

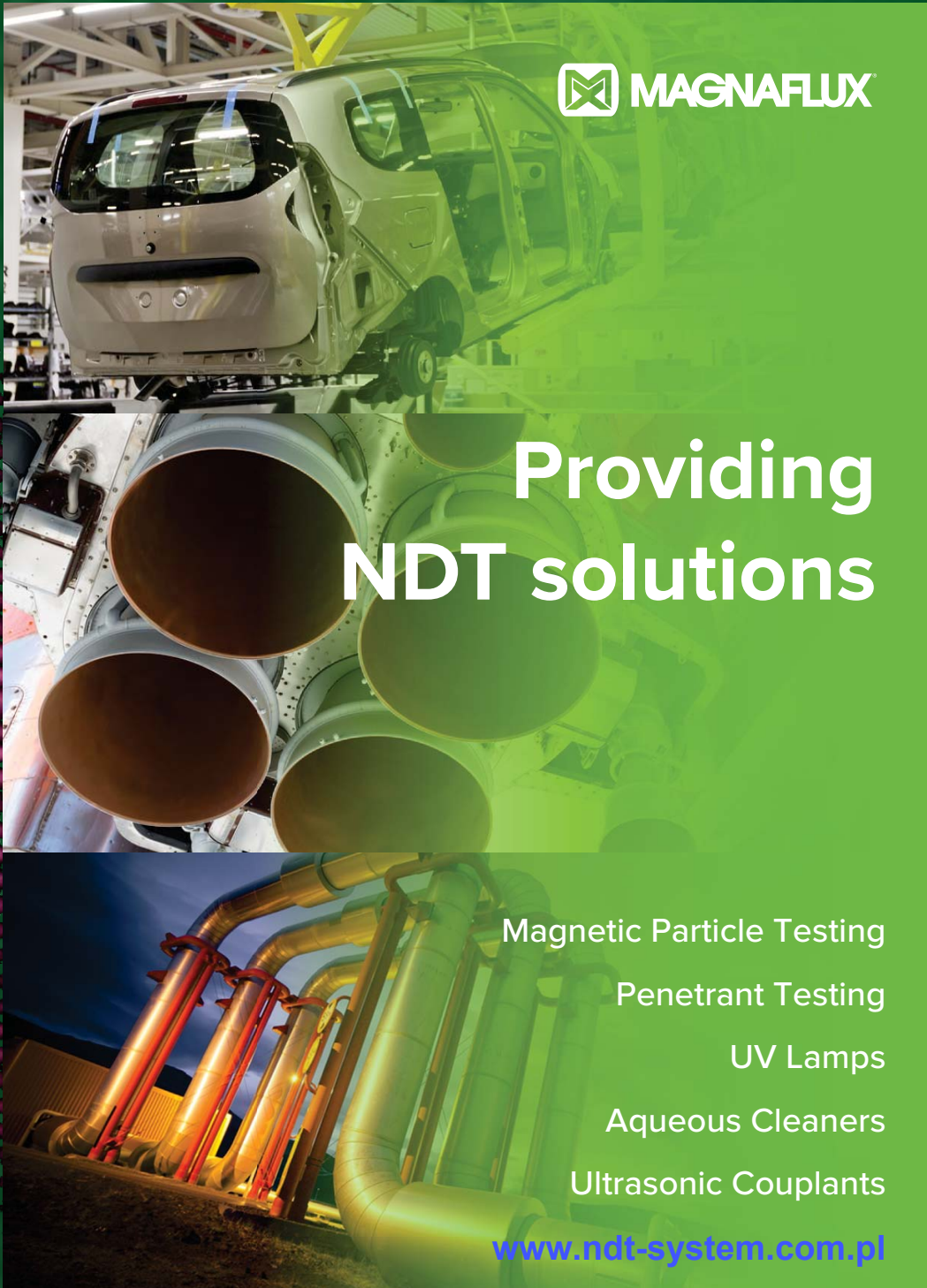
Badania Nieniszczące 1 - 4 / 2023 i Diagnostyka


Kwartalnik Naukowo-Techniczny

Nondestructive Testing and Diagnostics

50. KKBN

www.kkbn.pl



 MAGNAFLUX

Providing NDT solutions

- Magnetic Particle Testing
- Penetrant Testing
- UV Lamps
- Aqueous Cleaners
- Ultrasonic Couplants

www.ndt-system.com.pl

DXR75P-HR

Mały system obrazowania o najwyższej rozdzielczości do krytycznych zastosowań

Detektor DXR75P-HR daje wysoką rozdzielczość pikseli 75 μm , wymaganą do rozróżnienia drobnych szczegółów w krytycznych zastosowaniach. Detektor obejmuje kontrolę spoin klasy B według ISO 17636-2, dając precyzyjne obrazy spełniające najostrejsze wymagania.



Dzięki małej szerokości detektor jest idealny do tworzenia obrazów w sytuacjach o ograniczonej swobodzie ustawienia.

DXR75P-HR jest odpowiedni do zastosowań krytycznych, takich jak (ale bez ograniczenia):

- **kontrola spoin w przemyśle naftowym i gazowym oraz w energetyce i lotnictwie:**
 - rurociągi transportowe
 - złożone konstrukcje (odcinki rurociągu)
 - rury kotłowe
 - przewody paliwowe
 - rury ciśnieniowe
 - zbiorniki ciśnieniowe i magazynowe
- **kontrola spoin w okrętownictwie**

DXR140P-HE

Duży system obrazowania o wysokim kontraście do radiografii o wysokiej energii

DXR140P-HE jest idealnym przenośnym detektorem przeznaczonym do zastosowań o wysokiej energii (izotopowych). Optymalne wewnętrzne ekranowanie zapobiega promieniowaniu rozproszonemu o niskiej energii, ujemnie wpływającemu na jakość obrazu i żywotność elektroniki.



Detektor DXR140P-HE może być stosowany z izotopami i promieniowaniem RTG o wysokiej energii (powyżej 450 kV), jest odpowiedni do ogólnych zastosowań radiograficznych, takich jak (ale bez ograniczenia):

- **kontrola eksploatacyjna w przemyśle naftowym i gazowym oraz w energetyce:**
 - badanie korozji pod izolacją
 - pozycjonowanie zaworów
 - pomiar grubości ścianki
 - badanie podpór rurociągów
 - rury kotłowe
- **kontrola odlewów**
- **konserwacja, naprawa i przeglądy w lotnictwie**
- **przemysł zbrojeniowy i bezpieczeństwo**
- **kontrola konstrukcji:**
 - beton, mosty, podpory, ...
- **nauka, sztuka i archeologia**
- **kontrola linii energetycznych, kontrola GIS**



Badania Nieniszczące i Diagnostyka
Agenda Wydawnicza SIMP
ul. Sabaly 11a, 71-341 Szczecin

e-mail: wydawnictwo@ptbnidt.pl
www.bnid.pl

ZESPÓŁ REDAKCYJNY / EDITORIAL BOARD

REDAKTOR NACZELNY / EDITOR-IN-CHIEF
Tomasz Chady

Z-CY REDAKTORA NACZELNEGO / DEPUTES EDITOR-IN-CHIEF
Adam Sajek
Ryszard Pakos

CZŁONKOWIE REDAKCJI / MEMBERS OF THE BOARD
Jacek Grochowalski
Ryszard Łukaszk

REDAKTORZY DZIAŁOWI / SECTION EDITORS

METODOLOGIA BADAŃ / RESEARCH METHODOLOGY
Sławomir Mackiewicz, Marek Śliwowski

CERTYFIKACJA W BADANIACH / CERTIFICATION IN RESEARCH
Bogdan Piekarczyk

URZĄDZENIA I SYSTEMY BADAŃ
/ EQUIPMENT AND SYSTEMS FOR RESEARCH
Grzegorz Jezierski, Marek Lipnicki

PRAKTYKA PRZEMYSŁOWA BADAŃ
/ PRACTICE OF INDUSTRIAL RESEARCH
Krzysztof Dragan, Darek Wojdała

DIAGNOSTYKA / DIAGNOSTICS
Bogusław Ładecki,

MIĘDZYNARODOWA RADA PROGRAMOWA
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE

Prof. Ryszard Sikora, *Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Przewodniczący/President*

Prof. Krishnan Balasubramaniam, *Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India*
Prof. Alexander Balitskii, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*

Prof. Gilmar F. Batalha, *University of Sao Paulo, Brasil*

Prof. Leonard J. Bond, *Iowa State University, USA*

Dr Pierre Calmon, *CEA, France*

Prof. Ermanno Cardelli, *Università degli Studi di Perugia, Italy*

Prof. Zhenmao Chen, *Xi'an Jiaotong University, China*

Prof. Leszek A. Dobrzański, *World Academy of Materials and Manufacturing Eng., Polska*

Dr Hubert Drzeniek, *AMIL Werkstofftechnologie GmbH, Germany*

Prof. Antonio Faba, *Università degli Studi di Perugia, Italy*

Prof. Nikolaos Gouskos, *University of Athens, Grece*

Mgr Paweł Grześkowiak, *UDT, Polska*

Prof. Jerzy Hoła, *Politechnika Wroclawska, Polska*

Prof. Jolanta Janczak-Rusch, *Empa, Switzerland*

Mgr Ryszard Jawor, *Ryszard Jawor Usługi NDT, Polska*

Dr Grzegorz Jezierski, *Politechnika Opolska, Polska*

Inż. Sławomir Józwiak, *NDT Systems, Polska*

Mgr Pablo Katchadjian, *National Atomic Energy Commission of Argentina, Argentina*

Mgr Jan Kielczyk, *Energomontaż-Północ, Polska*

Mgr Jacek Kozłowski, *TEST PLB, Polska*

Prof. Marc Kreutzbruck, *University of Stuttgart, Germany*

Dr. Jochen Kurz, *DB Systemtechnik GmbH, Germany*

Mgr Marek Lipnicki, *KOLI, Polska*

Prof. Leonid M. Lobanow, *Paton Welding Institute, Ukraine*

Dr Sławomir Mackiewicz, *NDT SOFT, Polska*

Dr Wojciech Manaj, *Instytut Lotnictwa, Polska*

Dr Tadeusz Morawski, *Usługi Techniczne i Ekonomiczne "Level", Polska*

Prof. Zinovy T. Nazarchuk, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*

Dr Ryszard Nowicki, *GE Energy, Polska*

Prof. Mohachiro Oka, *Oita National College of Technology, Japan*

Dr Jolanta Radziszewska-Wolińska, *Instytut Kolejnictwa, Polska*

Prof. Helena Maria Geirinhas Ramos, *Instituto Superior Técnico, Portugal*

Prof. Joao M A Rebello, *Federal University of Rio de Janeiro, Brasil*

Prof. Artur Lopes Ribeiro, *Instituto Superior Técnico, Portugal*

Prof. Maria Helena Robert, *University of Campinas, Brasil*

Dr hab. Maciej Roskosz, *Politechnika Śląska, Polska*

Prof. Krzysztof Schabowicz, *Politechnika Wroclawska, Polska*

Prof. Valentin R. Skalsky, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*

Prof. Jacek Stania, *Łukasiewicz – Górnos Śląski Instytut Technologiczny, Polska*

Prof. Jacek Szelażek, *IPPT PAN, Polska*

Dr Marek Śliwowski, *NDTEST Warszawa, Polska*

Prof. Antonello Tamburrino, *University of Cassino and Southern Lazio, Italia*

Prof. Yuji Tsuchida, *Oita University, Japan*

Prof. Andrzej Tytko, *AGH Kraków, Polska*

Prof. Lalita Udpa, *Michigan State University, USA*

Prof. Gábor Vértesy, *Hungarian Academy of Sciences, Hungary*

Dr Grzegorz Wojas, *UDT, Polska*

Prof. Sławomir Wronka, *Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Polska*

Prof. Chunguang Xu, *Beijing Institute of Technology, China*

Prof. Noritaka Yusa, *Tohoku University, Japan*

Badania Nieniszczące i Diagnostyka

Nondestructive Testing and Diagnostics

NR 1-4/2023

ISSN 2451-4462 (ONLINE: 2543-7755)

VOLUMEN 8

SPIS TREŚCI

Adam Kondej, Dominik Kukla

Nieniszcząca ocena grubości przypowierzchniowej warstwy azotków w technicznych stopach żelaza metodą prądów wirowych* 12

Tomasz Katz

Modelowanie wykrywania wad kontaktowozmęczenia w szynach kolejowych metodą ultradźwiękową* 17

Piotr Bielawski

Diagnozowanie potencjału eksploatacyjnego zespołu maszyn* 25

Tomasz Gorzelańczyk, Krzysztof Schabowicz

Przegląd nowoczesnych metod nieniszczących wykorzystywanych do badania płyt włóknisto-cementowych* 30

Alireza Akhlaghi

Porosity measurement in CFRP* 37

Jerzy Kaszyński

Problematyka badań nieniszczących w budownictwie na krajowych konferencjach KKBN - przeżyjmy to jeszcze raz 40

Maciej Martyna, Roman Martyna

Możliwości i ograniczenia magnetycznej metody MRT badania stanu technicznego lin stalowych w czasie ich eksploatacji na urządzeniach dźwignicowych* 48

Mateusz Cybulski, Marek Lipnicki, Krzysztof Mroczek, Rafał Obląkowski

Badania ultradźwiękowe Phased Array złączów choinkowych stopki łopaty stopni L-0 po stronie turbiny i generatora w elektrowni jądrowej w Szwecji* 56

Bartosz Hyla, Michał Sobczak, Jakub Roemer

Badania nieniszczące materiałów kompozytowych metodą termografii laserowej* 62

Mateusz Napiórkowski, Mariusz Szóstak, Krzysztof Schabowicz

Nieniszczące, wizualne metody badań wykorzystujące wirtualną rzeczywistość w budownictwie – stan wiedzy* 67

Mateusz Wróbel, Maciej Szwed

Fitness for service dla urządzeń ciśnieniowych – doświadczenia UDT* 72

Maciej Szwed, Tomasz Jakubowski, Michał Targoński

Detekcja pęcherzy wodorowych metodami ultradźwiękowymi TOFD, TULA i Phased Array* 80

Karol Kaczmarek

Wymagania normy PN-EN ISO 9712 dla egzaminu praktycznego w sektorach przemysłowych* 88

Marcin Lewandowski, Jakub Rozbicki, Hanna Smach, Piotr Karwat,

Arkadiusz Szczurek, Jolanta Sala, Alicja Bera
Modelowe rozwiązania skanerów UTPA do badań spawów dla wież wiatrowych, sekcji płaskich oraz konstrukcji wielkogabarytowych on-shore/off-shore* 97

Jakub Spytek, Kajetan Dziedzic, Łukasz Ambroziński, Łukasz Pieczonka

Obrazowanie wad w strukturach cienkościennych z wykorzystaniem ultradźwiękowych fal przewodzonych* 101

Streszczenia artykułów zgłoszonych na 50. KKBN

..... 105

Bogusław Ładecki, Joanna Augustyn-Nadzieja

Problemy pęknięcia zmęczeniowego wału wirnika wentylatora ze stali C45* 120

Informacje BNID - Wspomnienie o plk. dr. inż. Romanie OSTROWSKIM

..... 124

Informacje dla Autorów i Czytelników 125

* Artykuł recenzowany

PATRONAT I STAŁA WSPÓŁPRACA
PATRONAGE AND PERMANENT COOPERATION



PTBNiDT

Piotr Bielawski*

Polskie Towarzystwo Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej SIMP Oddział w Szczecinie

Diagnozowanie potencjału eksploatacyjnego zespołu maszyn

Diagnosing the wear margin of the machine sets

STRESZCZENIE

Zespoły maszyn są częścią technicznych systemów produkcyjnych, ulegają zużyciu podczas użytkowania a ich potencjał eksploatacyjny może zostać przywrócony podczas obsługi. Efektywność i skuteczność obsługi uzależniona jest w dużym stopniu od informacji o potencjale eksploatacyjnym zespołu maszyn. Aktualną, rzeczywistą wartość potencjału eksploatacyjnego można uzyskać poprzez diagnozowanie zespołu maszyn. W artykule wykazano, że jakość informacji o potencjale eksploatacyjnym można podwyższyć dzieląc zespół maszyn na zespoły funkcjonalne, które mogą być obsługiwane oddzielnie. Wskazano na konieczność budowania modeli zespołów funkcjonalnych, z których może zbudować model dowolnego zespołu maszyn. Zaproponowano budowę następujących zespołów funkcjonalnych: rurociąg – maszyna, wirnik zespołu maszyn podparty w łożyskach tocznych, wirnik zespołu maszyn podparty w łożyskach ślizgowych, oscylator bez wymuszenia zewnętrznego, oscylator z wymuszeniem zewnętrznym, przekładnie z poślizgiem, przekładnie bez poślizgu, łożyska toczne. Dla każdego z wymienionych zespołów funkcjonalnych wskazano miary sygnałów diagnostycznych.

Słowa kluczowe: wirnik zespołu maszyn; zespół funkcjonalny; potencjał eksploatacyjny; diagnozowanie

ABSTRACT

Machine sets are part of technical production systems, they wear out during use and their wear margin can be restored during maintenance. The efficiency and effectiveness of maintenance depends to a large extent on information about the wear margin of the machine sets. The current actual value of the wear margin can be obtained by diagnosing the machine set. The article shows that the quality of information about wear margin can be increased by dividing the machine set into functional units that can be maintained separately. It was pointed out that it is necessary to build models of functional units, from which it can build a model of any machine set. The construction of the following functional units was proposed: pipeline-machine, rotor of the machine set supported in rolling bearings, rotor of the machine set supported in slide bearings, oscillator without external forcing, oscillator with external forcing, gearboxes with slip, gearboxes without slip, rolling bearings. Measures of diagnostic signals are indicated for each of the listed functional units.

Keywords: machine set, functional unit, wear margin; diagnosing

1. Wstęp

Przedsiębiorstwo produkcyjne osiąga korzyści (w tym zyski) wytwarzając wyroby. Osiągane korzyści zależą od jakości wyrobu, jakości systemu produkcyjnego przedsiębiorstwa i jakości zarządzania przedsiębiorstwem. Podstawą podejmowania decyzji w zarządzaniu są informacje o rzeczywistych wartościach miar cech opisujących jakość przedsiębiorstwa, jakości wyrobu i jakości systemu produkcyjnego. Przedsiębiorstwo, chcąc zmienić wartość miary cechy/cech opisującej jakość przedsiębiorstwa musi spowodować zmianę wartości miar określonych cech systemu produkcyjnego. Warunkiem powodzenia takich działań jest istnienie w przedsiębiorstwie systemu informatycznego pozwalającego na pomiar rzeczywistych wartości miar cech i porównanie wartości rzeczywistych z wartościami pożądanymi. Zbiór cech za pomocą, których można opisać jakość systemu produkcyjnego przedsiębiorstwa jest zbiorem usystematyzowanym i opisanym w literaturze. Zbiór cech podzielony jest na podzbiory, w podzbiore efektywność mieszczą się takie cechy jak sprawność energetyczna (efficiency) i wydajność (capability).

Rzeczywiste wartości miar cech technicznego systemu produkcyjnego zależą głównie od tego, jakie wartości zostały im nadane na etapie projektowania i wytwarzania i w jakim stopniu uległy one degradacji podczas użytkowania. Zespół wartości miar cech, których wartości miar nadawane są podczas wytwarzania, ulegają degradacji podczas użytkowania i których wartości mogą być przywrócone podczas obsługi nazywany jest potencjałem eksploatacyjnym lub „wear margin”.

Częścią składową wielu technicznych systemów produkcyjnych są podsystemy stanowiące układ typu maszyna napędzana – maszyna napędzająca zwana dalej zespołem maszyn. Obsługiwanie takich układów nie jest dostatecznie efektywne i skuteczne ponieważ:

- liczba cech opisujących potencjał eksploatacyjny zespołu maszyn jest duża;
- degradacja poszczególnych elementów układu nie jest jednakowa;
- brakuje dostatecznie skutecznych metod identyfikacji potencjału eksploatacyjnego zespołu maszyn.

Rozwiązania powyższych problemów obsługiwanie upatruje się w [1]:

*Autor korespondencyjny.

E-mail: bielawskipiotr80@gmail.com

- dekompozycji zespołu maszyn na zespoły funkcjonalne;
- znalezieniu zastępczych miar potencjału eksploatacyjnego zespołu funkcjonalnego i dokonanie opisu zależności miara zastępcza potencjału eksploatacyjnego – miara cechy pożądanej zespołu funkcjonalnego;
- ponieważ zastępcze miary potencjału są z reguły niemierzalne podczas użytkowania systemu produkcyjnego to konieczne jest znalezienie mierzalnych symptomów potencjału eksploatacyjnego i określenie relacji miara potencjału eksploatacyjnego – miara symptomu.

W artykule podjęto próbę zdefiniowania zespołów funkcjonalnych układu maszyn w systemie produkcyjnym przedsiębiorstwa.

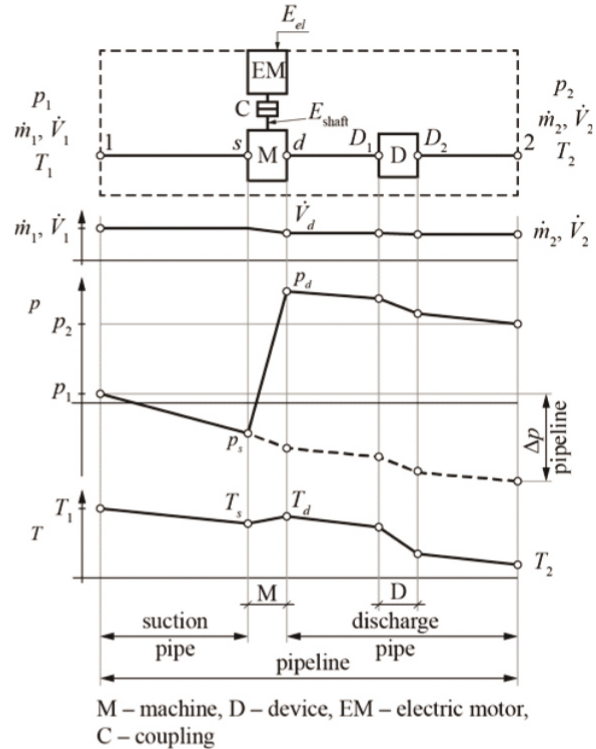
2. Zespoły funkcjonalne zespołu maszyn

Podsystemy technicznych systemów produkcyjnych realizują określone cele cząstkowe, mają określone granice i określone wartości miar pożądanych cech. Potencjał eksploatacyjny takich podsystemów powstaje podczas wytwarzania urządzeń składowych oraz podczas montażu podsystemu. Potencjał eksploatacyjny wyczerpuje się podczas użytkowania podsystemu na skutek nie dającego się wyeliminować zużycia. Intensywność zużycia nie jest jednakowa dla wszystkich zespołów funkcjonalnych podsystemu. Skutkuje to nierównomiernym w czasie wyczerpywaniem potencjału eksploatacyjnego poszczególnych zespołów funkcjonalnych. Zespół funkcjonalny o wyczerpanym potencjale eksploatacyjnym nie może wykonywać swoich funkcji z wymaganą jakością lub może nagle przestać działać co w wielu przypadkach oznacza brak możliwości działania całego podsystemu. W niniejszym artykule przyjęto założenie, że:

- w aspekcie ekonomicznym ma sens przywracanie potencjału tylko tych zespołów funkcjonalnych, których potencjał został wyczerpany i których sanacji będzie można dokonywać w dużym stopniu oddzielnie;
- uruchomienie procedury przywracania potencjału może nastąpić po stwierdzeniu, że potencjał został wyczerpany. Informacje o potencjale są wynikiem procesu diagnostowania danego zespołu funkcjonalnego;
- podstawą diagnostowania zespołów funkcjonalnych są modele diagnostyczne opisujące związki między miarami potencjału eksploatacyjnego i miarami symptomu diagnostycznego;
- ze względu na różnorodność podsystemów wskazane jest tworzenie modeli zespołów funkcjonalnych i modeli identyfikacji zespołów funkcjonalnych, z których może zbudować model dowolnego podsystemu: dla takich samych zespołów funkcjonalnych można stosować takie same techniki diagnostowania niezależnie od przeznaczenia i szczegółów konstrukcyjnych podsystemu.

W technicznych systemach produkcyjnych występują podsystemy składające się z maszyn współpracujących z urządzeniami, które są połączone z maszynami za pomocą

rurociągów. Często występującym podsystemem jest podsystem transportu płynów z obszaru o energii niższej do wyższej, rys.1. Może to być główny podsystem lub występować w systemie produkcyjnym wielokrotnie w różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych realizujących odmienne zadania cząstkowe.



Rys 1. Zespół maszyn z rurociągiem i jakościowy przebieg p , \dot{m} , T wzdłuż rurociągu [2]

Fig. 1. Machine set with pipeline and qualitative changes of p , \dot{m} , T along the pipeline [2].

W warunkach ustalonych sprawność energetyczną podsystemu z rys. 1 można wyznaczyć z zależności:

$$\eta_e = \frac{m \cdot (p_2 - p_1)}{E_{el}} = \frac{\dot{V} \cdot (p_2 - p_1)}{P_{el}} \quad (1)$$

gdzie:

- p_1 ciśnienie płynu w punkcie początkowym podsystemu,
- p_2 ciśnienie płynu w punkcie końcowym podsystemu,
- P_{el} moc elektryczna doprowadzona do podsystemu,
- \dot{V} strumień objętości płynu w podsystemie.

Rurociąg i część współpracującej z nim maszyny tworzą zespół funkcjonalny zespołu maszyn zwany zespołem funkcjonalnym „ rurociąg – maszyna”, podobnie część silnika elektrycznego i współpracujące z nim urządzenia zasilające stanowią zespół funkcjonalny o sprawności .

W układzie maszyn maszyna napędzająca i maszyna napędzana może, rys 2:

- mieć jeden wspólny wał;
- dwa wały połączone sprzęgłem;
- dwa wały połączone przekładnią.

Jeżeli maszyny mają wspólny wał lub wały dwóch maszyn połączone są sprzęgłem sztywnym bez poślizgu to taki zespół można uznać za zespół funkcjonalny i określić jako „wirnik

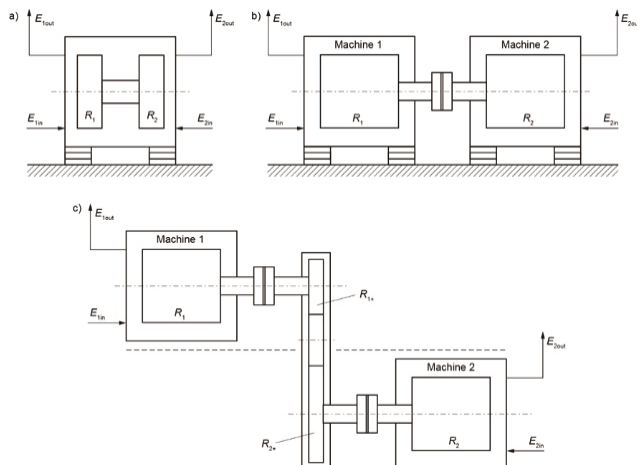
zespołu maszyn”. Ze względu na rodzaj zastosowanych w maszynach łożysk wyróżnia się:

- wirnik zespołu podparty w łożyskach tocznych;
- wirnik zespołu podparty w łożyskach ślizgowych.

Dwa współpracujące wirniki dwóch różnych wirników zespołów maszyn mogą wchodzić w skład przekładni. Przekładnię należy traktować jako zespół funkcjonalny. W identyfikacji przekładni należy wyróżnić:

- przekładnie bez poślizgu
- przekładnie z poślizgiem.

W skład zespołów maszyn mogą wchodzić zespoły



Rys.2. Wirniki zespołu maszyna napędzająca – maszyna napędzana: a) jeden wirnik z jednym wałem, b) jeden wirnik z wałami połączonymi sprzęgłem, c) dwa wirniki zespołu maszyn z przekładnią, E_{1in} – energia zasilająca maszynę napędzającą, E_{1out} – energia odprowadzona od maszyny napędzającej, E_{2in} – energia doprowadzona do maszyny napędzanej, E_{2out} – energia na wyjściu z maszyny napędzanej, R1 – wirnik (tarcza wirnika) maszyny napędzającej (rotor), R2 – wirnik (tarcza wirnika) maszyny napędzanej.

Fig. 2. Rotors of the driving machine – driven machine set: a) one rotor with one shaft, b) one rotor with shafts connected by a coupling, c) two rotors of a machine set with a transmission, E_{1in} – energy powering the driving machine, E_{1out} – energy carried away from the driving machine, E_{2in} – energy delivered to the driven machine, E_{2out} – energy at driven machine output, R1 – rotor disc of the driving machine, R2 – rotor disc of the driven machine

funkcjonalne zwane tutaj „oscylatorami” Istnieją:

- oscylatory bez wymuszenia zewnętrznego (np. zawory samoczynne)
- oraz oscylatory z wymuszeniem zewnętrznym (między innymi oscylatory współpracujące z wirnikiem danej maszyny).

Częstym elementem maszyn są łożyska toczne. Z reguły podpierają wirniki maszyn, przenoszą obciążenia z wirnika na korpus maszyny. Zużyte są z reguły wymieniane na nowe, w niektórych przypadkach są naprawiane. Ze względu na uszkodzenia wtórne łożyska powinny być diagnozowane. Ze względu na specyficzną budowę łożysko toczne powinno

być traktowane jako zespół funkcjonalny.

Sprawność energetyczna zespołu maszyn jest iloczynem sprawności jego zespołów funkcjonalnych.

3. Diagnozowanie zespołów funkcjonalnych

3.1. Zespół funkcjonalny „maszyna – rurociąg”

Dla układu maszyn z rys.1. ta część maszyny napędzanej układu maszyn, w której realizowany jest obieg termodynamiczny jest częścią zespołu funkcjonalnego „maszyna - rurociąg”. Obieg termodynamiczny realizowany jest z zależną od potencjału eksploatacyjnego sprawnością, w przypadku pomp zwaną sprawnością hydrauliczną. Na rys.1. dla ustalonych warunków pracy dla przepływu otwartego w rurociągu przedstawiono przebiegi ciśnienia, temperatury i strumienia masy wzdłuż rurociągu [2].

Na sprawność hydrauliczną zespołu funkcjonalnego rurociąg – maszyna składa się, oprócz sprawności hydraulicznej maszyny η_{Hm} , sprawność hydrauliczna układu ssania η_{Hsp} i sprawność hydrauliczna układu tłoczenia η_{Hdp} , gdzie

$$\eta_{Hsp} = \frac{p_s}{p_1} = \frac{p_s}{p_s + \Delta p_{sp}} \quad (2)$$

$$\eta_{Hdp} = \frac{p_2}{p_d} = \frac{p_d - \Delta p_{dp}}{p_d} = 1 - \frac{\Delta p_{dp}}{p_d} \quad (3)$$

- Δp_{dp} straty ciśnienia w rurociągu tłocznym,
- Δp_{sp} straty ciśnienia w rurociągu ssącym.

Sprawność hydrauliczna rurociągu powiązana jest z miarą zastępczą potencjału eksploatacyjnego – współczynnikiem oporów liniowych (współczynnikiem tarcia), λ . Symptomem diagnostycznym jest spadek ciśnienia. Spadki (straty) ciśnienia Δp wzdłuż prostego odcinka rurociągu opisuje wzór Darcy’ego–Weisbacha:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \rho \frac{w_m^2}{2} \quad (4)$$

gdzie Δp - straty ciśnienia płynu w rurociągu, λ - współczynnika oporów liniowych (współczynnika tarcia) płynu w rurociągu, d - średnica wewnętrzna rurociągu, l - długość rurociągu, ρ - gęstość płynu, w_m - średnia prędkość przepływu płynu w rurociągu.

Współczynnik oporów liniowych λ zależy od wartości liczby Reynoldsa Re ($Re = wl/v$) i chropowatości względnej k/d . Spadki ciśnienia wzdłuż przeszkody uwzględnia się za pomocą współczynnika ζ . We współczynniku ζ zawarte są dodatkowe straty w porównaniu ze stratami prostego odcinka rurociągu

$$\Delta p_p = \zeta \rho \frac{w_m^2}{2} \quad (5)$$

Straty energii w maszynie skutkują wzrostem różnicy temperatur ssania i tłoczenia. Jeżeli jedynymi źródłami ciepła są straty hydrauliczne zależne od sprawności maszyny i nie zachodzi wymiana ciepła z otoczeniem to sprawność hydrauliczną pompy określa wzór

$$\eta_{Hm} = \frac{1}{1 + \frac{c_p \cdot (T_d - T_s)}{p_d - p_s}} \quad (6)$$

gdzie

c_p – ciepło właściwe płynu przy stałym ciśnieniu,

T_s, p_s – temperatura i ciśnienie na króćcu ssącym pompy,

T_d, p_d – temperatura i ciśnienie na króćcu tłoczącym pompy.

Sprawność zespołu funkcjonalnego jest iloczynem sprawności hydraulicznej układu ssania (suction pipe) , sprawności hydraulicznej układu tłoczenia (discharge pipeline) i sprawności hydraulicznej maszyny .

3.2. Zespół funkcjonalny „wirnik zespołu maszyn”

Jeżeli potencjał eksploatacyjny wirnika zespołu maszyn ma wartość nominalną to na wirnik zespołu maszyn działają, określone specyfikacją maszyn składowych, siły promieniowe, poosiowe i styczne zależne od aktualnej wydajności maszyny napędzanej (lub aktualnego obciążenia maszyny napędzającej). Potencjał eksploatacyjny wirnika zespołu maszyn może osiągnąć wartość nominalną jeżeli [3]:

- oś wałów wirnika zespołu maszyn będzie linią prostą;
- środki mas wirnika zespołu maszyn będą się pokrywać się z osią obrotu wirnika zespołu maszyn;
- tarcze wirnika będą trwale połączone z wałem a masy i momenty bezwładności tarcz wirnika oraz sztywności wałów wirnika będą zgodne ze specyfikacją.

Dopuszcza się, w szczególności przy długich wirnikach, określone wartości odchyłki prostoliniowości i używa się pojęcia „ułożenie linii wału” (shaft line alignment). Niepokrywanie się środka masy z osią obrotu w jednej z płaszczyzn prostopadłych do osi wirnika jest przyczyną „niewyważeniem wirnika”. Jakość połączenia tarcz z wałem wirnika zespołu, rozmieszczenie tarcz, ich masa i sztywność wału decydują o dynamicznych właściwościach wirnika opisywanych za pomocą „funkcji przejścia”.

Ułożenie wirnika zespołu maszyn, niewyważenie i funkcję przejścia wirnika zespołu maszyn należy uznać za miary potencjału eksploatacyjnego wirnika zespołu maszyn. Następstwem niewłaściwego ułożenia i niewyważenia wirnika zespołu maszyn są dodatkowe zmienne i stałe siły działające na wirnik zespołu maszyn. Zmiana układu sił działających na wirnik skutkuje zmianą obrazu drgań względnych wirnika i drgań bezwzględnych podpór łożyskowych.

W wielu przypadkach sygnały drganiowe maszyn są sygnałami prawie stacjonarnymi. Podstawą wnioskowania diagnostycznego w takich przypadkach jest analiza widmowa drgań. Celem przeprowadzenia analizy widmowej, oprócz pomiaru drgań, dokonuje się pomiaru wybranego kąta obrotu wału za pomocą sensora zwanego Keyphasor. Keyphasor inaczej znacznik kąta jest sensorem najczęściej wiroprowadowym wytwarzającym nad rowkiem w wale impuls napięciowy raz na obrót wału.

Drgania podpór wykorzystuje się w diagnozowaniu wirnika z łożyskami tocznymi. Drgania podpór wirnika powinny być mierzone na każdej podporze, są łatwe w pomiarze, technika pomiarów i narzędzia są znane i dostępne na rynku.

W przypadku wirników z łożyskami ślizgowymi wykorzystuje się drgania względne głównie drgania promieniowe,

wyjątkowo drgania skrętne i w ograniczonym zakresie drgania poosiowe wirującego wału. Względne drgania poosiowe wykorzystuje się głównie do dozoru osiowej pozycji wału to jest do dozoru położenia wirnika względem wybranego punktu stałego np. obudowy łożyska oporowego. Względne drgania skrętne w praktyce mierzy się na wolnym końcu wału celem dozoru wartości drgań skrętnych.

Względne drgania promieniowe wirujących wałów mierzy się w każdej płaszczyźnie łożyska za pomocą dwóch sensorów wiroprowadowych (można zastosować również sensory indukcyjne lub pojemnościowe) ustawionych względem siebie pod kątem prostym i przedstawia je w formie trajektorii środka czopa (diagram X-Y / Orbit).

W publikacji [3] wykazano konieczność i możliwość modelowania wirnika łącznie z łożyskami ślizgowymi. Zaproponowano do pomiaru mimośrodowości czopa w panwi łożyska ślizgowego [4] i odległości między panwią i kołmierzem ślizgowego łożyska poosiowego [3]. Wykazano, że mimośrodowość zależy od obciążenia i potencjału eksploatacyjnego łożyska ślizgowego.

W przypadku gdy wirnik zespołu maszyn ma wał wykorbiony to miarą ułożenia wału jest sprężynowanie wykorbień wału. Sprężynowanie wykorbień powoduje osiowe przemieszczanie się czola końca wału podczas obrotu wału a miarami symptomów są wartość podczas obrotu wału a miarami symptomów są wartość stała, amplituda i przesunięcie fazowe przebiegu kąтового przemieszczenia. Możliwy jest pomiar przemieszczeń czola wolnego końca wału wykorbień za pomocą specjalnej głowicy wyposażonej w parę bezstykowych sensorów drogi. Ponieważ na wartość stałą przemieszczenia wolnego końca ma wpływ przemieszczenie całego wirnika w ramach luzu w łożysku poosiowym to konieczny jest równoczesny pomiar wartości stałej przemieszczeń poosiowych w łożysku poosiowym [3].

3.3. Zespół funkcjonalny „przekładnia”

Rys. 2c. przedstawia zespół maszyn składający się z trzech zespołów funkcjonalnych: dwóch wirników i przekładni. Diagnozowanie wirników wymaga zainstalowania na każdym wale znacznika kąta i synchronicznego uśredniania sygnałów oddzielnie z częstotliwością jednego i drugiego wału.

W przypadku przekładni bez poślizgu jaką jest przekładnia zębata diagnozowanie przekładni jako zespołu funkcjonalnego dotyczy potencjału eksploatacyjnego współpracujących kół zębatach. Wydaje się, że skuteczne i efektywne diagnozowanie wymaga uśredniania synchronicznego z częstotliwością z jaką ten sam ząb jednego koła zazębia się z tym samym zębem drugiego koła. Wymaga to jednoczesnego pomiaru kąta jednego i drugiego wału lub zainstalowania specjalnego znacznika kąta.

W przypadku przekładni z poślizgiem jakim jest przekładnia pasowa symptomami mogą być częstotliwości obydwu wałów i częstotliwość obrotowa paska oraz częstotliwość drgań własnych paska. Obie częstotliwości są mierzalne za pomocą sensorów optycznych.

3.4. Zespół funkcjonalny „przekładnia”

Łożyska toczne posiadają dwa pierścienie i koszyczek z elementami tocznymi. Przy stałym obciążeniu i stałej

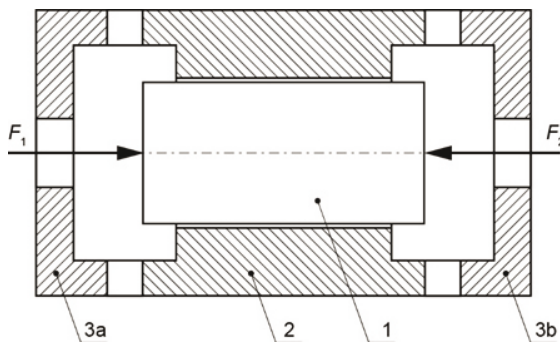
prędkości obrotowej moment tarcia w łożysku jest miarą potencjału eksploatacyjnego łożyska.

W praktyce eksploatacyjnej w diagnozowaniu łożysk tocznych wykorzystuje się symptomy drganiowe obudowy łożyska. Przyjmuje się, że zużycie łożyska skutkuje uszkodzeniami generującymi drgania o charakterystycznych częstotliwościach. Taka metodyka nie zawsze przynosi oczekiwane rezultaty.

W przypadku dużych i ważnych promieniowych łożysk tocznych z nieruchomym pierścieniem zewnętrznym istnieją przesłanki uzasadniające wybór „ilorazu prędkości kątowej koszyzka i prędkości kątowej wału” jako miary symptomu diagnostycznego.

3.5. Zespół funkcjonalny „oscylator”

Oscylator jest zespołem funkcjonalnym, który wykonuje ruch posuwisto-zwrotny i oddziela dwie przestrzenie o różnym ciśnieniu. Element ruchomy oscylatora może mieć kształt pierścienia z prowadzeniem wewnętrznym lub kształt tłoka z prowadzeniem zewnętrznym. Hipotetyczny oscylator przedstawiono na rys.3.



Rys. 3. Model oscylatora z prowadzeniem zewnętrznym: 1 – tłok, 2 – prowadnica, 3- ograniczniki ruchu, F1, F2– składowa poosiowa wszystkich sił działających na daną stronę tłoka

Fig. 3. Model of the oscillator with external guidance: 1 - piston, 2 - guide, 3 - motion stops, F1, F2 - axial component of all forces acting on a given side of the piston

Warunkiem działania oscylatora jest ażeby, pomijając tarcie, różnica sił ($F_1 - F_2$) zmieniała się z na i na odwrót tzn. ażeby dochodziło do zmiany znaku różnicy sił działających wzdłuż osi tłoka. Zmiana znaku różnicy sił działających na tłok powoduje, że tłok porusza się ruchem przyspieszonym w kierunku drugiego ogranicznika i uderza w niego. Siła uderzenia jest zależna od różnicy sił i od potencjału eksploatacyjnego oscylatora. Siła uderzenia generuje drgania impulsowe, które mogą być wykorzystane jako symptom diagnostyczny [5, 6].

4. Podsumowanie

W technicznych systemach produkcyjnych wszechobecne są podsystemy składające się z układu maszyn i urządzeń przekształcających i przenoszących energię. Sprawność przekształcania i przenoszenia energii jest zależna od potencjału eksploatacyjnego maszyn i urządzeń podsystemu. Natomiast jakość systemu produkcyjnego np. efektywność, zależy nie tylko od aktualnej sprawności energetycznych poszczególnych podsystemów ale również od efektywności i skuteczności systemu obsługiwanego (systemu, który służy do przywracania potencjału eksploatacyjnego) działającego w ramach przedsiębiorstwa produkcyjnego. Ze względu na charakter pracy i złożoność podsystemów uzasadnione jest obsługiwane zespołów funkcjonalnych podsystemu. Skuteczne i efektywne diagnozowanie potencjału eksploatacyjnego (diagnozowanie jako składnik obsługiwanego) może być realizowane tylko wtedy, kiedy będą znane odpowiednie modele diagnostyczne poszczególnych zespołów funkcjonalnych. Tworzenie modeli diagnostycznych zespołów funkcjonalnych polega na odpowiednim określeniu granic poszczególnych zespołów i opisie relacji między potencjałem eksploatacyjnym i sygnałem diagnostycznym danego zespołu funkcjonalnego. W artykule przedmiotowy podsystem podzielono na następujące zespoły funkcjonalne: maszyna – rurociąg, wirnik zespołu maszyn, przekładnia, łożyska toczne, oscylator. Uzasadniono podział, dla wymienionych zespołów funkcjonalnych wskazano na zbudowane modele diagnostyczne bądź określono koncepcje ich tworzenia.

5. Literatura

- [1] P. Bielawski, „Miary i wartości graniczne potencjału eksploatacyjnego maszyn systemów produkcyjnych / Measures and limits of machine wear margin of production systems” Problemy eksploatacji / Maintenance problem no. 1, pp. 129-159, 2016
- [2] P. Bielawski, “Identification of the Wear Margin of a Pipeline–Machine Subsystem” Appl. Sci.2020, 10, 3977, pp. 1-22
- [3] Bielawski P.: Diagnosing the Machine Set Rotor Using Its Relative Vibrations. Appl. Sci. 2022, 12, 5660, pp.1-27
- [4] Patent PL233403: Sposób wzorcowania układu sensorów do pomiaru mimośrodowości wirującego wału zwłaszcza wału łożyska ślizgowego z uszczelnieniem promieniowym. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej Warszawa 2017
- [5] Bielawski P.: Measurement and evaluation of mechanical vibration of reciprocating machines. Diagnostics and Structural Health Monitoring 1(61)/2012, pp.25-30
- [6] Białek P., Bielawski P.: Vibration signals of reciprocating compressor valves. Journal of POLISH CIMAC 2013 Vol. 8 No 1 pp. 15-21