnostycznych używamy jako symptomu stanu amplitudy *rms* ($s_q = s_{rms}$), ale przy badaniach niektórych elementów maszyn, np. łożysk tocznych, amplitudy szczytowe są dobrym symptomem ich stanu technicznego.

Będąc w dziedzinie amplitudy procesów i sygnałów diagnostycznych przywołajmy ich charakterystyki amplitudowe; histogram amplitudowy jako funkcja częstości występowania w zadanym przedziale amplitudowym, skąd w podejściu granicznym uzyskamy gęstość prawdopodobieństwa **rozkładu amplitud $p(s)$** i prawdopodobieństwo występowania amplitudy s , czyli $P(s)$, [6] jako

$$P(s) = \int_{-\infty}^s p(s_c) ds_c, \quad \text{przy warunku,} \\ \int_{-\infty}^{\infty} p(s_c) ds_c = 1. \quad (7)$$

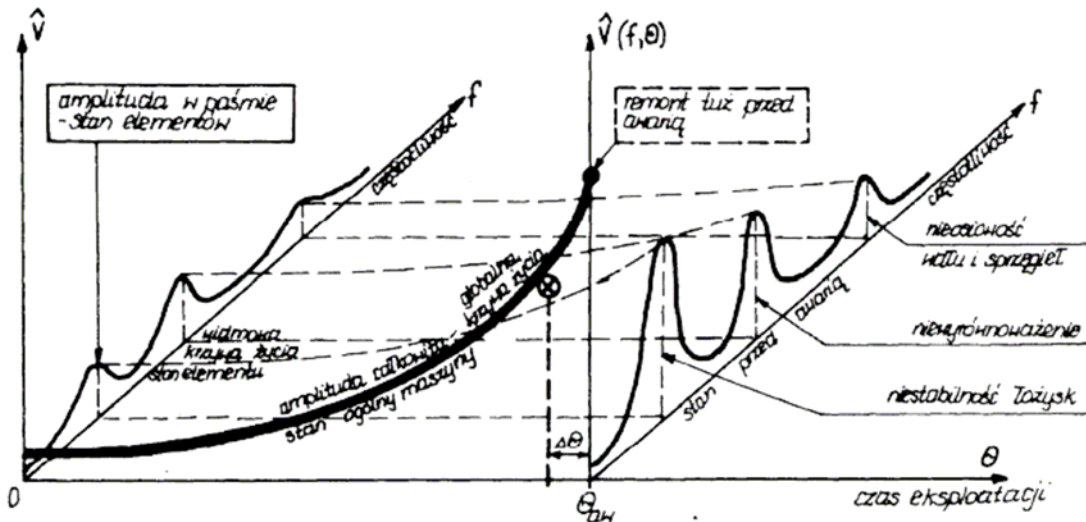
Znajomość rozkładu amplitudowego sygnałów, czy też symptomów, jest często pomocna w diagnostyce, np. uszkodzone łożyska toczne generują nie gaussowskie sygnały, a histogramy symptomów w populacji monitorowanych maszyn są też nie gaussowskie, na ogół **prawoskośne**.

Wkraczając do dziedziny czasu dynamicznego t sygnałów przywołajmy od razu dziedzinę sprzężoną przez transformatę Fouriera, czyli dziedzinę częstości f (Hz), która ma doskonałe przełożenie na zakresy częstości drgań i hałasu maszyn. Widmo fourierowskie sygnału jest zdefiniowane następująco [7];

$$S(f, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t, \theta) \exp(-i2\pi f \cdot t) dt \quad (8)$$

A wraz z upowszechnieniem cyfrowego przetwarzania sygnałów (*digitalizacja czasu-próbkowanie, kwantyzacja amplitudy*), ta zasadnicza definicja ma cały szereg cyfrowych implementacji, np. widmo krótkoczasowe (*transformata krótkoczasowa*), itp. Jeśli teraz widmo sygnału przemnożymy przez dodatnio zdefiniowaną funkcję; $U(f) > 0$ dla $0 < f < \infty$, to w ten sposób zdefiniowaliśmy **filtr częstościowy**, który z całego sygnału pozwala wyciąć interesujący nas zakres częstości przydatny diagnostycznie, np. składowa obrotowa potrzebna do oceny wyrównoważenia, bądź też pasmo częstości wysokich używane do oceny łożysk tocznych. Można również definiować filtry równoważne do uśredniania synchronicznego, zgodnego z obrotami interesującego nas elementu maszyny, co oddaje nieocenione usługi w diagnostyce maszyn wirnikowych, przekładni, itp.

Analiza fourierowska, często zwana **analiza widmową** dała inny wymiar i potencję diagnostyce maszyn, wymiar rozwijających się uszkodzeń. Dobra ilustracja tych właściwości daje rysunek 4 zaczerpnięty z [1].



Rys.4. Ilustracja idei diagnostyki drganiowej maszyn prostych przez pomiar amplitudy całkowitej prędkości drgań i analizę widmową sygnału prędkości dla oceny zawansowania różnych defektów, w różnych czasach życia θ , [1]

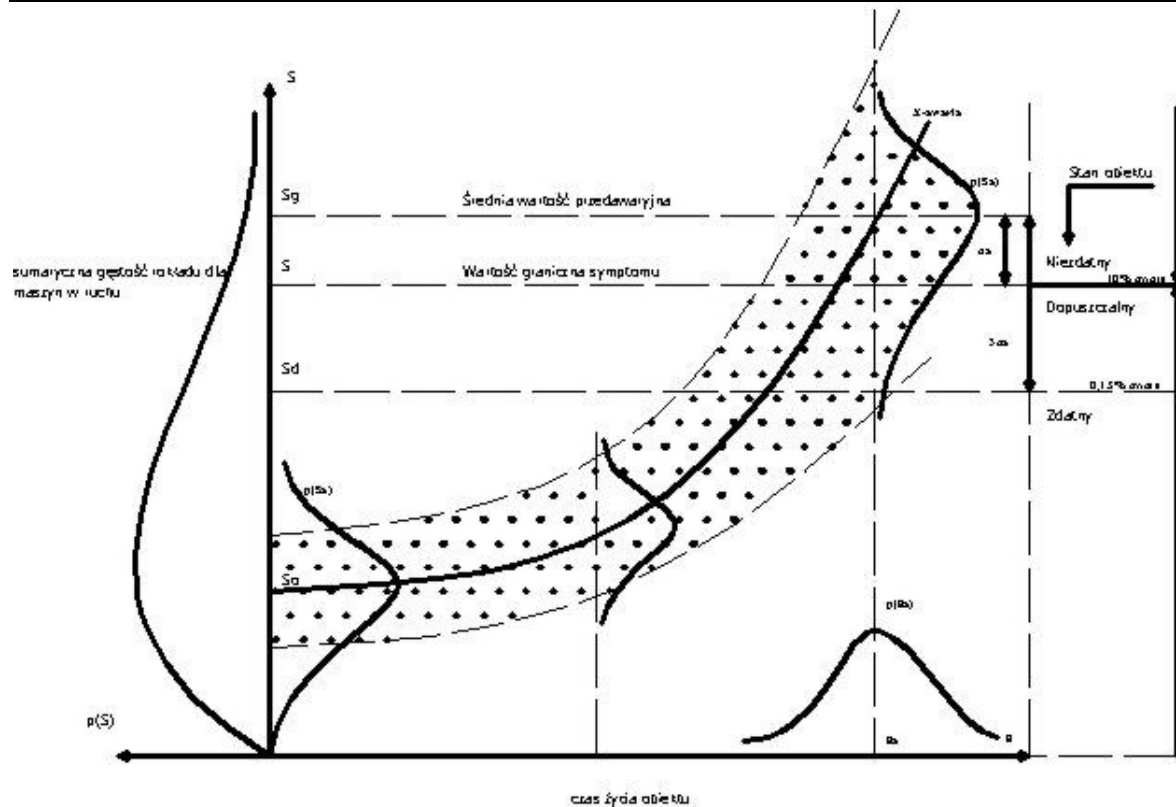
Rysunek jest prawie samowyjaśniający, ale zwróćmy uwagę na zaznaczoną tam dodatkową możliwość oceny **resztkowego czasu życia** maszyny $\Delta\theta_a$. Oczywiście pod warunkiem że mamy pewne doświadczenie eksploatacyjne i nie obserwujemy tej maszyny pierwszy raz, albo też posiadamy symptomowy model diagnostyczny danej maszyny, o czym jeszcze będziemy mówić.

4. EWOLUCJA I OCENA STANU

Przypatrując się lepiej ostatniemu rysunkowi widzimy, że istotą zużywania się maszyn jest narastanie uszkodzeń / defektów cząstkowych F_i , o czym mówiliśmy już na samym początku definiując je w relacji (1). Jak widać te uszkodzenia mają charakter pierwotny, gdyż ich obecność i zaawansowanie generują tu odpowiedni prążek widmowy w amplitudzie prędkości drgań. Często mają one również charakterystykę wymiarowa, możliwą do

określenia w specjalnych testach przeprowadzanych po wyłączeniu maszyny z ruchu. My jednak bazując na idei rysunku 4 nie zamierzamy wyłączać maszyny z ruchu, a całość wnioskowania diagnostycznego, dotyczącego rodzaju uszkodzenia, jego zaawansowania i możliwej **wartości granicznej** symptomu S_i otrzymać w trakcie monitorowania maszyny w procesie produkcyjnym.

Kluczowym pojęciem w tym względzie jest krzywa życia, czyli przebieg obserwowanego symptomu w skali życia maszyny, taka pogrubiona krzywa na rysunku 4. Wyobraźmy sobie teraz że prowadzimy eksperyment czynny z populacją kilkudziesięciu maszyn uruchomionych od stanu nowego $\theta = 0$ aż do ich awarii czyli $\theta = \theta_a$, monitorując przy tym w ustalonych odstępach czasu $\Delta\theta$ i ustalonych warunkach symptomu stanu $S(\theta)$. Uzyskamy wtedy gęstwinę punktów pomiarowych, które można przekształcić na odpowiednie histogramy symptomowe tak jak na rysunku 5, [1].



Rys. 5 Statystyczna krzywa życia symptomu jako rezultat eksperymentu czynnego na populacji maszyn i wynikowe histogramy symptomów w różnych stanach [1]

Jak widać z rysunku cztery histogramy pośrednie, początkowej wartości symptomu $p(s_0)$, rozkładu czasu awarii $p(t_a)$, rozkładu symptomu awarii $p(s_a)$, możemy w pierwszym podejściu uznać za symetryczne i nawet gaussowskie. W związku z tym możemy wyznaczyć wartość graniczną symptomu S_1 dopuszczalną w eksploatacji przy założonym procencie możliwych awarii. Gdybyśmy przyjęli $S_1 = S_a$ to z własności rozkładu gaussowskiego można statystycznie przyjąć połowa maszyn uległa by awarii, natomiast tylko 16% dla

$$S_1 = S_a - \sigma_a \quad (9)$$

i taka wartość graniczną możemy przyjąć w pierwszym przybliżeniu, udokładniając ją w miarę nabywania doświadczeń eksploatacyjnych i polityki remontowej parku maszynowego.

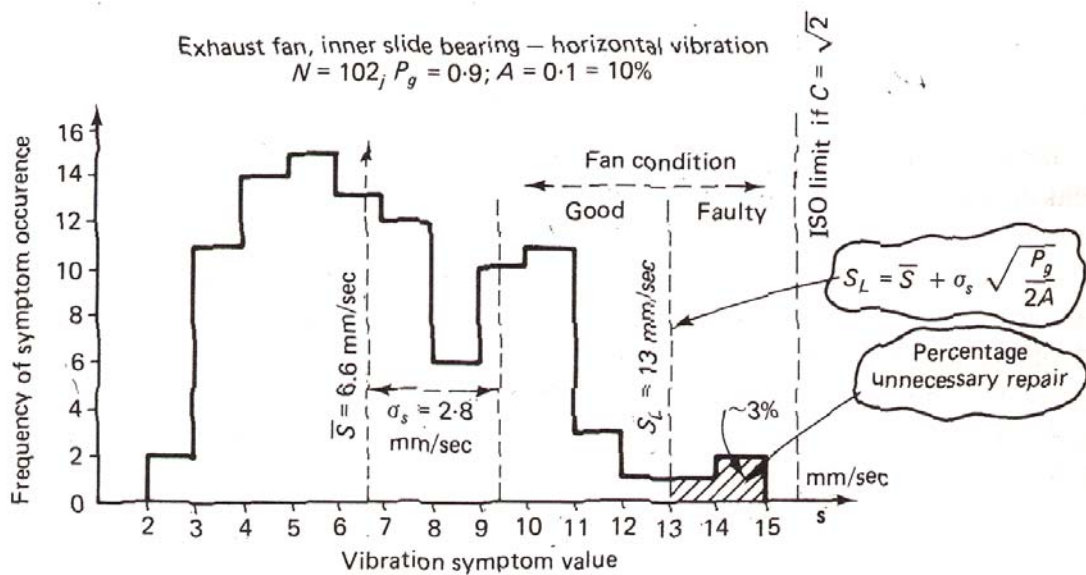
Jest to dość grube przybliżenie wartości granicznej S_1 , a czy można je udokładnić podpierając się modelem czy teorią? Okazuje się że tak, jeśli wykorzystać definicje niezawodności symptomowej $R(S)$, [8], [9], i posłużyć się **regułą Neymana-Pearsona** zaczerpniętą z teorii decyzji statystycznych [5]. Pojęcie niezawodności symptomowej zdefiniowano w [1], a w całej oprawie matematycznej w [9]. Natomiast reguła Neymana-Pearsona, zdefiniowana pierwotnie do wykrywania błędnych odczytów radarowych, zinterpretowana diagnostycznie

wymaga znajomości gotowości $G \leq 1$ grupy eksploatowanych obiektów i określenia dopuszczalnego prawdopodobieństwa zbędnych remontów maszyn $A \ll 1$, np. $A = 0.05\%$. Wtedy wartość graniczna symptomu S_1 wyznaczymy z wzoru [8, 9];

$$G \cdot R(S_1) = A \quad (10)$$

Można to zrobić numerycznie⁸, graficznie na histogramie symptomowym jak na rysunku 6, lub analitycznie, jeśli dysponujemy modelem symptomowym niezawodności [8 tab.2.2].

8. Patrz oprogramowanie użyte później w pracy.



Rys.6. Przykład wyznaczania wartości granicznej symptomu drganiowego maszyn na podstawie histogramu danych nadzoru [3]

Mówiąc o ewolucji stanu maszyn warto skrótkowo zreferować tu koncepcje maszyny jako procesora energii. A idea tak ma poparcie w głębszej analizie rysunku 1. Z punktu widzenia zużyciowego mamy tam wejście energii i/lub zasilania surowcowego, wyjście produktu użytecznego lub przekształconej energii i strumień dyssypowanej energii zewnątrz i wewnątrz. Dyssypacja wewnętrzna jest bardzo mała (*procesy zużyciowe*), lecz ma charakter kumulacyjny i wyczerpuje stopniowo **zapas życia** maszyny. Koncepcja ta przedstawiona jest na rysunku 7, gdzie uzewnętrzniono również cały szereg destrukcyjnych sprzężeń zwrotnych, sterowanych zaawansowaniem zużycia wewnątrz maszyny.

Sam procesor energii może służyć jako model wielu systemów z przetwarzaniem energii, nawet do modelowania organizacji gospodarczej z procesem inwestycyjnym, z ograniczeniem produkcji i zasilania na skutek starzenia [10]. Do naszych celów weźmy jedynie pod uwagę pierwsze sprzężenie, gdzie zakumulowana energia destrukcji E_d steruje w dodatnim sprzężeniu zwrotnym dyssypacją zewnętrzną V , (*im maszyna bardziej zużyta tym więcej wibruje, grzeje się i ma gorsze osiągi*). Jeśli rozważyć stronę analityczną modelu procesora energii to przy najprostszyc założeniach [11] otrzymamy rozwiązanie na energie dyssypowaną zewnątrz w postaci;

$$V(\theta) = V_0 \left(1 - \frac{\theta}{\theta_a}\right)^{(-1)}. \quad (11)$$

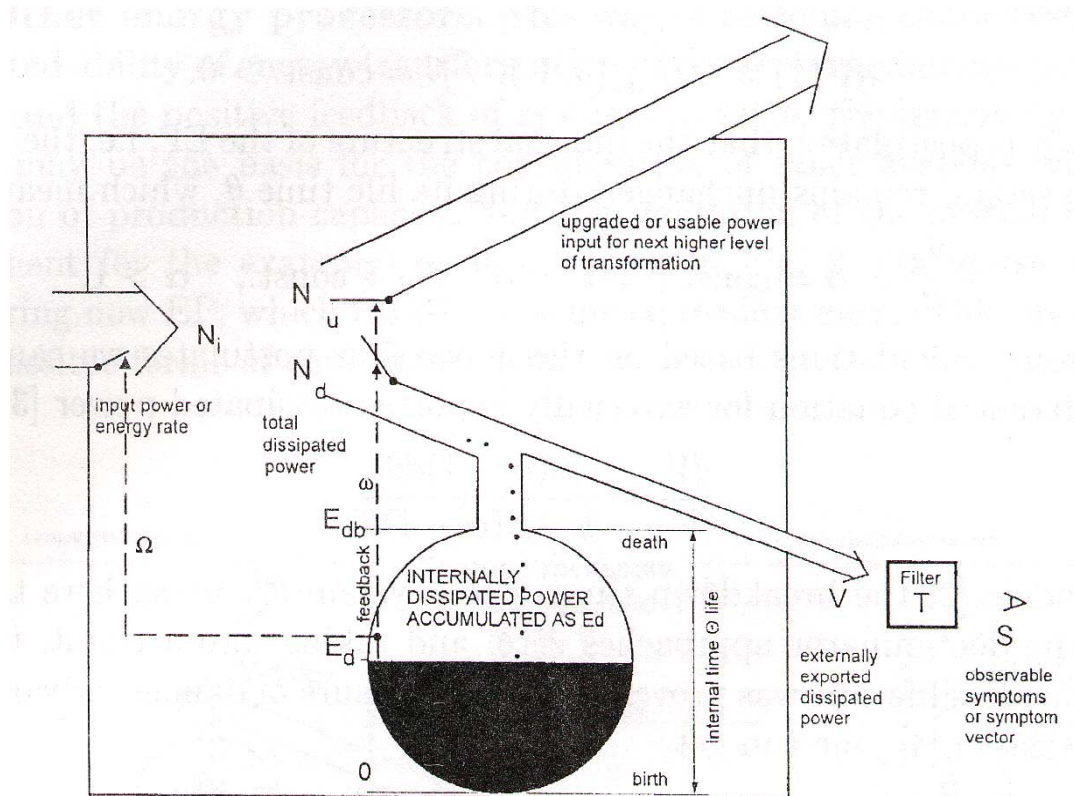
Wprowadzając teraz do rozważań operator symptomowy⁹ $S=\Phi(V)$, to w zależności od formy operatora (*potęgowy, logarytmiczny, itp.*), uzyskamy symptomowe krzywe życia $S(\theta)$, i niezawodności symptomowe $R(S)$ dla różnych modeli statystycznych

populacji obiektów o różnych modelach zużycia; typu **Weibull, Pareto, Frechet** [8, tab2.2]. Najprostszy, potęgowy i jednoparametrowy model Pareto daje relacje diagnostyczne postaci;

$$S(\theta) = S_0 \left(1 - \frac{\theta}{\theta_a}\right)^{(-\gamma)}, \text{ oraz } R(S) = \left[\frac{S}{S_0}\right]^{-\gamma} \quad (12)$$

Z eksperymentu biernego (*lub czynnego*) na populacji monitorowanych maszyn można wyznaczyć parametr rozkładu symptomu γ , wtedy zagadnienie prognozowania następnej wartości symptomu $S(\theta_{n+1})$, lub resztkowego czasu do awarii $\Delta\theta_a$, bądź wyznaczanie wartości granicznej S_1 (z uwzględnieniem (10)) jest łatwo rozwiązywalne.

9. Ta sama energia dyssypowana daje różne efekty w procesach resztkowych, zależnie konstrukcji maszyny jak i jej procesów roboczych. Stąd wprowadzono pojęcie operatora symptomowego.



Rys.7. Maszyna jako procesor energii z dyssypacją i destrukcyjnymi sprzężeniami zwrotnymi[10]

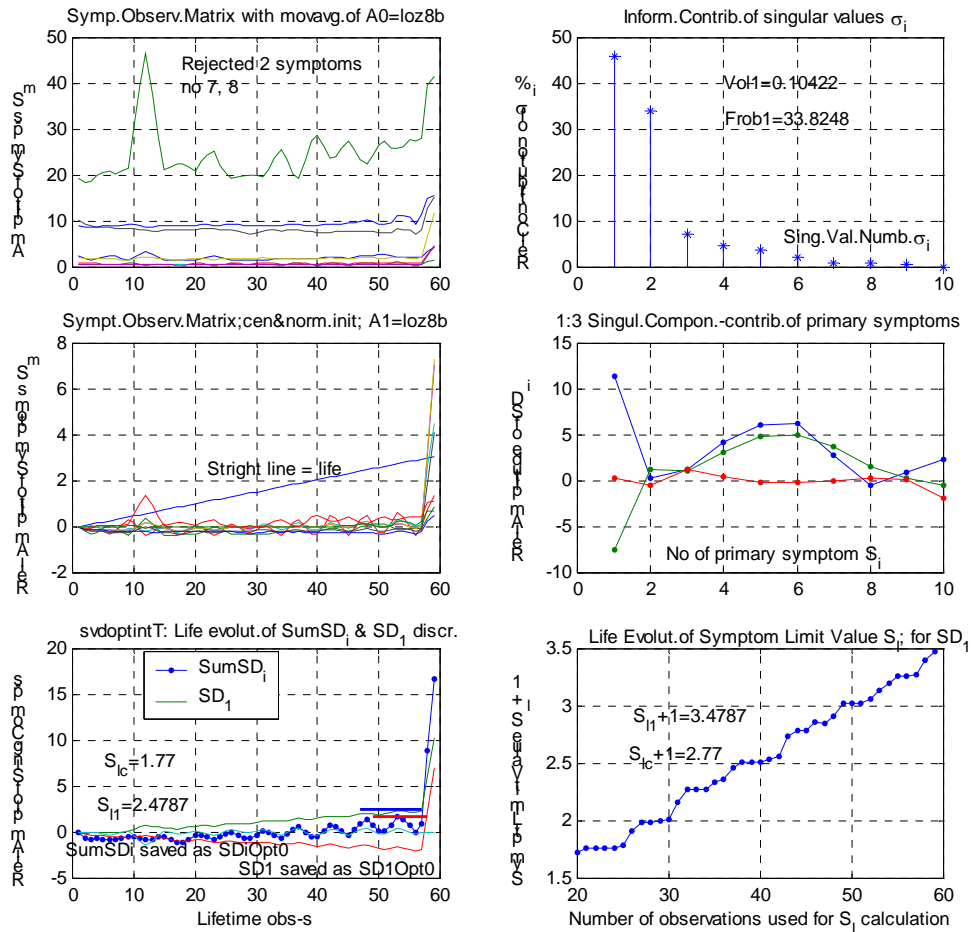
5. DIAGNOSTYKA WIELOWYMIAROWA I WIELOSYMPTOMOWA

We wstępie zasygnalizowano już, że w maszynie rozwija się współbieżnie wiele uszkodzeń, a rysunek 4 pokazuje, że stosując dodatkowe metody analizy i przetwarzania sygnałów można je wykryć i ocenić z jednego obserwowanego sygnału. Współczesne systemy pomiarowe umożliwiają jednoczesną obserwację wielu procesów i jednoczesne utworzenie z nich jeszcze większej liczby symptomów. Mamy zatem możliwość stworzenia i wykorzystania wielowymiarowej przestrzeni obserwacji $S_j(\theta)$, by następnie rzutować zebraną informację na przestrzeń uszkodzeń obiektu $F_i(\theta)$.

Nasze zadanie wielowymiarowej diagnostyki wygląda obecnie jak niżej. Obserwujemy zbiór symptomów; $S_j(\theta)$, $j=1\dots r$, w odstępach czasu życia $\Delta\theta$, tworząc ciąg odczytów symptomów; $n=1\dots m$. Stworzyliśmy w ten sposób symptomowa macierz obserwacji (SMO) o r symptomowych kolumnach i m wierszach odczytów, przy czym na ogół $m > r$ i mamy prostokątną SMO. Natura symptomów jest na ogół różna fizycznie, bo to może być czas życia, obiektu w tygodniach, amplitudy drgań przemieszczeń, prędkości, przyspieszeń, poziom hałasu w dB, moc napędowa lub moment obrotowy silnika, itd. Zatem, konieczny jest wstępny pre-processing SMO, a potem

dopiero ekstrakcja informacji diagnostycznej za pomocą jednej z metod obróbki macierzy prostokątnych. Wchodzą tu w grę dwie metody; principal component analysis (PCA) i singular value decomposition (SVD). Pierwsza jest bardzo popularna, zwłaszcza w psychologii matematycznej, ale niestety operuje na iloczynnie SMO z jej wersją transponowaną, natomiast druga operuje wprost na SMO wyzbywając się niedogodności pierwszej i dlatego w diagnostyce jest preferowana przez obecnego autora.

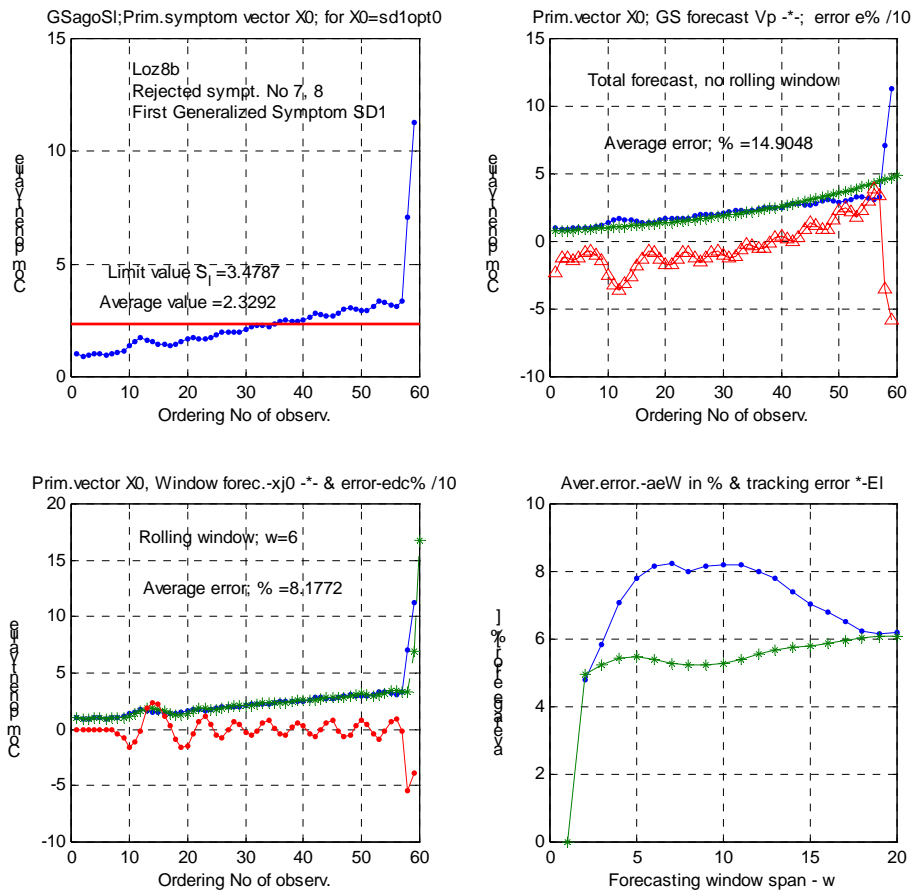
Na kolejnych dwu rysunkach przedstawione są rezultaty obliczeń oprogramowania opartego o zreferowane wyżej rezultaty detekcji uszkodzeń i ich oceny diagnostycznej. Ostatni zaś rysunek pokazuje rezultaty prognozy w oparciu o najnowsza chińską metodę; **grey system theory** (GST), [13, 14] stosowaną w wielu dziedzinach nauki i gospodarki w wypadkach, kiedy mamy niewiele i do tego niepewnych danych z badań. A taka właśnie sytuacja zachodzi często w diagnostycznej ocenie maszyn. Oceniany obiekt (rys.8) to wentylatorowy młyn węglowy pracujący w Poznańskiej Elektrociepłowni Karolin, na którym mierzono skuteczną prędkość drgań V_{rms} w 11tu punktach pomiarowych na korpusie maszyny przez okres prawie 60 tygodni ($\Delta\theta = 1$ tydzień).



Rys. 8. Efekt wielowymiarowego przetwarzania SMO młyna wentylatorowego metoda SVD [12]

Obrazek górny lewy rysunku 8 przedstawia SMO tak jak została zanotowana w cotygodniowych pomiarach w 11 tu punktach, przez prawie 60 tygodni, a lewy środkowy obrazek przedstawia tę samą SOM po pre-procesingu, tzn. po normalizacji do wartości początkowej i po odjęciu tej wartości od odczytów każdej kolumny. Dodano tu również nowy symptom, czas życia maszyny, co widać w postaci wznoszącej linii prostej. Jak widać po normalizacji niewiele się dzieje w sensie zmiany stanu i dopiero kilka ostatnich odczytów może ewentualnie na to wskazywać, co już znacznie lepiej widać po zastosowaniu SVD, na obrazku lewym dolnym. Na obrazku tym również zaznaczono wartości graniczne uogólnionych symptomów wyznaczone metodą niezawodności

symptomowej (obrazek prawy dolny). Obrazek środkowy prawy pokazuje zawartość informacji, jakie niosą poszczególne symptomy mierzone pierwotnie i służy do informacyjnej optymalizacji SMO. Jak zaznaczono na obrazku górnym prawym, wstępnie odrzucono już dwa symptomy, a z analizy obrazka lewego środkowego wynika, że mamy jeszcze kilka kandydatów do odrzucenia w następnym kroku optymalizacji. Wreszcie obrazek górny prawy pokazuje zawartość informacji o poszczególnych uszkodzeniach w SMO i widać, że na czas wyłączenia wentylatora rozwinęły się dostatecznie dwa uszkodzenia; niewyrównoważenie wirnika i jedno z jego łożysk.



Rys. 9. Prognoza stanu młyna dla symptomu pierwszego uszkodzenia (SD1) metodą GST z ruchomym okienkiem prognozowania i bez okienka, [12]

Prognozę przyszłej wartości symptomu pierwszego uszkodzenia SD1, rysunek 9, wykonano chińska metodą Grey System Theory [np. 13, 14] zaadoptowaną niedawno do celów diagnostyki. Obrazek górny prawy pokazuje tu symptom pierwszego uogólnionego uszkodzenia SD1, wraz z odpowiednimi wartościami granicznymi S_1 i wartością średnia. Pozostałe obrazki są samo wyjaśniające i widać z nich że prognoza okienkowa GST daje mniejsze błędy niż prognoza ze wszystkimi wynikami odczytu. Widać też dalej, że manipulując szerokością okna w można minimalizować błąd prognozy (obrazek prawy dolny).

6. NOWE KIERUNKI W DIAGNOSTYCE MASZYN

Jak to zwykle bywa w jedno autorskich pracach przeglądowych trudno znaleźć miejsce na referowanie dokonań innych autorów. Dobrze się jednak składa, że społeczność diagnostyki maszyn przygotowała już dwa poradniki [3,4], w których można znaleźć kompendium wiedzy krajowych autorów, również dobrze zapoznanych w nauce światowej. Dlatego też wiele nowych trendów w badaniach można znaleźć w najnowszym poradniku [4], w szczególności

w rozdziałach dotyczących sztucznej inteligencji (R.22) i technologii informatycznych w diagnostyce (R.23), gdzie rozwija się szerzej nowe koncepcje inteligentnych systemów diagnostycznych, oraz metodologii pozyskiwania wiedzy diagnostycznej.

Najnowszym dzieckiem diagnostyki maszyn jest diagnostyka konstrukcji (*SHM – Structural Health Monitoring*) gdzie stosuje się najnowsze zdobycze nauki, metrologii, technologii informatycznych, a układy nadzoru są zwykle zintegrowane z konstrukcją, a mówi się już o układach samo diagnozujących i samo naprawczych (patrz np. prace W. Staszewskiego i W. Ostachowicza).

Gałęzią boczną diagnostyki maszyn, która zaczyna już dojrzeć metodologicznie, jest **diagnostyka procesów**. By się o tym przekonać warto skonsultować pierwszy poradnik w tej dziedzinie [18]. W skrócie mówiąc jest to diagnostyka ukierunkowana na procesy wytwarzania zwłaszcza przemysłu chemicznego i jest silnie skojarzona z automatyczną regulacją tych procesów. Jest tam również miejsce na liczące się zastosowania sztucznej inteligencji i technologii informatycznych.

Ostatnia i najświeższą nowinką warta wspomnienia w tym bardzo skrótowym przeglądzie jest **diagnostyka wirtualna**, gdzie obrazowo mówiąc zamiast pytać maszynę o „samopoczucie i zdrowie” odpytuje się jej model odpowiednio skomplikowany. Model taki musi ujmować nie tylko stronę funkcjonalną systemu, ale również posiadać wielowariantowe modele procesów zużyciowych obiektu. Nie jest to takie proste, bo oprócz stosownej bazy wiedzy trzeba mieć stosowne oprogramowanie, które jest zdolne uchwycić te wielowariantowość. Przykładem wczesnych zastosowań diagnostyki wirtualnej są badania komfortu jazdy samochodu KIA na różnych drogach [15].

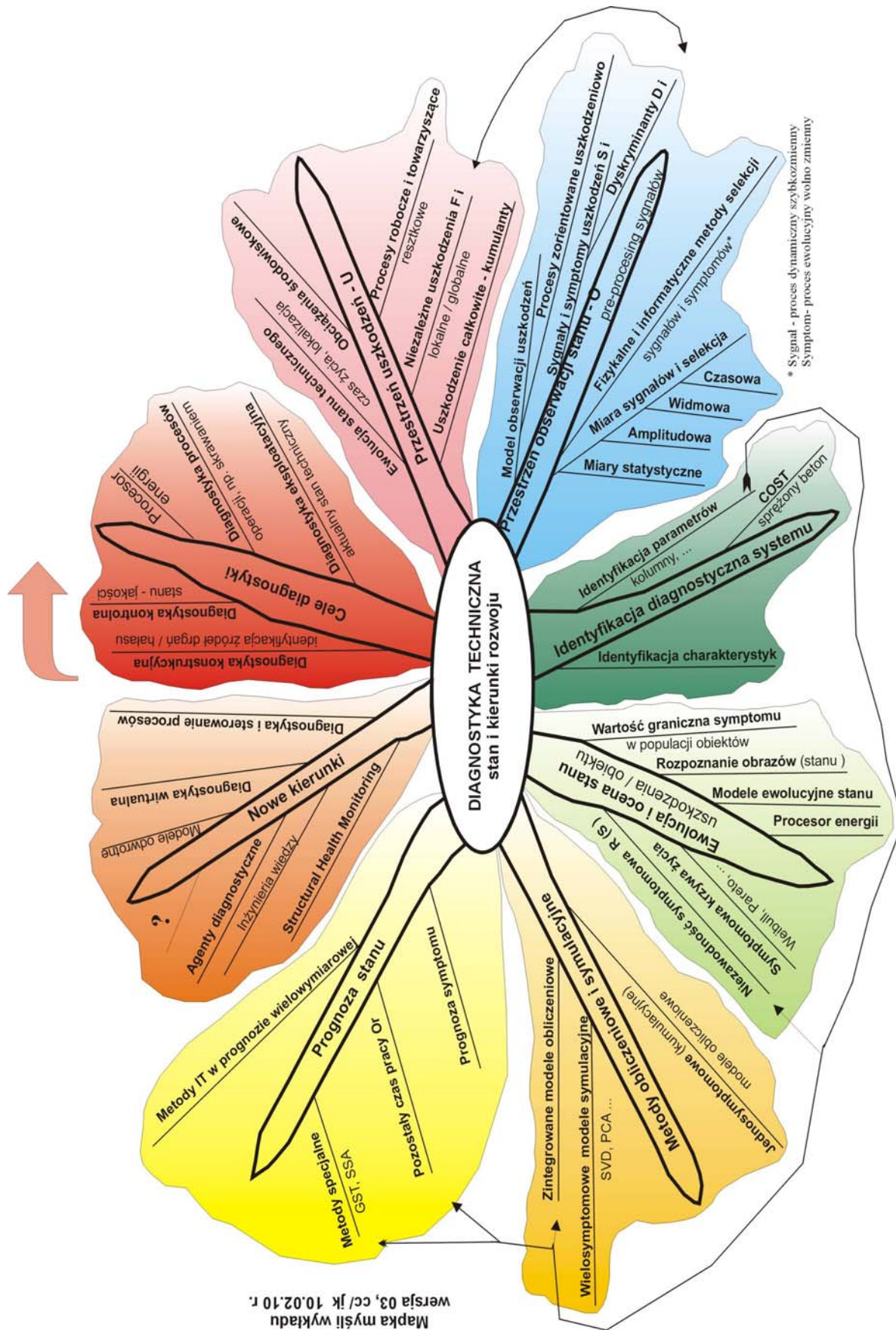
8. PODSUMOWANIE

Jak się wydaje najważniejsze elementy diagnostyki maszyn, w szczególności diagnostyki wibroakustycznej, zostały pokazane i omówione od strony idei i możliwych zastosowań. Nie wszystko

jednak zostało tu poruszone w należytej formie i treści i właściwie zintegrowane by pojąć istotę i całość dorobku diagnostyki technicznej. Ten brak jak się wydaje uzupełni mapka myślowa diagnostyki, która w sposób graficzny i kolorowy integruje całość problematyki diagnostyki, pokazując jednocześnie najważniejsze elementy pojęciowe i linie wnioskowania. Oczywiście nie wszystko, co na mapce zostało omówione w tekście, ale można to znaleźć w eksponowanej niżej literaturze przedmiotu.

Podziękowania

Praca powstała dzięki częściowemu finansowaniu z grantu R.4.09, Agent diagnostyczny w użytkowaniu maszyn i urządzeń technologicznych, Min. Nauki i Szkoln. Wyższego.



Mapka myśli wykładu
 wersja 03, cc/ jk 10.02.10 r.

9. LITERATURA

1. Cempel C., *Diagnostyka Wibroakustyczna Maszyn*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1985,s234, również; PWN Warszawa, 1989,s234.
2. Cempel C., *Podstawy Wibroakustycznej Diagnostyki Maszyn*, WNT, Warszawa, 1982,s242.
3. Cempel C., Tomaszewski F., (red.), *Diagnostyka Maszyn, Zasady ogólne, przykłady zastosowań*, Wyd. ITE, Radom 1992, s411.
4. Żółtowski B., Cempel C., (red.), *Inżynieria Diagnostyki Maszyn*, Wyd. ITE, Radom 2004, s1110.
5. Franks L. E., *Teoria Sygnałów*, PWN, Warszawa, 1975,s401.
6. Bendat J. S., Piersol A. G., *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, Wiley Interscience, New York 1971,p464.
7. Bracewell R. *Przekształcenie Fouriera i jego Zastosowania*, WNT Warszawa 1968, s. 413.
8. Natke H.G., Cempel C., *Model-aided Diagnosis of Mechanical Systems*, Springer Verlag, Berlin 1997,p248.
9. Cempel C., Natke H. G., Yao J. P. T., Symptom Reliability and Hazard for Systems Condition Monitoring, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2000, Vol. 14, No 3, pp 495 – 505.
10. Cempel C., Energy Processors in Systems Engineering and their Evolution, *Bulletin of Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, Vol. 45, No 4, 1997, pp 495 – 511.
11. Cempel C., *Teoria i Inżynieria Systemów*, wyd. II, Wyd. ITE, Radom 2008, s291.
12. Cempel C., Optimization of Symptom Observation Matrix in Vibration Condition Monitoring, (referat zamawiany), XXXVI Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Wisła Marzec, 2009. patrz także;
13. Deng J-L., Control problems of grey systems, *Systems and Control Letters*, Vol.1, No 5, March 1982, pp288-294.
14. Guo R., Repairable system modeling via grey differential equations, *Journal of Grey System*, Vol.8, No 1, 2005,pp69-91.
15. Moon I., Oh C. Y., Ride comfort indexing of commercial vehicle using a computational model and a virtual proving ground, *Journal of Automotive Engineering*, 2010, (in print)
16. Blake M. P., Mitchell W. S., *Vibration and Acoustic Measurements Handbook*, Spartan Books, New York, 1972,p350.
17. Collacot R. A., *Mechanical Fault Diagnosis*, Chapman-Hall, London 1977, p320.
18. Korbicz J., i inni (red.), *Diagnostyka Procesów - modele sztucznej inteligencji, zastosowania*, WNT, Warszawa 2002, s828.



płk prof. dr hab. inż. Lesław BĘDKOWSKI
(25.10.1928 – 1.01.2011)

WSPOMNIENIE O PROFESORZE LESŁAWIE BĘDKOWSKIM

Prof. dr hab. inż. Lesław Będkowski urodził się **25 października 1928 r.** w Medenicach, w województwie łwowskim. Dzieciństwo do szesnastego roku życia spędził w centrum polskiego, przedwojennego przemysłu naftowego, w Schodnicy i Borysławiu – na granicy Bieszczad Wschodnich. Może właśnie zapach nafty zmieszany z żywicznym zapachem świerkowych borów pozwolił mu uzyskać wytrzymałość w dążeniu do celów i odporność na trudy życiowe – a także zamiłowanie do górskich wędrówek, które były pasją jego życia.

Po ukończeniu szkoły powszechnej, do pierwszej klasy gimnazjum – uczęszczał już w warunkach wojennych, w ramach tajnego nauczania. Drugą gimnazjalną zaliczył według programu rosyjskiej dziesięciolatki.

W styczniu 1945 roku pośpiesznie opuścił Borysław wraz z Rodzicami – w ramach akcji wysiedlania Polaków. Ze względu na działalność Rodziców w Armii Krajowej dalszy ich pobyt w dotychczasowym miejscu zamieszkania groził aresztowaniem przez NKWD i wywiezieniem całej rodziny do „gługu”.

Po krótkim pobycie w Rzeszowie – na zachodzie trwała jeszcze wojna – w maju 1945 roku osiedlił się w Złotowie na Pomorzu Zachodnim. To urocze niewielkie miasto, otoczone jeziorami – wtedy tonęło w bzach.

W roku szkolnym 1945÷46 ukończył trzecią i czwartą klasę gimnazjalną, zdał pomyślnie końcowy egzamin gimnazjalny i uzyskał małą maturę. Obowiązywał wtedy jeszcze przedwojenny ustrój szkoły średniej. W roku 1948 ukończył liceum ogólnokształcące i uzyskał świadectwo dojrzałości, zdając eksternistycznie egzaminy z jedenastu przedmiotów.

Od dzieciństwa interesował się elektrycznością, a szczególnie emocjonowała go łączność

telefoniczna. Po maturze nie było więc problemu wyboru kierunku studiów – oczywiście wydział elektryczny i łączność. Wtedy – w warunkach powojennych – zdobycie indeksu nie było łatwe (na jedno miejsce kandydowało nawet do 10-ciu chętnych). Studia pierwszego stopnia ukończył w roku 1951 na Wydziale Elektrycznym Szkoły Inżynierskiej w Szczecinie uzyskując dyplom inżyniera elektryka ze specjalnością teletechnika łączeniowa.

Jako posiadacz indeksu z bardzo dobrymi stopniami – uzyskał jedno z dwu miejsc na Politechnice Warszawskiej, gdzie miał odbyć studia magisterskie. Jednak życie potoczyło się inaczej.

Rozpalała się wtedy „zimna wojna” i trwała gwałtowna rozbudowa Wojska Polskiego. W październiku 1951 roku został powołany do zawodowej służby wojskowej i skierowany do – tworzącej się właśnie – Wojskowej Akademii Technicznej. Był to jednak – w tym niechcianym rozwoju wydarzeń – uśmiech losu i ... Sztabu Generalnego. Zawdzięczał to dobremu indeksowi. Praca w WAT dawała w perspektywie możliwości rozwoju naukowego. Warunki – w otoczeniu typowo uczelnianym – były znacznie lepsze niż można było się spodziewać w jakimś, odległym „zielonym garnizonie”. Niestety otrzymał przydział nie do łączności lecz do Wydziału Lotniczego (który nazywał się wtedy „Fakultetem”) do laboratorium Elektrycznych Urządzeń Samolotów. To była przynajmniej elektryczność. Otrzymał stopień porucznika, a wkrótce został kierownikiem laboratorium. Trwała wytężona praca, ponieważ trzeba było budować stanowiska laboratoryjne, a zajęcia ze studentami-podchorążymi już trwały.

Nie otrzymał zezwolenia na studia magisterskie w Politechnice Warszawskiej – odbył więc te studia w WAT, uzyskując w roku 1956 tytuł magistra inżyniera – zgodnie ze swoimi zainteresowaniami, w zakresie łączności. Słuchał wtedy wykładów znanych, polskich profesorów, m.in. Pogorzelskiego, Groszkowskiego, Kilińskiego i innych. W tych pierwszych latach pilnie rozwijał warsztat dydaktyczny. Już wtedy zainteresował się metodami badania zdatności – z oczywistych względów głównie lotniczych urządzeń elektrycznych. Uczestniczył wówczas w realizacji tematu dotyczącego badania zdatności regulatorów napięcia i przekaźników zwrotnych. Jeszcze wtedy nikt nie nazywał tego diagnostowaniem.

Do roku 1963 trwała ustawiczna, intensywna praca nad rozbudową laboratoriów, przygotowaniem wykładów i skryptów – od roku 1957 był już starszym wykładowcą.

W roku 1963 zwrócił uwagę na pierwsze, zagraniczne publikacje na temat diagnostyki technicznej. W Katedrze Urządzeń Radioelektrycznych WAT, prowadzonej przez docenta Władysława Żelazowskiego, powstał zespół, który przystąpił do penetracji dostępnej literatury na ten temat. Wówczas pozycji tych nie było wiele. Był to pierwszy w Polsce i jedyny

wtedy (jak się wydaje) zespół diagnostyki technicznej. Wynikiem prac tego zespołu były pionierskie artykuły o metodach optymalizacji procesu diagnozowania.

W lutym 1968 roku obronił w WAT rozprawę doktorską nt.: „Kontrola stanu obiektów złożonych”. Tego samego dnia obronił rozprawę doktorską Tadeusz Rozwadowski. **Były to dwie pierwsze rozprawy doktorskie z diagnostyki technicznej w Polsce.**

W wyniku dalszych prac oraz obserwacji praktycznych utworzył zarys własnej koncepcji diagnostyki w ujęciu znacznie szerszym, niż to ówczesnie rozumiano. Według tej koncepcji obiekt techniczny zawsze należy rozpatrywać jako element systemu socjotechnicznego. Działaniu takich systemów towarzyszą przepływy informacji o elementach technicznych i ludzkich oraz między otoczeniem i systemem. W związku z tym dalsze swoje badania skierował na teorię diagnostyki, a szczególnie na teorię procesów dozoru w systemach socjotechnicznych. Udowodnił, że dozoru jest uogólnioną formą diagnozowania. Tak ujętą teorię dozoru można odnieść zarówno do pojedynczych urządzeń jak też do dużych systemów technicznych, biologicznych, społecznych i innych. Ze względu na specyfikę wojskową wielu z tych prac nie opublikowano.

W roku 1974 zainteresował się nowym obszarem badawczym – elektroniką samochodową. W roku 1975 – jako kierownik zespołu instytutowego – rozpoczął pracę nad stworzeniem polskiego ABS (hamulcowego układu optymalno-poślizgowego). Fascynowała go społeczna użyteczność tego systemu, jako urządzenia, które w wielu sytuacjach może ratować życie ludzkie. Ponadto wskazywał, że ABS jest w istocie oparty na wielopoziomym dozoru. Prace te zostały uwieńczone udokumentowanym sukcesem. Uzyskał na opracowany układ ok. 10 patentów.

W latach 70-ych opracował teorię potencjałów użytkowych, jako podstawę działań diagnostyczno-terapeutycznych. Zawsze podkreślał, że najważniejszym celem każdego diagnozowania jest identyfikacja zdatości zadaniowej, czyli zdatości do zrealizowania zadania, a nie tylko zdatości do realizowania zadania, czyli zdatości chwilowej, funkcjonalnej. Właśnie tu znajduje zastosowanie teoria potencjałów użytkowych. Wskazywał, że diagnozowanie i terapię techniczną należy rozpatrywać łącznie, systemowo. Podstawowe znaczenie ma – dla procesu eksploatacji – zapewnienie kompatybilności struktury diagnostycznej i obsługowej. Zaproponował uogólnione kryterium kompatybilności tego rodzaju.

Kolejne prace Profesora dotyczyły podstaw diagnozowania systemu człowiek-obiekt, czyli diagnozowania systemu antropotechnicznego. W tym kontekście rozwinął teorię potencjałów użytkowych. Pozwala ona wyznaczać granice dopuszczalnych warunków pracy i graniczne

wartości pobudzeń sterujących systemem. Pozwala też wyprowadzić system pojęć potencjałów bezpieczeństwa.

W efekcie podsumowania tego dorobku naukowego oraz dorobku dydaktycznego i organizacyjnego **uzyskał w roku 1981 stopień naukowy doktora habilitowanego.**

W dalszym ciągu kontynuował prace w obszarze diagnostyki. W tym czasie pojawiły się publikacje zawierające dalsze elementy teorii potencjalności i potencjałów użytkowych oraz ich zależności od diagnozowania sondującego i dozoru. Rozwijał też kolejne elementy teorii dozoru.

W roku 1991 otrzymał z rąk Prezydenta RP tytuł profesora.

W latach 90-ych, wspólnie ze swoim zespołem, rozwinął zastosowanie teorii potencjałów do problemów bezpieczeństwa systemów technicznych. W opublikowanych na ten temat pracach udowadnia się, że bezpieczeństwo zależy od przewagi potencjału bezpieczeństwa nad potencjałem niebezpieczeństwa. W wielu sytuacjach potencjał bezpieczeństwa zależy od sterowania realizowanego przez operatora oraz od właściwości relacji: obiekt-otoczenie. Systemy bezpieczeństwa mają zazwyczaj strukturę trójpoziomą. Składa się ona z modułu osłonowego, modułu interwencyjnego oraz modułu ratunkowego. Funkcja każdego z tych systemów opiera się na informacji dostarczanej przez układy dozoru.

W latach 1997÷2000 kierował zespołem, który opracował komputerowy system doradczy inżyniera osprzętu lotniczego śmigłowca „Sokół” (tzw. SYDIOS). System ten prowadzi inżyniera odpowiednimi „ścieżkami” procedur diagnostycznych w różnych sytuacjach eksploatacyjnych.

Profesor niejednokrotnie polemizował ze specjalistami w zakresie niezawodności na temat podstawowych definicji. Udowadniał m.in., że niezawodność czy nieuszkodzalność nie jest właściwością obiektu w ścisłym tego słowa znaczeniu, lecz jest funkcją właściwości obiektu, obsługiwanego obiektu, warunków funkcjonowania oraz sterowania, a więc jest właściwością systemu eksploatacji.

W ostatnich latach był współtwórcą podstaw teorii diagnozowania w przypadku znacznej niepewności symptomów. W opracowanych elementach tej teorii omówione są przypadki i zaproponowane metody uzyskiwania wysokiej wiarygodności i dokładności diagnoz mimo dużej niepewności symptomów. Metody te mogą być wykorzystywane przy aktywnym utrzymywaniu niezawodności systemów użytkowych np. systemów transmisji informacji. Teoria ta stanowi rozwinięcie interpretacji diagnozy i niezawodności jako szczególnych postaci informacji.

Bogaty dorobek naukowy Profesora charakteryzuje następująca statystyka: jest autorem

lub współautorem 27-u opracowań książkowych, ponad 70-u artykułów naukowych, ponad 140-u referatów konferencyjnych, 12-u patentów.

Przez niemal 60 lat służby i pracy w WAT Profesor aktywnie realizował różnorodne **zadania dydaktyczne**. Był znakomitym dydaktykiem, niezwykle cierpliwym i życzliwym dla wszystkich, którzy zwracali się do Niego o pomoc. Był autorem szeregu nowatorskich pomysłów usprawniających proces dydaktyczny w zakresie np. następujących przedmiotów: Podstawy eksploatacji, Diagnostyka techniczna, Niezawodność eksploatacyjna, Lotnicze urządzenia elektroenergetyczne.

Wysiłek Profesora włożony w proces nauczania scharakteryzować można następującą – bardzo skrótową – statystyką: ok. 10 000 godzin przeprowadzonych zajęć audytoryjnych, 7-u wypromowanych doktorów, ponad 60-u wypromowanych magistrów inżynierów i inżynierów.

Profesor był także aktywny w zakresie **działalności organizacyjnej**. Był członkiem kilku stowarzyszeń naukowych. Między innymi był przewodniczącym Zespołu Diagnostyki Technicznej przy Zarządzie Głównym NOT. Przez dziesięć lat – jako redaktor działu diagnostyki Zagadnień Eksploatacji Maszyn – nadawał kierunek i ostateczny kształt publikacjom ukazującym się w tym kwartalniku. Jako kierownik merytoryczny zrealizował w latach 1986÷2003 pięć krajowych konferencji diagnostycznych pod nazwą „Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów” DIAG. Ponadto pełnił następujące funkcje społeczne: przewodniczący Zespołu Diagnostyki Cybernetycznej PTC (1983÷1991); v-przewodniczący Zespołu Diagnostyki SPE KBM PAN (1983÷1991); członek Prezydium Sekcji Podstaw Eksploatacji KBM PAN (1984÷1990); v-prezes Zarządu Głównego Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej (1990÷1993); członek Komitetów Naukowych wielu konferencji; członek Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej

(od 1990 r.); członek Komitetu Budowy Maszyn PAN (1990÷1993); członek Polskiego Towarzystwa Bezpieczeństwa i Niezawodności (od 1997 r.); przewodniczący Komisji Nauki Rady Wydziału Elektroniki WAT (1985÷2003); członek Rady Naukowej przy Zarządzie Głównym PTC (1984÷1991); członek Rady Naukowej Instytutu Systemów Energetycznych we Wrocławiu (1986÷1990).

Za całokształt swej działalności Profesor był wielokrotnie odznaczany i nagradzany, m. in. zostały Mu przyznane: Krzyż Oficerski i Krzyż Kawalerski OOP, Złoty i Srebrny Krzyż Zasługi, Medal Komisji Edukacji Narodowej, Złoty Medal „Zasłużony dla WAT”, Wpis do „Złotej Księgi Dokonań WAT”, Medal „Zasłużony dla lotnictwa” i inne.

Profesor L. Będkowski zakończył służbę wojskową w stopniu pułkownika lotnictwa w roku 1994.

Na zakończenie wspomnienia sylwetki nieodżałowanej pamięci Profesora nie sposób pominąć Jego charakterystyki jako człowieka, przyjaciela, pracownika.

Do dominujących cech charakterologicznych Profesora należały: uczciwość, prostolinijność i koleżeńskość – a przy tym niezwykłą pracowitość, solidność i wysoka wymagalność – zwłaszcza w stosunku do siebie. Charakterystycznym elementem osobowości Profesora była niezwykła ciekawość życia i jego tajemnic. To właśnie stanowiło siłę napędową Jego działań.

Pasją poza zawodową Profesora była górską turystyką pieszą, historia przemysłu naftowego zagłębia borysławskiego, poezja i muzyka poważna.

*Opracował: Tadeusz Dąbrowski
Dyrektor Instytutu Systemów Elektronicznych
Wydziału Elektroniki WAT*



prof. dr hab. inż. Henryk MADEJ
(1947–2011)

Wspomnienie o prof. Henryku MADEJU

Henryk Marian Madej urodził się 17 listopada 1947 r. w Bukowcu Opoczyńskim. Studia na Wydziale Elektrotechniki Górniczej i Hutniczej AGH w zakresie specjalności automatyka i telemechanika ukończył w roku 1972. Jako inżynier stażysta rozpoczął pracę w AGH. Od grudnia 1973 r. pracował w Środowiskowym Laboratorium Drgań i Szumów Instytutu Podstaw Budowy Maszyn AGH, a po reorganizacji w Instytucie Mechaniki i Wibroakustyki. Zajmował się pomiarami wielkości mechanicznych i akustycznych metodami elektrycznymi oraz obsługą i programowaniem maszyny cyfrowej. Brał czynny udział w pracach naukowo-badawczych Instytutu Mechaniki i Wibroakustyki.

Pracę na Politechnice Śląskiej rozpoczął w październiku 1976 r. w Instytucie Transportu na stanowisku starszego asystenta. W latach 1976–1979 opracował procedury eksploatacyjnej diagnostyki maszyn wirnikowych i urządzeń Huty Katowice. Uzyskane doświadczenia wykorzystał w rozprawie doktorskiej *Ocena stanu wybranych przekładni zębatych metodami wibroakustycznymi*. W 1984 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych na Wydziale Maszyn Górniczych i Hutniczych AGH i został zatrudniony na stanowisku adiunkta w Instytucie Transportu Politechniki Śląskiej.

Po półrocznym stażu przemysłowym w zespole diagnostyki Huty Katowice był latach 1986–1996 konsultantem ds. diagnozowania maszyn wirnikowych. W kolejnych latach zajmował się głównie problematyką minimalizacji drgań i hałasów oraz diagnozowania stanu maszyn metodami wibroakustycznymi, a zwłaszcza zagadnieniami wibroaktywności układów napędowych, diagnostyką wibroakustyczną przekładni zębatych oraz silników spalinowych. W latach 2001–2003 był kierownikiem projektu badawczego KBN i na podstawie tych badań przygotował rozprawę habilitacyjną *Minimalizacja aktywności wibroakustycznej korpusów przekładni zębatych*. Stopień doktora habilitowanego uzyskał

na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH i w 2004 r. został mianowany na profesora nadzwyczajnego na Wydziale Transportu Politechniki Śląskiej.

Po habilitacji kierował pracami naukowo-badawczymi związanymi z oceną procesu spalania w silnikach spalinowych metodami wibroakustycznymi oraz wpływem cech konstrukcyjnych i zużycia na wibroaktywność układów napędowych z przekładniami zębatymi. W latach 2005–2008 był kierownikiem własnego projektu badawczego *Diagnozowanie uszkodzeń mechanicznych w silnikach spalinowych maskowanych przez elektroniczne urządzenia sterujące*. Wyniki przedstawił na międzynarodowych kongresach i w czasopismach oraz w monografii (2009).

Jako główny wykonawca projektu badawczego *Wpływ cech konstrukcyjnych i zużycia na wibroaktywność układów napędowych z przekładniami zębatymi*, realizowanego w latach 2006–2009, prof. H. Madej był członkiem zespołu, który opracował metodykę projektowania przekładni zębatych o obniżonej wibroaktywności. Wyniki prac zostały w roku 2009 opublikowane w monografii *Wibroaktywność przekładni zębatych. Wpływ cech konstrukcyjnych i zużycia elementów na wibroaktywność układów napędowych z przekładniami zębatymi*.

W 2010 roku prof. Madej rozpoczął badania w zakresie diagnostyki silników w ramach projektu *Wspomaganie systemu OBD analizą sygnałów wibroakustycznych jako metoda diagnozowania uszkodzeń silników spalinowych*.

Dorobek naukowy prof. Henryka Madeja obejmuje 9 projektów badawczych, których był kierownikiem lub głównym wykonawcą, autorstwo lub współautorstwo 4 monografii i 7 rozdziałów w monografiach oraz ponad 230 publikacji naukowych. Prof. Madej był wykonawcą 30 prac naukowo-badawczych i ekspertyz oraz współautorem 3 patentów. Współpracował m.in. z AGH w Krakowie i Politechniką Warszawską.

W roku 2009 był głównym organizatorem nowych specjalności studiów w przedsięwzięciu współfinansowanym przez Unię Europejską w ramach EFS i nadzorował program wymiany staży młodych pracowników naukowych. Był opiekunem naukowym grupy młodych nauczycieli akademickich, z których dwóch z wyróżnieniem obroniło prace doktorskie, a kolejni przygotowują się do obrony. Od roku 2005 pełnił na Wydziale Transportu funkcję kierownika środowiskowych studiów doktoranckich. Był także promotorem około 130 prac dyplomowych magisterskich i inżynierskich oraz recenzował około 350 prac dyplomowych.

W roku 2009 na zaproszenie Cologne University of Applied Sciences prowadził w ramach programu ERASMUS w wykłady nt. monitorowania stanu i diagnostyki układów napędowych i silników spalinowych.

W okresie 35 lat pracy na P.Ś. prof. H. Madej prowadził wykłady z przedmiotów: *elektrotechnika i elektronika samochodowa, urządzenia elektryczne i elektroniczne w pojazdach samochodowych, metrologia i wibroakustyka stosowana, mechatronika samochodowa, podstawy techniki pomiarowej, wybrane zagadnienia wibroakustyki oraz technika cyfrowa w pojazdach*. Był autorem programu wykładów z przedmiotu *metody wibroakustyczne w badaniach pojazdów* w językach polskim i angielskim.

Od roku 2008 pełnił funkcje prodziekana ds. organizacji i rozwoju oraz pełnomocnika dziekana ds. studiów w zamiejscowym ośrodku dydaktycznym w Tychach.

Osiągnięcia prof. H. Madeja były doceniane przez środowisko akademickie, w którym zyskał znaczny autorytet. Był zapraszany do udziału w wielu komitetach naukowych i organizacyjnych konferencji międzynarodowych i krajowych.

Od roku 2003 był członkiem zarządu Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej oraz

członkiem zarządu Polskiego Towarzystwa Pojazdów Ekologicznych, członkiem zwyczajnym Polskiego Towarzystwa Naukowego Silników Spalinowych. Brał czynny udział w pracach Sekcji Wibroakustyki Komitetu Akustyki Polskiej Akademii Nauk.

Prof. Madej był autorem prac o dużym znaczeniu naukowym, teoretycznych i doświadczalnych, których wyniki były i są wdrażane w przemyśle.

Był laureatem licznych nagród naukowych i dydaktycznych rektorów Politechniki Śląskiej i Akademii Górniczo-Hutniczej. Za działalność naukową i organizacyjną otrzymał między innymi odznaczenia Zasłużony dla Politechniki Śląskiej i medal Komisji Edukacji Narodowej.

Prof. Henryk Madej zmarł nagle 8 kwietnia 2011 roku podczas pełnienia obowiązków służbowych. Wiadomość o nadaniu tytułu naukowego profesora nadeszła już po jego śmierci. W naszej pamięci pozostanie człowiek szlachetny i wielkiej kultury.

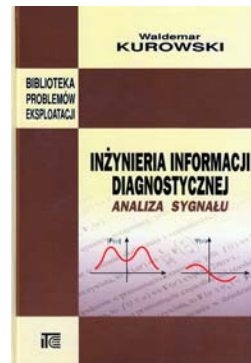
Opracował: prof. Andrzej Wilk



Bogdan Żółtowski
Henryk Tylicki

**Rozpoznawanie stanu
maszyn**

ITE Radom, 2010



Waldemar Kurowski

**Inżynieria informacji
diagnostycznej.
Analiza sygnału**

ITE Radom, 2010

Zagadnienia poprawności działania systemów technicznych stały się w ostatnim czasie ważnymi problemami technicznymi i ekonomicznymi. Szybki rozwój techniki spowodował wzrost niezamierzonych skutków, których masowość i nasilenie zaczyna zagrażać środowisku, człowiekowi i jego wytworom. Wzrost intensywności tych zagrożeń związany jest z podstawowymi tendencjami współczesnej techniki i technologii. Wymienić należy tu stałe zwiększanie efektywności procesów technologicznych poprzez podwyższanie prędkości eksploatacyjnych oraz optymalizacja gabarytowa i wagowa, zwiększająca podatność konstrukcji i w efekcie prowadzące do wzrostu oddziaływań dynamicznych, często zbędnych z punktu widzenia realizowanego procesu użytkowego.

Te tendencje w połączeniu z masowością stosowania środków technicznych stwarzają zagrożenia zdrowia i życia ludzkiego, wydajności pracy, zmniejszenia dokładności, niezawodności i trwałości oraz destrukcję środowiska, a więc obniżenie podstawowych wskaźników nowoczesności. Przeciwdziałanie tym niekorzystnym skutkom jest możliwe jedynie poprzez stosowanie metod i środków diagnostyki technicznej już na etapie konstruowania, podczas wytwarzania i eksploatacji obiektów.

Problematyka rozpoznawania stanu maszyn jest ze wszech miar potrzebna i możliwa, szczególnie w ujęciu oceny stanu aktualnego, genezowania i prognozowania.

Przedstawione opracowanie składa się z wprowadzenia, siedmiu rozdziałów i bibliografii. W poszczególnych rozdziałach omówiono zagadnienia związane z procesem rozpoznawania stanu maszyn, implementacji procedur procesu rozpoznawania stanu oraz badań symulacyjnych opracowanych procedur. Wiele miejsca poświęcono metodyce badań stanowiskowych i eksploatacyjnych wybranych zespołów i układów maszyn, które prowadzono pod kątem jakości proponowanych procedur rozpoznawania stanu maszyn w aspekcie redukcji informacji diagnostycznej, oceny oraz prognozowania i genezowania stanu. W części końcowej przedstawiono wybrane problemy związane z opracowaniem dedykowanych reguł wnioskowania diagnostycznego w zakresie pozyskiwania i przetwarzania danych macierzy obserwacji, wyznaczania testu diagnostycznego, wyznaczania prognozy oraz genezy stanu maszyn poprzez oszacowanie przyczyny stanu niezdatności maszyny.

Treść tej książki stanowi uzupełnienie i poprzednio wydanej przez autora książki pt.: PODSTAWY DIAGNOSTYKI SYSTEMÓW TECHNICZNYCH, METODOLOGIA I METODYKA. Przytoczone w niej rozważania są w szczególności poświęcone wytwarzaniu i prezentacji informacji diagnostycznych, które są zakodowane w sygnałach, generowanych i emitowanych przez każde funkcjonujące urządzenie mechaniczne, postrzegane w postaci uproszczonego modelu.

Dla prawidłowego skonstruowania, wytworzenia i efektywnej eksploatacji urządzenia mechanicznego są potrzebne prawdziwe informacje o jego stanie technicznym, własnościach oraz zachodzących na nim procesach i związkach, bez względu na to czy dane urządzenie już istnieje i funkcjonuje, czy też pozostaje jeszcze w zamyśle konstruktora. Pozyskiwanie tych informacji jest zadaniem diagnostyki technicznej.

Wykonanie tego zadania wymaga efektywnej realizacji procesu badawczego, w którym można wyróżnić następujące etapy: 1) określenie celu badań, 2) określenie przedmiotu poznania, 3) wybór metody badań, 4) sformułowanie zadania diagnostycznego, 5) pobranie i obróbka sygnału oraz 6) postawienie diagnozy, genezy i prognozy. Cały proces jest podporządkowany pozyskaniu, wytworzeniu, prezentacji i interpretacji, czyli inżynierowaniu informacji, niezbędnych dla wykonania czynności zawartych na ostatnim etapie. Działania, które reprezentują praktyczną stronę inżynierowania informacji, są zawarte na piątym etapie badań.

Rozważania przytoczone w poszczególnych rozdziałach dotyczą problemów należących do różnych dziedzin wiedzy, pozornie ze sobą niezwiązanych i mogą się wydawać niespójne. Stanowią one jednak (być może zbyt obszerne i w nie do końca przemyślanej kolejności) przypomnienie i interpretację różnych fragmentów wiedzy, niezbędnej dla objaśnienia matematycznych metod analizy sygnałów, które są podstawowym narzędziem pozyskiwania (inżynierowania) informacji diagnostycznej. Rozważania dotyczą przekazywania, dekodowania i formułowania informacji zawartych w pobranym sygnale diagnostycznym, przy wykorzystaniu matematycznych metod obróbki. Takie informacje uzyskane z różnych sygnałów w różnych chwilach podczas życia urządzenia mogą być przedmiotem dalszego przetwarzania.

Obszar zainteresowania czasopisma to:

- ogólna teoria diagnostyki technicznej
- eksperymentalne badania diagnostyczne procesów i obiektów technicznych;
- modele analityczne, symptomowe, symulacyjne obiektów technicznych;
- algorytmy, metody i urządzenia diagnozowania, prognozowania i genezowania stanów obiektów technicznych;
- metody detekcji, lokalizacji i identyfikacji uszkodzeń obiektów technicznych;
- sztuczna inteligencja w diagnostyce: sieci neuronowe, systemy rozmyte, algorytmy genetyczne, systemy ekspertowe;
- diagnostyka energetyczna systemów technicznych;
- diagnostyka systemów mechatronicznych i antropotechnicznych;
- diagnostyka procesów przemysłowych;
- diagnostyczne systemy utrzymania ruchu maszyn;
- ekonomiczne aspekty zastosowania diagnostyki technicznej;
- analiza i przetwarzanie sygnałów.

Topics discussed in the journal:

- General theory of the technical diagnostics,
- Experimental diagnostic research of processes, objects and systems,
- Analytical, symptom and simulation models of technical objects,
- Algorithms, methods and devices for diagnosing, prognosis and genesis of condition of technical objects,
- Methods for detection, localization and identification of damages of technical objects,
- Artificial intelligence in diagnostics, neural nets, fuzzy systems, genetic algorithms, expert systems,
- Power energy diagnostics of technical systems,
- Diagnostics of mechatronic and antropotechnic systems,
- Diagnostics of industrial processes,
- Diagnostic systems of machine maintenance,
- Economic aspects of technical diagnostics,
- Analysis and signal processing.

Wszystkie opublikowane artykuły uzyskały pozytywne recenzje wykonane przez niezależnych recenzentów.

All the published papers were reviewed positively by the independent reviewers.

Redaktorzy działowi:

dr hab. inż. Tomasz BARSZCZ
prof. dr hab. inż. Wojciech CHOLEWA
prof. dr hab. Wojciech MOCZULSKI
prof. dr hab. inż. Stanisław RADKOWSKI
prof. dr hab. inż. Wiesław TRAMPCZYŃSKI
prof. dr hab. inż. Tadeusz UHL

Recenzenci / Reviewers:

prof. dr hab. inż. Wojciech CHOLEWA
dr hab. inż. Jacek DYBAŁA
prof. dr hab. inż. Jan Maciej KOŚCIELNY
dr inż. Jędrzej MĄCZAK
prof. dr hab. inż. Stanisław RADKOWSKI
prof. dr hab. inż. Tadeusz UHL
prof. dr hab. inż. Andrzej WILK
dr inż. Mirosław WITOŚ
dr hab. inż. Radosław ZIMROZ
prof. dr hab. inż. Bogdan ŻÓLTOWSKI

Kopia wszystkich artykułów opublikowanych w tym numerze dostępna jest na stronie www.diagnostyka.net.pl

Druk:

Centrum Graficzne „GRYF”, ul. Pieniężnego 13/2, 10-003 Olsztyn, tel. / fax: 89-527-24-30

Oprawa:

Zakład Poligraficzny, UWM Olsztyn, ul. Heweliusza 3, 10-724 Olsztyn
tel. 89-523-45-06, fax: 89-523-47-37

Cena 25 zł (w tym 5% VAT)

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.diagnostyka.net.pl>

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.