

Polskie
Towarzystwo
Diagnostyki
Technicznej

afiliowane przy

Wydziale Nauk
Technicznych
Polskiej Akademii Nauk

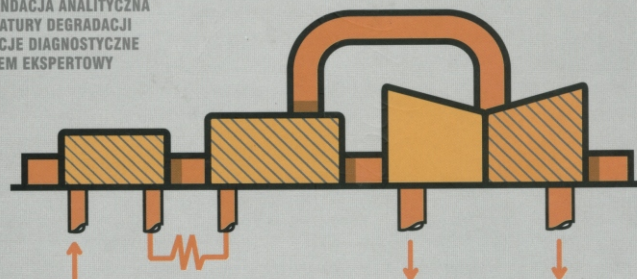
Diagnostyka

ISSN 641-6414

Jerzy A. Krzyżanowski
Jerzy Głuch

DIAGNOSTYKA CIEPLNO-PRZEPŁYWOWA OBIEKTÓW ENERGETYCZNYCH

MONITORING OBIEKTU
REDUNDANCJA ANALITYCZNA
SYGNATURY DEGRADACJI
RELACJE DIAGNOSTYCZNE
SYSTEM EKSPERTOWY



Gdańsk 2004

VOL. 31
2004 r.

Rada programowa

Przewodniczący:

prof. dr hab. **Czesław CEMPEL** *Politechnika Poznańska*

Redaktor Naczelny:

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

Członkowie:

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

dr inż. **Roman BARCZEWSKI**
Politechnika Poznańska

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

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

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

prof. dr hab. inż. **Adam CHARCHALIS**
AMW w Gdyni

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Obszar zainteresowania czasopisma to problemy diagnostyki, identyfikacji stanu technicznego i bezpieczeństwa maszyn, urządzeń, systemów i procesów w nich zachodzących.

Drukujemy oryginalne prace teoretyczne, aplikacyjne, przeglądowe i krótkie doniesienia z badań, innowacji i kształcenia w tych zagadnieniach.

Recenzenci nadesłanych prac:

prof. dr hab. inż. **Józef SZALA**

prof. dr hab. inż. **Witold ENGEL**

dr hab. inż. **Tadeusz M. DĄBROWSKI** prof. WAT

prof. dr hab. inż. **Andrzej WILK**

prof. dr hab. inż. **Adam CHARCHALIS**

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

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

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

prof. dr hab. inż. **Stanisław NIZIŃSKI**

prof. dr hab. inż. **Bogdan ŻÓŁTOWSKI**

WYDAWCA:

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

REDAKTOR NACZELNY:

prof. dr hab. inż. Ryszard MICHALSKI

CZŁONKOWIE KOMITETU REDAKCYJNEGO:

dr inż. Paweł MIKOŁAJCZAK

mgr inż. Krzysztof LIGIER

SEKRETARZ REDAKCJI:

dr inż. Sławomir WIERZBICKI

tel.: (0-89) 523-37-51

REDAKCJA CZASOPISMA:

Uniwersytet Warmiński – Mazurski w Olsztynie,
Katedra Eksploatacji Pojazdów i Maszyn
10-736 Olsztyn, ul. Oczapowskiego 11,
tel./fax: (0-89) 523-34-63
e-mail: diagnostyka@uwm.edu.pl

KONTO PTD:

Bank Przemysłowo Handlowy S.A.

II O/ Warszawa

nr konta: 40 1060 0076 0000 3200 0046 1123

Spis treści

Słowo Redaktora Naczelnego.....	5
---------------------------------	---

Komunikaty PTDT.....	6
----------------------	---

ARTYKUŁY GŁÓWNE

Czesław JERMAK – Politechnika Poznańska, Jan MONIETA - WSM Szczecin.....	7
--	---

Pomiary cech stanu technicznego rozpylaczy silników okrętowych spalających olej napędowy

Measurements of Technical State Features of the Marine Diesel Engines Injector Nozzles Combustion Diesel Oil

Piotr KRZYWORZEKA – AGH Kraków.....	13
--	----

Wektor innowacji w diagnozowaniu

Innovation Vector in Diagnostics

Piotr KRZYWORZEKA – AGH Kraków.....	21
--	----

Demodulacja drgań maszyn przy zmianach prędkości obrotowej

Machine Vibrations Demodulation – Case of Variable Rotation Speed

Wiesław PIEKARSKI, Sławomir JUŚCIŃSKI, Mirosława WESOŁOWSKA – JANCZAREK - AR Lublin.....	29
---	----

Próba wyznaczenia zależności statystycznej pomiędzy parametrami diagnostycznymi silnika pojazdu polonez, a emisją spalin

An Attempt at the Determination of the Statistical Interdependency Between the Diagnostic Parameters of the Polonez Vehicle Engine and Fumes Emissions

Paweł RZUCIDŁO - Politechnika Rzeszowska.....	37
--	----

Monitor magistrali CAN systemu pośredniego sterowania samolotem PZL-110

CAN Bus Monitor of the Fly-By-Wire Control System Used on PZL110 Aircraft

Jerzy SZKODA – UWM Olsztyn.....	43
--	----

Diagnozowanie jakości partii wyrobów metodą statystycznej kontroli odbiorczej z oceną liczbową

Diagnosing the Articles Lot Quality Based on Statistical Reception Inspection with Numerical Estimation

Bogdan ŻÓŁTOWSKI – ATR Bydgoszcz.....	51
--	----

Dioksyny w oleju silnikowym

Dioksins in Engine Motor Oil

ARTYKUŁY Z III SEMINARIUM DEGRADACJI SYSTEMÓW

Jacek DYBAŁA, Stanisław RADKOWSKI – Politechnika Warszawska.....	59
---	----

Wykorzystanie sieci neuronowych CP w wibroakustycznej diagnostyce uszkodzeń przekładni zębatej

Use of CP Neural Network in Vibroacoustic Diagnostics of Toothed Gears Failure

Tomasz FIGLUS, Andrzej WILK – Politechnika Śląska Katowice.....	67
<i>Diagnostowanie złożonych przypadków uszkodzeń przekładni zębatych w eksperymencie czynnym</i>	
<i>Diagnosis of Complex Cases Gear Transmission Damage During the Active Experiment</i>	
Janusz KOZAK – Politechnika Gdańska.....	73
<i>Problemy oceny trwałości zmęczeniowej okrętowych, stalowych struktur dwupowłokowych typu SANDWICH</i>	
<i>Fatigue Durability Estimation Problems of All Steel Sandwich Panels</i>	
Bogusław ŁAZARZ, Piotr CZECH – Politechnika Śląska Katowice.....	79
<i>Wykorzystanie sieci neuronowych do identyfikacji pęknięcia stopy zęba</i>	
<i>An Identification of the Degree of the Tooth Root Cracking Using The Artificial Neural Network</i>	
Stanisław RADKOWSKI, Krzysztof SZCZUROWSKI – Politechnika Warszawska.....	89
<i>Badanie wpływu stanu naprężeń na proces propagacji fali naprężeniowej w strukturach sprężonych</i>	
<i>Stress Distribution Impact on the Wave Propagation in Prestressed Structures</i>	
Krzysztof ROSOCHOWICZ – Politechnika Gdańska.....	95
<i>Prognozowanie i ocena trwałości zmęczeniowej konstrukcji kadłuba okrętowego</i>	
<i>Live Prediction and Estimation of Fatigue Durability of Ship Hull Structure</i>	
WARTO PRZECZYTAĆ	
<i>„Diagnostyka ciepłno-przepływowa obiektów energetycznych”</i>	
Jerzego KRZYŻANOWSKIEGO i Jerzego GŁUCHA	105
KONFERENCJE	
Informacje o Konferencjach.....	106

SŁOWO REDAKTORA NACZELNEGO

Szanowni Czytelnicy!

W bieżącym numerze Diagnostyki publikowana jest grupa prac dotyczących oceny stanu silników spalinowych. W pracach tych przedstawiono między innymi: wyniki badań cech stanu technicznego rozpylaczy wtryskiwaczy okrętowych silników średnioobrotowych, badania zależności statystycznych pomiędzy parametrami diagnostycznymi silnika spalinowego, a emisją spalin oraz metodę badania dioksyn w oleju silnikowym. Należy tutaj zauważyć, że w prezentowanych pracach zwrócono uwagę na aspekty ekologiczne związane z eksploatacją silników spalinowych. Wśród nadesłanych artykułów głównych, dwa dotyczą analizy i przetwarzania sygnałów diagnostycznych, a w szczególności: demodulacji drgań maszyn przy zmianach prędkości obrotowej oraz możliwości wykorzystania wektora innowacji do opisu identyfikacji diagnostycznej obiektu w zmiennych warunkach eksploatacji.

Już kolejny raz ukazuje się w numerze „Diagnostyki” praca z zakresu diagnozowania jakości wytwarzania. Tym razem opisana jest metoda kontroli odbiorczej z oceną liczbową.

Osoby zainteresowane metodami monitorowania stanu mogą znaleźć ciekawe rozwiązanie opisane na przykładzie monitora magistrali danych CAN pośredniego sterowania samolotem.

W drugiej części „Diagnostyki” umieszczono prace prezentowane na III Seminarium Degradacji Systemów Technicznych. Przedstawiono w nich zagadnienia związane z diagnostyką przekładni zębatach, diagnozowaniem konstrukcji kadłubów statków oraz zjawiskami rozchodzenia się fali akustycznej w materiałach sprężonych. W artykułach dotyczących procesów degradacji można znaleźć opis zarówno wyników eksperymentów, metod diagnozowania jak i modeli (neuronowych, prognostycznych, konstrukcyjnych).



INFORMACJE PTDT

Zarząd Główny PTDT na posiedzeniu w Węgierskiej Górze w dniu 4.3.2004 zaakceptował bilans finansowy Towarzystwa za rok 2003. Podjęta została również decyzja o przyznaniu Pani dr inż. Annie Timofiejczuk (Politechnika Śląska) i Panu mgr inż. Radosławowi Pakowskiemu (Politechnika Warszawska) nagród w wysokości 1000 zł w uznaniu trudu włożonego w przygotowanie i prowadzenie strony internetowej PTDT (www.ptdt.polsl.gliwice.pl). Zarząd wyraził serdeczne podziękowanie nagrodzonym za ich działalność na rzecz PTDT.

Na spotkaniu Prezydium Zarządu w Poznaniu w dniu 7.09.2004r. omawiano sprawę opłat za publikacje w „Diagnostyce”. Zarząd przypomina, że zgodnie z decyzją podjętą w dniu 15.10.2003 r. opłata ta wynosi 45 zł od 1 strony druku czarno-białego. Przyjmuje się, że po uzyskaniu pozytywnej recenzji publikacja będzie zrealizowana po dokonaniu wpłaty. Wpłat należy dokonywać na konto PTDT, a wszelkich informacji udziela sekretarz PTDT (tomasz.galka@ien.com.pl).

Zarząd zwraca się również z prośbą do recenzentów o utrzymanie terminu 1 miesiąca na złożenie recenzji do „Diagnostyki” z uwagi na cykl wydawniczy.

W czasie trwania III Międzynarodowego Kongresu Diagnostyki Technicznej w Poznaniu podjęto decyzję o konieczności powołania *Sekretarza Diagnostyki*. Redakcja wyznaczyła na tę funkcję dra inż. Sławomira Wierzbickiego. Do zadań sekretarza należy:

- prowadzenie ewidencji zgłoszonych prac,
- prowadzenie korespondencji,
- informowanie Autorów o wynikach recenzji,
- informowanie o wysokości opłat za publikacje, zarówno Autorów jak i sekretarza PTDT.

Kontakt e-mailowy z sekretarzem *Diagnostyki* zostaje zachowany tak jak dotychczas z Redakcją tj.: diagnostyka@uwm.edu.pl, natomiast bezpośredni kontakt telefoniczny pod numerem: 089-5233751.

Począwszy od nr 32 *Diagnostyki* można śledzić losy nadesłanych prac na stronie internetowej: http://www.uwm.edu.pl/wnt/diagnostyka/art_zg.htm (strona ta już jest aktywna). Na tej stronie znajduje się lista zgłoszonych artykułów oraz informacje:

- czy praca została wysłana do recenzji,
- potwierdzenie otrzymania recenzji pozytywnej,
- potwierdzenie uiszczenia opłaty za publikację.

W przypadku recenzji negatywnej Autorzy będą powiadamiani w inny sposób, a z listy umieszczonej na stronie internetowej informacje o artykule zostaną „zdejte”.

POMIARY CECH STANU TECHNICZNEGO ROZPYLACZY SILNIKÓW OKRĘTOWYCH SPALAJĄCYCH OLEJ NAPEĐOWY*

Czesław JERMAK

Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej, Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych
61-542 Poznań, pl. Skłodowskiej-Curie 5 fax. (0-61) 665 35 70, e-mail cz.jermak@interia.pl

Jan MONIETA

Wyższa Szkoła Morska, Instytut Technicznej Eksploatacji siłowni Okrętowych, Zakład Siłowni Okrętowych,
ul. Wały Chrobrego 2, 70-500 Szczecin, fax: (091) 4809 575, email: jmonieta@wsm.szczecin.pl

Streszczenie

Artykuł zawiera wyniki badań cech stanu technicznego rozpylaczy wtryskiwaczy okrętowych silników średnioobrotowych, które zostały wycofane z eksploatacji. Pomiaru wybranych cech stanu dokonano za pomocą badań geometrycznych i przepływowych. Wyniki te dają informacje o zakresach oraz rozkładach zużycia i uszkodzeń rozpylaczy wtryskiwaczy.

Słowa kluczowe: silniki okrętowe, rozpylacze wtryskiwaczy, cechy stanu

Measurements of technical state features of the marine diesel engines injector nozzles combustion diesel oil

Summary

The article contains results of investigations of the technical state features of marine medium-speed engines, which was withdrawing from operational. Measurements of select features of state have been realised geometrical and flow testiness. These results give information about ranges and distributions wear also failures injection nozzles.

Keywords: marine engine, injector nozzles, technical state

1. WSTĘP

Do elementów silnika wysokoprężnego, wykazujących największą zawodność zalicza się wtryskiwacze [2, 4, 7, 11]. Są to jednocześnie elementy mające wpływ na osiągi silnika, zużycie paliwa, toksyczność spalin itp. Najniższą trwałość wtryskiwacza z kolei ma podstawowy jego element – rozpylacz [2].

Stan techniczny rozpylacza określają cechy stanu, których wartości z różną intensywnością wpływają na proces wtrysku paliwa. Rozrzut wartości tych cech na etapie wytwarzania oraz utrudniona kontrola jakości, ze względu na małe rozmiary i dostępność do istotnych parametrów konstrukcyjnych, sprawiają że występuje w nich często początkowa niezdatność [5, 7, 9]. Rozpylacze ulegają intensywnemu zużyciu i uszkodzeniom pod wpływem czynników wymuszających: roboczych, zewnętrznych oraz antropotechnicznych. Podjęto zatem próbę pomiaru istotnych cech makro- i mikrogeometrycznych

rozpylaczy oraz określenia zakresów i rozkładów zużycia, a także ich wpływ na stan techniczny rozpylaczy.

2. ZUŻYCIE I TYPOWE USZKODZENIA ROZPYLACZY

Cechy konstrukcyjne rozpylacza w różnym stopniu wpływają na proces wtrysku paliwa. Do najważniejszych z nich należą (rys. 1) [1, 3, 8]:

- liczba, przekroje i stan powierzchni otworów doprowadzających paliwo;
- kształty i wymiary stożków korpusu i iglicy;
- maksymalny skok iglicy;
- kształty, liczba i średnice otworków rozpylających, ich rozmieszczenie i nachylenie;
- wymiary studzienki rozpylacza;
- luz w części korpusu rozpylacza prowadzącej iglicę.

Ogólnie czynniki wpływające na niezawodne działanie rozpylaczy można podzielić na: konstrukcyjne (rozwiązania konstrukcyjne,

* Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w 2003 roku jako projekt badawczy nr 5T12D 00524.

zaprojektowane kształty), technologiczne, produkcyjne (własności fizykochemiczne materiału) i eksploatacyjne [3, 6].

$$S_t = X' \quad (5)$$

następujących cech:

$$S_t = f(\alpha_g, \alpha_i, \mu A_r, h_{max}, i_r, A_{li}, V_s) \quad (6)$$

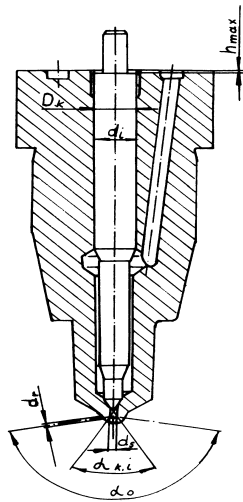
gdzie: A_{li} – powierzchnia luzu pomiędzy częścią prowadzącą korpusu i iglicy rozpylacza, V_s – objętość przestrzeni studzienki rozpylacza, α_g – kąt stożka gniazda uszczelniającego w korpusie rozpylacza, μA_r – czynny przekrój wypływu otworka rozpylającego.

Rozpylacz znajduje się w stanie zdatności, gdy wszystkie cechy stanu zawarte są w polu tolerancji stanu zdatności.

3. OBIEKT BADAŃ

Badaniom poddano rozpylacze produkcji krajowej oznaczane 7 x 0,26 R i 7 x 0,28 R, układów wtryskowych okrętowych silników typu 6AL20/24 napędu prądnic, eksploatowane w rzeczywistych warunkach. Były to rozpylacze siedmiotworkowe o średnicy nominalnej otworka 0,26 i 0,28 mm z elektroerozyjnym zaokrągleniem krawędzi otworków. Wymienione rozpylacze zostały wyłączone z eksploatacji po stwierdzeniu niewłaściwego ich działania lub wymieniono je profilaktycznie.

Przekrój rozpylacza silnika okrętowego typu AL20/24 z zaznaczonymi, istotnymi cechami konstrukcyjnymi przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przekrój rozpylacza silnika okrętowego typu AL20/24: d_{ip} – średnica części prowadzącej iglicy, D_k – średnica części korpusu rozpylacza prowadzącej iglicę, d_r – średnica otworka rozpylającego, d_s – średnica studzienki, h_{max} – maksymalny skok iglicy, α_g – kąt stożka gniazda uszczelniającego w korpusie rozpylacza, α_i – kąt wierzchołkowy stożka iglicy, α_o – kąt rozmieszczenia otworków rozpylających

Kadłuby rozpylaczy wykonane są ze stali WCLVŻ ulepszone cieplnie do twardości 37÷42 HRC oraz azotowane. Iglice wykonane są ze stali szybko tnącej SW7M o twardości 62÷64 HRC.

Stan techniczny S_t rozpylaczy uwarunkowany jest wartościami wyselekcjonowanych ze zbioru wektora cech obiektu X' :

4. METODA POMIARU OCENY CECH MAKRO- I MIKROGEOMETRYCZNYCH ROZPYLACZY

4.1. Pomiary geometryczne

Zasadniczym celem tych badań było określenie zakresu zmian cech konstrukcyjnych rozpylaczy. Nie badano zużycia w czasie, bowiem wstępne badania wykazały, że zależy ono w małym stopniu od czasu [7, 9]. Istotniej na stan cech makro- i mikrogeometrycznych rozpylaczy wpływa jakość wytwarzania, jakość stosowanych paliw, warunki eksploatacji, obciążenia itp.

Pomiary geometryczne średnicy i skoku iglicy wykonywane były wysokościomierzem Abbego PO1, firmy Carl Zeiss Jena. Średnicę części korpusu rozpylacza, prowadzącej iglicę, mierzono średnicówką czujnikową z końcówką pomiarową rozprężną. Czujnik posiadał działkę elementarna 0,001 mm.

Średnicę części prowadzącej korpusu i iglicy mierzono w trzech płaszczyznach (I–III), prostopadłych do osi podłużnych oraz dla każdej płaszczyzny w czterech przekrojach, przechodzących przez ich osie co 45° (płaszczyzny IV–VII rys. 2). Na podstawie średnic zewnętrznych iglicy i otworu korpusu w części prowadzącej iglicę, mierzonych w czterech przekrojach, obliczono luz poprzeczny minimalny oraz luz poprzeczny maksymalny według zależności:

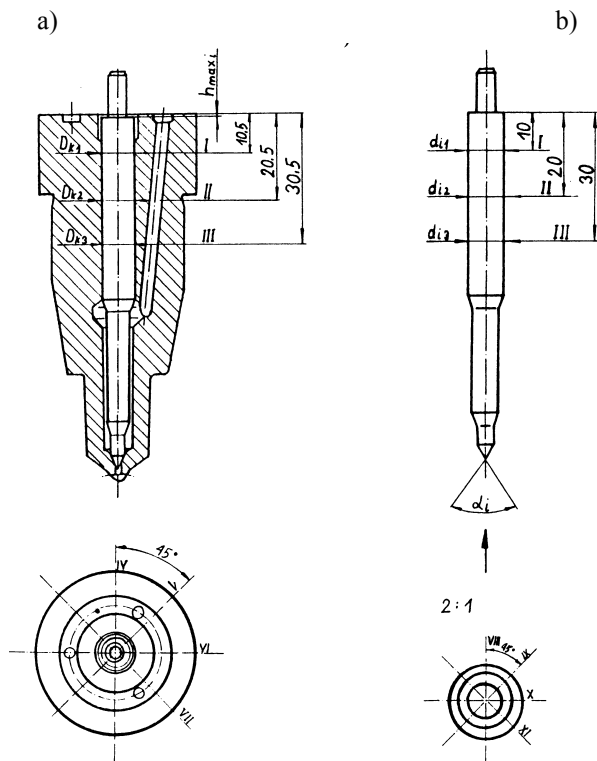
$$L_{min} = D_{k min} - d_{ip max} \quad (1)$$

$$L_{max} = D_{k max} - d_{ip min} \quad (2)$$

Pomiary kąta wierzchołkowego stożka iglicy wykonano mikroskopem warsztatowym. Na każdej iglicy przeprowadzono pomiar w 4. płaszczyznach, przechodzących przez jej oś co 45°. Ostateczny wynik stanowiła średnia arytmetyczna z czterech pomiarów (płaszczyzny VIII–XI na rys. 2b).

Pomiar maksymalnego skoku iglicy prowadzono w czterech płaszczyznach,

przechodzących przez jej oś co 45°, jako różnice powierzchni przylgowej korpusu rozpylacza ioporowej iglicy, przy niezmiennym położeniu iglicy. Za ostateczną wartość maksymalnego skoku przyjmowano najniższą wartość z czterech pomiarów (rys. 2a).



Rys. 2. Schematy przeprowadzania pomiarów: a) średnic korpusu prowadzących iglicę $D_{k1}...D_{k3}$ i maksymalnego skoku iglicy $h_{max1}...h_{max4}$, b) kąta stożka wierzchołkowego iglicy $\alpha_{i1}... \alpha_{i4}$

Za miarę stanu otworków rozpylających przyjęto strumień masy przepływu oleju ze względu na elektroerozyjne zaokrąglenie krawędzi otworków rozpylających i odchylenie od kształtu kołowego, na długości otworków, oraz wpływ chropowatości powierzchni [10]. Pomiary optyczne otworków miały sens dla rozpylaczy bez elektroerozyjnego zaokrąglenia krawędzi otworków wtryskowych w czasie wytwarzania [2]. Próby pomiarów średnic otworów rozpylających za pomocą mikroskopu uniwersalnego, przy powiększeniu obrazu 50x, nie przyniosły rozwiązania z powodu trudności ustalenia zarysu krawędzi tych otworków. Z takim samym skutkiem zakończyły się próby zastosowania mikroskopu warsztatowego z powiększeniem 100 x, we współpracy z kamerą wideo oraz komputerem. Pomiary optyczne otworków rozpylających okazały się nieprzydatne ze względu na brak dostatecznej ostrości krawędzi. Dlatego ostatecznie stan otworków rozpylających określono metodą przeplywową.

Pomiary geometryczne okazały się pracochłonne i w znacznym stopniu ograniczone możliwościami przyrządów pomiarowych.

4.2. Wykorzystanie strumienia przepływu paliwa do oceny cech makro- i mikrogeometrycznych rozpylaczy

Za miarę cech otworków rozpylających przyjęto czas wypływu masy 5 kg oleju Shell Calibration Fluid B pod stałym ciśnieniem $10 \pm 0,05$ MPa i o temperaturze $35 \pm 2^\circ\text{C}$. Rozpylacze badano przy maksymalnym skoku iglicy, więc dławienie następowało tylko w otworkach rozpylających. Strumień masy wypływu q_m określono według zależności:

$$q_m = \frac{m}{\tau} \quad (3)$$

gdzie:

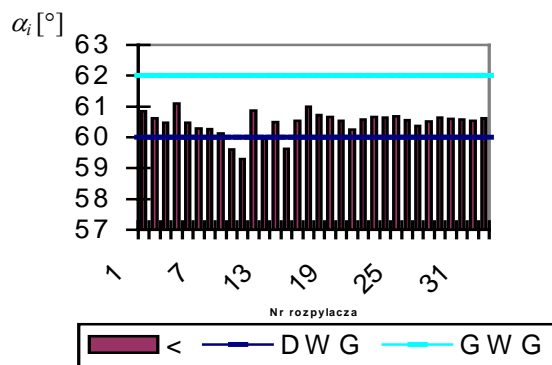
m – masa czynnika [kg],

τ – czas wypływu czynnika [s].

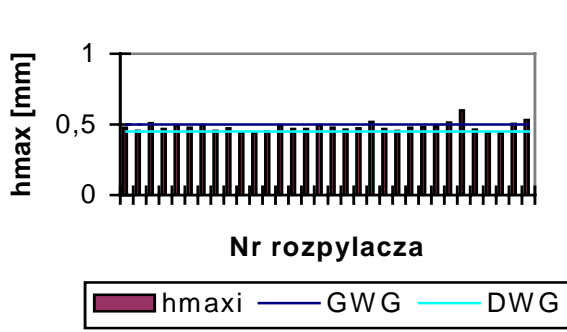
Badania przeprowadzono na zbudowanym do tego celu stanowisku badawczym [10].

5. Wyniki pomiarów cech makro- i mikrogeometrycznych rozpylaczy

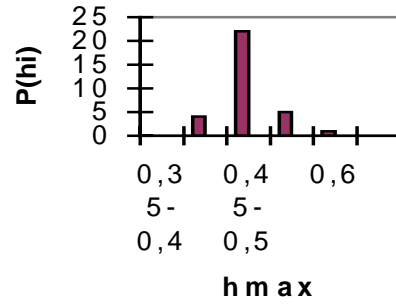
Posługując się wieloma przyrządami pomiarowymi, dokonano pomiarów geometrycznych podstawowych cech konstrukcyjnych rozpylaczy silników okrętowych typu AL20/24. Rozpylacze były przeznaczone do wtrysku oleju napędowego. Nie mierzono wielkości geometrycznych, których małą istotność bądź wątpliwą dokładność wykazali autorzy innych prac [2, 3, 6]. Wyniki pomiarów wybranych wielkości geometrycznych wraz zaznaczeniem poziomów granicznych eksploatowanych, przykładowych rozpylaczy silników typu AL20/24, zamieszczono na rys. 3 do 7.



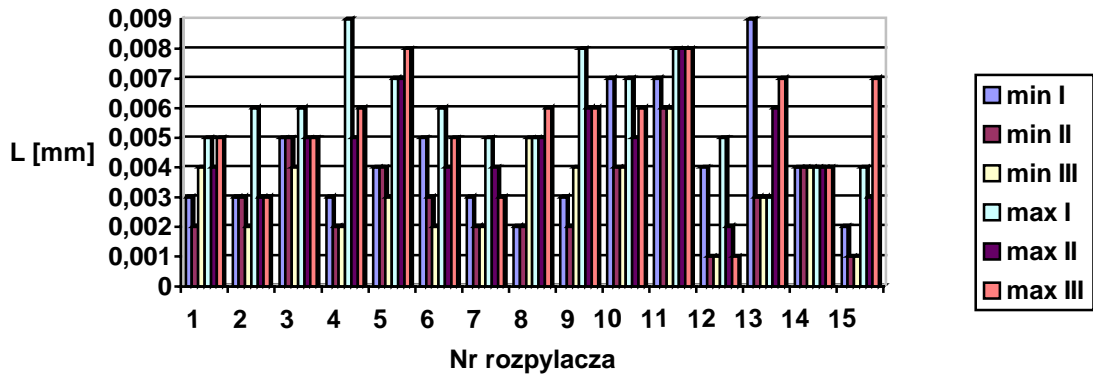
Rys. 3. Przykładowe wyniki pomiarów kąta wierzchołkowego stożka iglicy α_i badanych rozpylaczy: DWG – dolny wymiar graniczny, GWG – górny wymiar graniczny



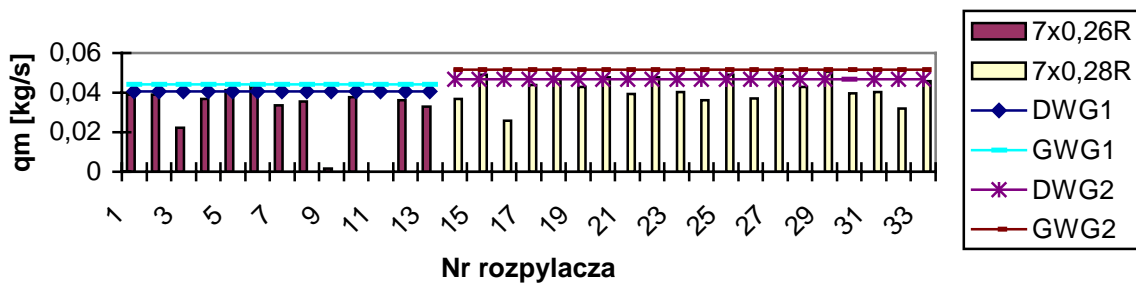
Rys. 4. Przykładowe wyniki pomiarów maksymalnego skoku iglicy h_{max} badanych rozpylaczy



Rys. 5. Częstość występowania wartości maksymalnego skoku iglicy w poszczególnych przedziałach



Rys. 6. Przykładowe wyniki pomiarów luzu minimalnego L_{min} i maksymalnego L_{max} badanych rozpylaczy eksploatowanych, wyznaczonego w płaszczyznach od I do III



Rys. 7. Wyniki pomiaru strumienia przepływu oleju przez otworki rozpylające

Do jakościowej analizy wyników pomiarów cech stanu rozpylaczy posłużono się udziałem procentowym U_p cech, które znalazły się w polu

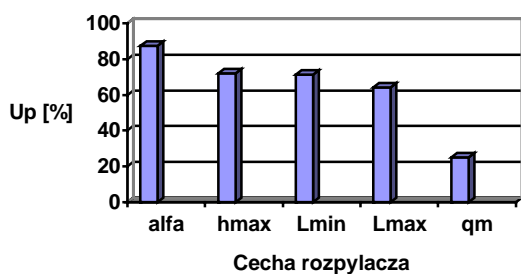
$$U_p = \frac{\sum_{i=1}^{i=l} C_{wi}}{\sum_{i=1}^{i=l} C_{wi} + \sum_{j=1}^{j=m} C_{pj}} \cdot 100\% \quad (6)$$

tolerancji stanu zdatności obliczony według zależności:

gdzie:

C_{wi} – i -ta cecha stanu znajdująca się w polu stanu zdatności,

C_{pj} – j -ta cecha stanu znajdująca się poza polem tolerancji stanu zdatności.



Rys. 8. Udział U_p cech rozpylaczy silników okrętowych typu AL20/24, które mieszczą się w polu tolerancji wytwarzania

Na rys. 8 przedstawiono udział cech stanu technicznego rozpylaczy, które mieszczą się w polu tolerancji stanu zdadności poszerzonym o błędy pomiarów.

Z rys. 8 wynika, że najwięcej stanów niezdatności rozpylaczy spowodowanych było niewłaściwymi wartościami strumienia przepływu oleju przez otwórki rozpylające, wywołanym ich zużyciem przez koksowanie oraz ubytki erozyjne, kawitacyjne i korozyjne. Drugą najliczniejszą cechą powodującą stan niezdatności okazał się maksymalny luz pomiędzy luz pomiędzy częścią prowadzącą korpusu rozpylacza i iglicy, determinujący przecieki paliwa i przedmuch spalin.

Na podstawie uzyskanych wyników wykonano także macierz niezdatności binarnie (tabela 1).

Tabela 1. Fragment macierzy stanów technicznych poszczególnych rozpylaczy ze względu na cechy stanu: 1 – stan zdadności, 0 – stan niezdatności

Nr rozpylacza	α_i	h_{max}	L_{min}	L_{max}	q_m
1	1	1	1	1	0
2	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	0
4	1	1	1	0	0
5	1	1	1	0	0
6	1	1	1	1	0
7	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	0
9	0	1	1	0	0
10	0	0	0	1	0
11	1	0	0	0	0
12	0	1	0	0	0
13	1	1	0	1	0
14	0	1	1	1	0

Zgodnie z kryterium zdadności rozpylaczy zawartym w rozdz. 3 tylko 6,25% badanych rozpylaczy znajduje się w stanie zdadności. Tak więc w eksploatacji podjęto decyzje trafnie w 94% przypadków przy uwzględnieniu tylko wymienionych cech stanu technicznego.

6. UWAGI KOŃCOWE

Przeprowadzenie pomiarów geometrycznych okazało się bardzo czasochłonne i pracochłonne co wynikało m. in. z utrudnionego dostępu do małych kanałów rozpylacza i ograniczenia od strony środków pomiarowych.

Proces zużycia rozpylaczy ma charakter złożony i przebiega z różną intensywnością w poszczególnych węzłach konstrukcyjnych. Jedne z badanych cech nie ulegają praktycznie zmianom, inne zaś zmieniają się w miarę upływu czasu eksploatacji pod wpływem czynników wymuszających roboczych i zewnętrznych.

Dominującym sposobem zużycia i uszkodzeń rozpylaczy jest zmiana wymiarów ich otworków rozpylających, wpływających na jakość dawkowania i wtrysku paliwa. Zmiana przekrojów czynnych otworków rozpylających polegała w głównej mierze na zmniejszeniu przekrojów, spowodowanych koksowaniem i tworzeniem osadów z paliwa. Przeprowadzone badania pozwoliły również na wyjaśnienie związków pomiędzy zmianami cech rozpylaczy spowodowanymi ich zużyciem, a ich własnościami funkcjonalnymi – przepływowymi.

Za osiągnięcie przedstawionych badań należy uznać pomiar większej liczby cech makro- i mikrogeometrycznych wtryskiwaczy, niż to czynili inni autorzy, którzy ograniczyli się zazwyczaj do wybranych cech, czy węzłów konstrukcyjnych wtryskiwaczy. Powinno się to przyczynić do zwiększenia wiarygodności badań.

Wyniki badań mogą być przydatne na etapie konstrukcyjnych, wytwarzania i eksploatacji w działaniach zmierzających do zmniejszenia zużycia i uszkodzeń tego słabego elementu, a zarazem istotnego ogniwa silnika spalinowego. Wyniki również powinny być przydatne przy symulacji zużycia i uszkodzeń rozpylaczy w diagnostyce kontrolnej i eksploatacyjnej.

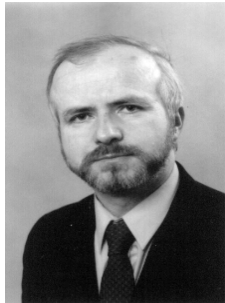
LITERATURA

- [1] Baloiu S. i in.: Cercetări experimentale privind coleratia dintre jetul de combustibil, arhitectura camerei de ardere divicate cu functionare intermientă si miscarea de rotatie a fluidului motor. *Constructia di masini* 1988 no 2, s. 65–70.
- [2] Drozdowski J.: Studium obciążeń cieplnych, kawitacji i niezawodności rozpylaczy silników okrętowych. Wyd. Wyższej Szkoły Morskiej, Szczecin 1998.
- [3] Gąsowski W.: Wpływ zużycia na charakterystyki hydrauliczne i wzrost koksowania rozpylaczy silników wysokoprężnych. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 1986 nr 3–4, s. 527–537.
- [4] Gondal A. K., Nautiyal P. C.: Wear investigations of injector nozzle using

- radionuclide technique. *Wear* 1990 no 2, s. 375–384.
- [5] ISO 8984. Diesel engines. Testing of fuel injectors.
- [6] Krasowski E.: Wpływ zużycia par precyzyjnych na parametry pracy silnika wysokoprężnego. Praca naukowa Politechniki Lubelskiej. Mechanika, Lublin 1990 nr 45.
- [7] Monieta J.: *Choice of most deceptive functional system and sub-assembly of marine diesel engines*. Povyšenje Effektivnosti Raboty Energetičeskich Ustanovok. Meždunarodnyj Sbornik Nayčnych Trudov. Kaliningrad 2002, s. 141–146.
- [8] Monieta J.: Diagnostyka kontrolna wtryskiwaczy silników okrętowych z zastosowaniem parametrów procesów roboczych i towarzyszących. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 2001 nr 4, s. 167–179.
- [9] Monieta J.: *Estimation of reliability of injectors of marine diesel engines type 6AL20/24*. *Eksploatacja i Niezawodność* 2003 nr 4, s.47–55.
- [10] Monieta J., Wasilewski M.: *Wykorzystanie strumienia przepływu do oceny zużycia otworków rozpylających silników okrętowych*. *Tribologia* 2001 nr 5, s. 947–961.
- [11] Sizov A. G., Ragozin A. V., Makarov A. V.: *Rasčet processa iznašivanija precizjonnych detalej toplivnoj apparatury avtotraktornych dizelej*. NPO „CNITA”. 1990, s. 192–196.



Dr inż. Czesław Janusz Jermak jest absolwentem Wydziału Mechaniczno-Technologicznego Politechniki Poznańskiej w 1974 roku. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w 1983 roku. Od początku działalności zawodowej zajmował się problematyką pneumatycznych pomiarów długości. Kierował tematami badawczymi w ramach programów: resortowych R07, badań podstawowych CPBP 02-20 oraz grantów w 1996 i 2000 roku. Twórca lub współtwórca ponad 20 opatentowanych konstrukcji z dziedziny pneumatyki pomiarowej, sensoryki i metrologii długości. Jest autorem 23 publikacji i 30 referatów.



Dr inż. Jan Monieta jest absolwentem wydziału Maszyn Roboczych i Pojazdów Politechniki Poznańskiej. Pracuje na stanowisku adiunkta w Zakładzie Siłowni Okrętowych Wyższej Szkoły Morskiej w Szczecinie. W pracy naukowej zajmuje się problemami eksploatacji siłowni okrętowych, a zwłaszcza silników spalinowych. Jest autorem i współautorem 57 publikacji i referatów.

WEKTOR INNOWACJI W DIAGNOZOWANIU

Piotr KRZYWORZEKA

Katedra Mechaniki i Wibroakustyki AGH, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, krzyworz@agh.edu.pl

Streszczenie

Wektor innowacji może stanowić użyteczny opis rezultatów identyfikacji diagnostycznej obiektu w zmiennych warunkach eksploatacji. Reprezentuje kierunek minimalizujący wrażliwość odwzorowań lokalnych na zmiany nieinformacyjne.

Wprowadzono jednolitą reprezentację różnych rodzajów zakłóceń właściwych diagnozowaniu i zastosowanie procedurę rzutowania optymalnego. Odwzorowanie w kierunku innowacji pozwoliło w praktyce zredukować o kilka rzędów wpływ zakłóceń związanych ze zmiennymi warunkami pracy. Opisana metoda generuje także wskaźnik jakości informatywnych współrzędnych wektora obserwacji, co pozwoliło zweryfikować skuteczność prostej procedury selekcji danych. Podano przykłady zastosowań.

Słowa kluczowe: diagnostyka, identyfikacja, rzutowanie optymalne, innowacja.

INNOVATION VECTOR IN DIAGNOSTICS

Summary

Some changes of signal features that don't occur in proper technical state are called innovative. The paper aims to show that in some identification experiments innovation vector c_0 represents direction of maximum SNR especially towards variable exploitation state. A method of c estimation using optimal projection has been discussed. Based on c_0 one-dimensional subspace simplifies symptoms and diagnostic discrimination. A bit of practical results is presented.

Key words: diagnostics, identification, optimal projection, innovation.

1. ODWZOROWANIE DIAGNOSTYCZNE

2.1. Pojęcie innowacji

Składowa lub cecha sygnału, której zmienność odtwarza zmianę parametrów stanu w sensie statystycznym, lub zdeterminowanym określaną będzie dalej mianem innowacyjnej, a informacja o niej wartościową dla diagnozowania [8].

Tu i dalej pojęcie, ZI odnosi się do procesów drganiowych maszyny. Oznacza zmienność, która jest w dobrym stanie technicznym praktycznie niemierzalna, jakie by nie były zmiany warunków pracy. Determinuje zatem ZI pośrednią mierzalność własności stanu technicznego oznaczanej dalej W_1 .

Proponowana interpretacja pojęcia innowacji odnosi się sytuacji, gdy stan techniczny staje się mierzalny, inaczej mówiąc dotyczy odwzorowania lokalnego, umożliwiającego rozróżnienie dwu klas W_1 . Takie podejście bliskie jest koncepcji procesu innowacyjnego Kołmogorowa (1941), rozwiniętej w latach 1969 - 70 przez Kailatha (por. Haykin [3]). Różnice nie dotyczą jednak jedynie interpretacji. Diagnostyczny wektor innowacji zachowuje ortogonalność względem podprzestrzeni stanu eksploatacyjnego, lecz może stanowić realizację procesu o predyktownym trendzie.

Tworzone w wyniku procedury identyfikacji diagnostycznej struktury odwzorowujące wybrane własności obiektu powinny umożliwić mierzalność zmian innowacyjnych

2.2. Model nominalny

W hierarchii modeli przydatnych w opisie systemu, model najbardziej ogólny desygnuje jedynie nazwy własności (cech), związanych z różnymi aspektami jego zachowań – stąd określaną bywa modelem nominalnym – MN [7].

Maszyna ma wiele własności – jeszcze więcej, gdy działa nie za dobrze. Jednak potrzeby skutecznego diagnozowania prowadzą do akceptowalnego (zdaniem autora), modelu nominalnego minimum [8]

$$MN = \langle W_1, W_2, W_3, W_E, W_w \rangle$$

[W1] – zbiór cech diagnozowalnych, umownie reprezentowany dalej przez własność ogólną stanu W_1 . Klasy W_1 opisują stan techniczny wg przyjętej skali.

[W2] – cechy związane z funkcjonowaniem obiektu – ruchem, dynamiką i sterowaniem. Reprezentują procesy odwracalne, zmienne w skali czasu t' , ale zdeterminowane w sensie znajomości

i kontroli przyczyn – stąd określone też mianem zakłóceń zdeterminowanych. Generalnie utrudniają diagnozowanie, ale właściwe wykorzystanie ich kontrolowanej zmienności w eksperymencie czynnym PDI, a także w trakcie monitorowania, pozwala uzyskać symptomy stanu mało wrażliwe, np. na zmiany prędkości obrotowej, lub obciążenia maszyny [7, 8].

[W3] – zbiór niekontrolowanych cech zakłócających reprezentujących procesy bezpośrednio niesterowalne, niezamierzone i nieinformacyjne (stąd miano zakłócenia niezeterminowanego).

W_w – własność wspomagająca odwzorowanie. Pominięta zakłóca, właściwie wykorzystana pozwala uzyskać lokalne odwzorowanie własności innej, lepsze w sensie wybranego kryterium. Powinna być mierzalna, a także odtwarzalna w systemie diagnozującym. Jedną z ważnych W_w jest synchronizm [8].

W_E – dotyczy strategii działań (planu eksperymentu identyfikacji – PE).

W_E nie stanowi immanentnej własności obiektu, lecz decyduje o stopniu mierzalności wybranych składowych modelu (1). Od wyboru PE zależy, w jakim stopniu eksperyment odwzorowuje rzeczywiste własności obiektu, a w jakim działanie eksperymentatora.

2.3. Odwzorowanie własności MN

Warunkiem użyteczności postulowanego MN (3.1) jest mierzalność składowych.

Składowe MN, za wyjątkiem W_E , nie są mierzalne bezpośrednio, lecz poprzez inne własności zbioru obserwacji $\Lambda = [\xi]$, zwane dalej odwzorowującymi.

Wiele przesłanek, w tym doświadczenie, wskazuje, że odwzorowanie MN w czynnych eksperymentach identyfikacji zmian innowacyjnych jest natury deterministyczno-probabilistycznej (Det-Pro) [6,7]. o dominacji tej pierwszej

Jeśli

$$\frac{E_Z}{E_L} \gg 1$$

E_Z – energia zmian zamierzonych, zorientowanych

E_L – energia zmian losowych, lub niekontrolowanych

wówczas obiekty, lub odwzorowania, określane będą dalej jako quasi – deterministyczne.

W przypadku odwzorowania oznacza to możliwość przybliżenia wielomodalnego rozkładu pewnego wektora obserwacji ξ (charakterystyki pomiaru) przez strukturę odwzorowującą S_0

$$S_0 = \langle \Lambda, [K_j], \mathcal{R}_S | W_E \rangle \quad (1)$$

Λ – zbiór wartości średnich ξ w przedziałach obserwacji T_k obserwacji,

\mathcal{R}_S – zbiór relacji determinujących strukturę odwzorowującą S_0 ,

K_j – macierze kowariancji estymat ξ_j

Relacje zbioru \mathcal{R}_S wyznacza odwzorowanie W_E ,

tj. po prostu realizacja planu eksperymentu PDI

Przyrost wektora obserwacji:

$$\Delta_{kj} = \xi_j(t_k) - \xi_{j-1}(t_i). \quad (2)$$

określany będzie dalej jako wartościowy – Δ_{1j} , jeśli:

- odwzorowuje zmianę klasy $WS1_k \Rightarrow WS1_j$ rozpoznawanej własności $W1$ stanu technicznego obiektu;
- eksperyment, lub analiza pozwalają odróżnić zmianę wartościową Δ_1 od zakłócającej, (tj. zachowań dopuszczalnych);

Reasumując, ma miejsce odwzorowanie własności:

$W1 \Rightarrow \Delta_1$ – wartościowy przyrost wektora obserwacji;

$W2 \Rightarrow \Delta_2$ – zakłócający przyrost wektora obserwacji;

$W3 \Rightarrow K = E(\xi\xi^T)$ – macierz kowariancji

W przestrzeni Ξ wektora obserwacji ξ odwzorowanie czynnego, lub symulacyjnego eksperymentu czynnikowego PDI, zakładającego dwupoziomowe sterowanie $W1$ i $W2$, S_0 reprezentują lokalnie obiekty: $\langle \Delta_1, [\Delta_{2j}], K_j \rangle$.

Odwzorowanie lokalne pozwala rozróżnić dwie kolejne klasy (kategorie) $W1$ według stosowanej skali nominalnej [6]

W zmiennych warunkach pracy obiektu ma jednocześnie miejsce odwzorowanie lokalne $W2$

$W3$ bywa odwzorowywane w praktyce zawsze.

Quasi-deterministyczny model odwzorowania implikuje warunek

$$\frac{\max \|\Delta_{jk}\|^2}{\|K\|} \gg 1.$$

Dla przejrzystości dalszych rozważań wygodnie posłużyć się geometryczną interpretacją odwzorowania MN, jak np. przedstawioną na rys 1 serią powtórzeń ułamkowych eksperymentu czynnikowego 2^2 [10]. B to łączna reprezentacja odwzorowania $W2$ i $W3$, (o czym dalej w p. 2)

2. ESTYMACJA KIERUNKU INNOWACJI

2.1. Lokalna ocena odwzorowania

Model odwzorowania powinien ułatwić badanie zmienności innowacyjnej (ZI).

Przy danej strategii eksperymentu PDI istnieje w obszarze Ξ kierunek najkorzystniejszego odwzorowania ZI.

Najkorzystniejszego w jakim sensie ?
 Ograniczając diagnozę do lokalnego rozróżnienia
 dwu klas stanu – I, albo II na podstawie pomiaru ξ_k ,
 warto podjąć próbę oceny wartości informacji
 pozwalające na przyjęcie jednej z dwu hipotez, $H_I|$
 ξ_k , lub $H_{II}| \xi_k$, nawet, jeśli oszacowania ich
 prawdopodobieństw:

$$P_1 = P(\xi_k|H_1), \quad P_2 = P(\xi_k|H_2)$$

także *a posteriori* nie są znane.

Zaproponowana przez Kullback'a [5,9]
 formuła:

$$Q_{21} = \sum_{k=1}^N (P_{1k} - P_{2k}) \log \frac{P_{1k}}{P_{2k}}; \quad (3)$$

gdzie Q_{21} – miara zróżnicowania odwzorowania
 lokalnego dwu klas własności $W1$, wyraża przy
 założonej znajomości parametrycznego modelu
 losowego ocenę entropii Shannona różnicy
 rozkładów P_1, P_2 dla wszystkich obserwacji
 $\xi_k \in \Xi$.

Wybór Q_{21} sugerują jej własności, istotne dla
 proponowanych dalej modyfikacji i obszaru
 zastosowań, a przede wszystkim:

- addytywność informacji wnoszonych przez
 poszczególne obserwacje ξ_k ;
- możliwość adaptacji dla opisu
 przybliżonego modelu Det-Pro, a ściślej
 jego odwzorowaniu lokalnemu (por. rys. 1).

Dopuszczalna w modelu Det-Pro lokalna
 aproksymacja nieznanego modelu dwumodalnego
 rozkładami normalnymi.

$$\mathcal{N}_1[E(\xi_{k1}), \mathbf{K}_{y1}] \quad \text{oraz} \quad \mathcal{N}_2[E(\xi_{k2}), \mathbf{K}_{y2}],$$

pozwała pominąć nieznaną *a priori* zbiór
 prawdopodobieństw $[P_1, P_2]$, zastępując je *a*
posteriori obiektami struktury odwzorowującej (2),
 (przyrostami $\Delta(\xi)$ i formami kwadratowymi

$$\xi^T \mathbf{K} \xi = 1, \quad Q \text{ przyjmuje wówczas postać:}$$

$$Q_{21} = \frac{1}{2} \text{tr}[(\mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_2)(\mathbf{K}_2^{-1} - \mathbf{K}_1^{-1})] + \frac{1}{2} \text{tr}[(\mathbf{K}_1^{-1} + \mathbf{K}_2^{-1})(\Delta \Delta^T)]$$

(Tu $\Delta = \Delta_1$, natomiast $\Delta_2 = 0$).

Założenie jednorodnego odwzorowania $W3$
 w całym obszarze Λ , zatem równość

$$\mathbf{K}_{y1} = \mathbf{K}_{y2} = \mathbf{K},$$

sprowadza postać Q_{21} do prostej formy
 kwadratowej

$$q_{21} = \Delta^T \mathbf{K}^{-1} \Delta \quad (4)$$

znanej jako miara Mahalanobisa [6, 9]. Nie
 obejmuje ona ewentualnej zmienności
 innowacyjnej dla $\delta \mathbf{K} \neq 0$, która nie może być
 pominięta, jeśli $\Delta_2 = 0$, co z kolei pozostaje w
 sprzeczności założeniem (2)

Potrzebna jest, zatem modyfikacja (por. [9]).
 reprezentacji zakłóceń, która by uwzględniała oba
 ich rodzaje.

2.2. Rzutowane optymalne

Poszukiwany kierunek zmian innowacyjnych
 reprezentuje wektor $\mathbf{c}_0 \in \Xi$, który maksymalizuje
 stosunek

$$q_1 = \max \frac{\mathbf{c}^T \Delta_1 \Delta_1^T \mathbf{c}}{\mathbf{c}^T \mathbf{K} \mathbf{c} + \sum_{k=1}^{\mu} \mathbf{c}^T \Delta_{2k} \Delta_{2k}^T \mathbf{c}} \quad (5)$$

co odpowiada maksimum funkcjonału

$$J(\mathbf{c}) = \mathbf{c}^T \Delta_1 \Delta_1^T \mathbf{c} - \lambda [\mathbf{c}^T (\mathbf{K} + \sum_{k=1}^{\mu} \Delta_{2k} \Delta_{2k}^T) \mathbf{c} - 1]$$

Potwierdzona w praktyce quasi-deterministyczna
 natura odwzorowania może uzasadniać celowość
 jednej reprezentacji dwu kategorii zakłóceń,
 określanej jako uogólniona macierz kowariancji \mathbf{B}
 [8].

$$\mathbf{B} = \mathbf{K} + \sum_{k=1}^{\mu} \Delta_{2k} \Delta_{2k}^T \quad (6)$$

Składowe \mathbf{B} reprezentują różne stopnie
 organizacji energii zakłóceń rozróżnianych przez
 MJ jako $W2$ i $W3$.

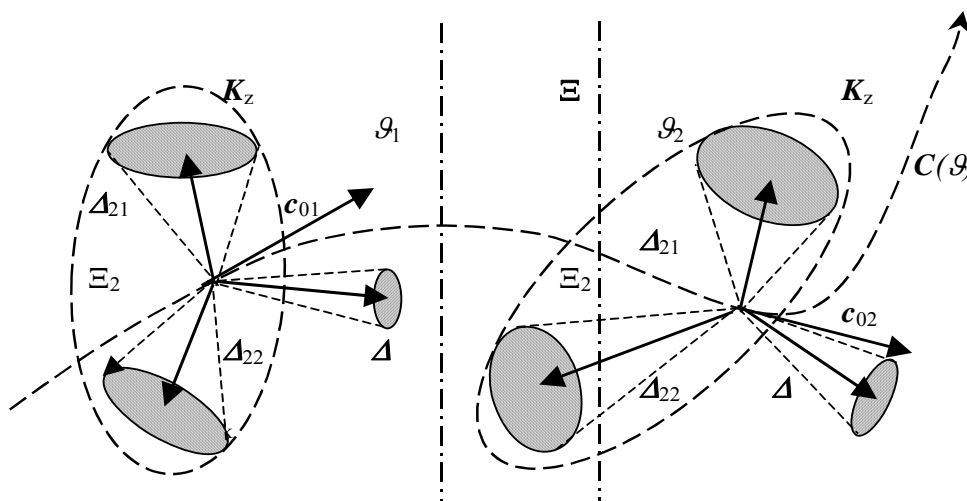
Poszukiwane $[\mathbf{c}_0, \lambda]$ są rozwiązaniem równania

$$\nabla_{\mathbf{c}} J = 2(\Delta_1 \Delta_1^T - \lambda \mathbf{B}) \mathbf{c}$$

postaci

$$\lambda = \text{tr} \mathbf{B}^{-1} \Delta_1 \Delta_1^T = \Delta_1^T \mathbf{B}^{-1} \Delta_1 = q_1$$

$$\text{stąd} \quad \mathbf{c}_0 = \mathbf{B}^{-1} \Delta_1 \quad (7).$$



Rys. 1. Odwzorowania lokalne składowych MN w:

- eksperymencie monitorowania, wówczas $\Delta = \Delta_{23}$;
- czynnym eksperymencie PDI, wówczas $\Delta = \Delta_1$;
- $C(\theta)$ – linia innowacji w czasie eksploatacyjnym

3. MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA

Zbiór par, $\langle c_0, q_1 \rangle$ pozwala ocenić ilościowo pewne cechy odwzorowania W1, istotne dla korekty PE, zwłaszcza w trakcie długoterminowego monitorowania.

Wektor c_0 stanowi bazę jednowymiarowej podprzestrzeni $U \subset \Xi_0$

$$c_0^T(\xi)\Delta_1(\xi) = \Delta(u) \in U$$

Transformacja taka ułatwia dyskryminację i klasyfikację W1.

Wektor Δ_1 nie musi i zazwyczaj nie ma kierunku tożsamego z c_0 . Innowacyjna jest jego składowa kolinearna.

Jeśli

- Δ_{ξ_1} jest znany, rzut $\Delta_{\xi_1} \Rightarrow c$ minimalizuje SNR w sensie (5);
- Δ_{ξ_1} nie jest znany, to zmianę normalną $\frac{\partial [c(\theta)]}{\partial \theta}$ można uznać za innowacyjną.

Wówczas, powtarzając w momentach inspekcji θ_k podobne konfiguracje [WS2] (parametrów sterowania) można oszacować każdorazowo kierunek c_0 , jako ortogonalny do podprzestrzeni rozpiętej na wektorach Δ_{2n} [WS2_n].

Procedura rzutowania stanowi optymalny filtr zakłóceń W2 i W3, o poziomie skuteczności

$$L_{qw}(\text{dB}) = 10 \lg(qw), \text{ który poprawia SNR w}$$

stopniu: $qw = \frac{q_1}{q_0}$ w odniesieniu do SNR

bezkierunkowego.

$$q_o = \frac{\|\Delta_1\|^2}{\|\mathbf{K}\| + \sum_1^n \|\Delta_{2j}\|^2} \quad (8)$$

Jeśli pogorszeniu stanu technicznego maszyny towarzyszy ewolucja \mathbf{K} , dla jej śledzenia lepsze wydają się metody analizy czynnikowej. Lokalnie kierunek zmian innowacyjnych wyznacza wówczas wektor własny odpowiadający największej wariancji.

Dokładne zbadanie liniowości przetwarzania W1 \Rightarrow WO1 wymaga bezpośredniej mierzalności W1 w skali wyższego rzędu. Nie zawsze jest to możliwe, a niekiedy dla dobrego diagnozowania niepotrzebne.

Można mówić o:

- niezmienności kierunku ZI
- niezmienności zróżnicowania odwzorowań kolejnych klas stanu
- inwariantności, $c \cong c_0$ względem zmian W1, W3, stąd $\mathbf{B}(\xi_k) = \text{const}$ w pewnym obszarze Ξ_0 .

Wówczas funkcja dyskryminująca φ , rozdzielająca 1 · odwzorowania klas W1 jest linią prostą (por rys 2 II.)

Nieliniowość może dotyczyć operacji kodowania W1. Przykładem są tu modulacje nieinformacyjnych sygnałów drganiowych maszyny [8]. Wówczas estymacje ξ powinna poprzedzać wstępna filtracja, lub demodulacja sygnałów mierzonych.

4. SELEKCJA INNOWACYJNYCH WSPÓLRZĘDNYCH WEKTORA ξ

4.1 Wskaźnik optymalizacji

Dla przypadków adekwatnych modelowi Det-Pro, macierze B są zazwyczaj źle uwarunkowane, $\text{cond}B \gg 1$, co jest wynikiem dobrego, (ale nie dla celów diagnozowania) odwzorowania zmian W2.

Obecne techniki i możliwości obliczeniowe pozwalają pominąć niekorzystny wpływ złego uwarunkowania B na uchyb estymacji kierunku c . Można natomiast wykorzystać $\text{cond}B$ dla selekcji współrzędnych ξ , przyjmując:

$$q_2 = \frac{1}{\text{cond}B} \quad (9)$$

jako wskaźnik dopasowania odwzorowania eksperymentu do odwzorowania W1

Addytywność informacji wnoszonych przez poszczególne obserwacje ξ_k stanowi cenna własność wskaźnika q_1 , która pozwala oszacować informacyjną cenność pojedynczej współrzędnej ' ξ_j ' poprzez przyrost q , jaki jej udział powoduje. Jest natomiast q_1 niemalejącą funkcją wymiaru wektora ξ , co utrudnia jego bezpośrednie wykorzystanie dla selekcji optymalnego podzbioru. N współrzędnych

$$[\xi_i]_n \subset [\xi_i]_m \quad n < m \quad m = \dim(\xi)$$

Zauważmy jednak, że q_2 , jako niemalejąca funkcja $\dim(\xi)$, może posłużyć dla utworzenia wskaźnika syntetycznego

$$q = q_1 q_2 \quad (9)$$

którego maksimum dla podzbioru $[\xi_i]_n$ reprezentuje kompromis prostoty i informacyjności lokalnego odwzorowania W1 w obszarze wyznaczonym przez wektory ξ .

4.2. Algorytm selekcji ξ_i

Przyjmując zasadę, że postępowanie optymalne jest optymalne na każdym etapie można zamiast poszukiwania maksimum globalnego, zastosować metodę selekcji i dodawania pojedynczych współrzędnych, zachowując na każdym kroku podzbiory $[\xi_i]_j$, dla których ma miejsce

$$\max \Delta q_j = q(j) - q(j-1)$$

do uzyskania pierwszego maksimum wskaźnika jakości wyboru

Autor przeprowadził szczegółową analizę teoretyczną warunków efektywności procedury optymalnego wyboru opartego o wskaźnik q , w

szczegółności wymagań, odnośnie B . Należy przyjąć założenie, że dla obiektu znajdującego się w określonym momencie czasu eksploatacyjnego, lub ustalonym stanie technicznym, zmiany wartości współrzędnych wektora ξ są skorelowane głównie w wyniku zmian sterowalnych W2 [8].

Można zatem pominąć elementy niediagonalne K i rozpocząć wybór od współrzędnych Δ_1 o największej wartości q_1 .

Etapy i możliwości zastosowań opisanych algorytmów zestawia rys. 2

5. REZULTATY PRAKTYCZNE

Prezentowane przypadki dotyczą rezultatów czynnych eksperymentów identyfikacji diagnostycznej obiektów rzeczywistych. przeprowadzanych specjalnie dla badania skuteczności opisywanej metody.

5.1. Przykład I

Przedmiot badań stanowiła mała jednocylindrowa sprężarka tłokowa 410 pracująca w agregacie sprężającym.

Stan techniczny i stan eksploatacyjny ustalano wg planu eksperymentu czynnikowego rzędu 1 ograniczając się do powtórzeń dwuczynnikowych 2^2 [10].

Pary klas nastawianych własności dotyczyły:

- dla W1 prawidłowe i uszkodzone sprężyny zaworów ssącego i tłoczego;
- dla W2 obecność, lub brak tłumika szmerów ssania oraz ciśnienie w zbiorniku (rys. 3) wartości 1, lub 4 bar

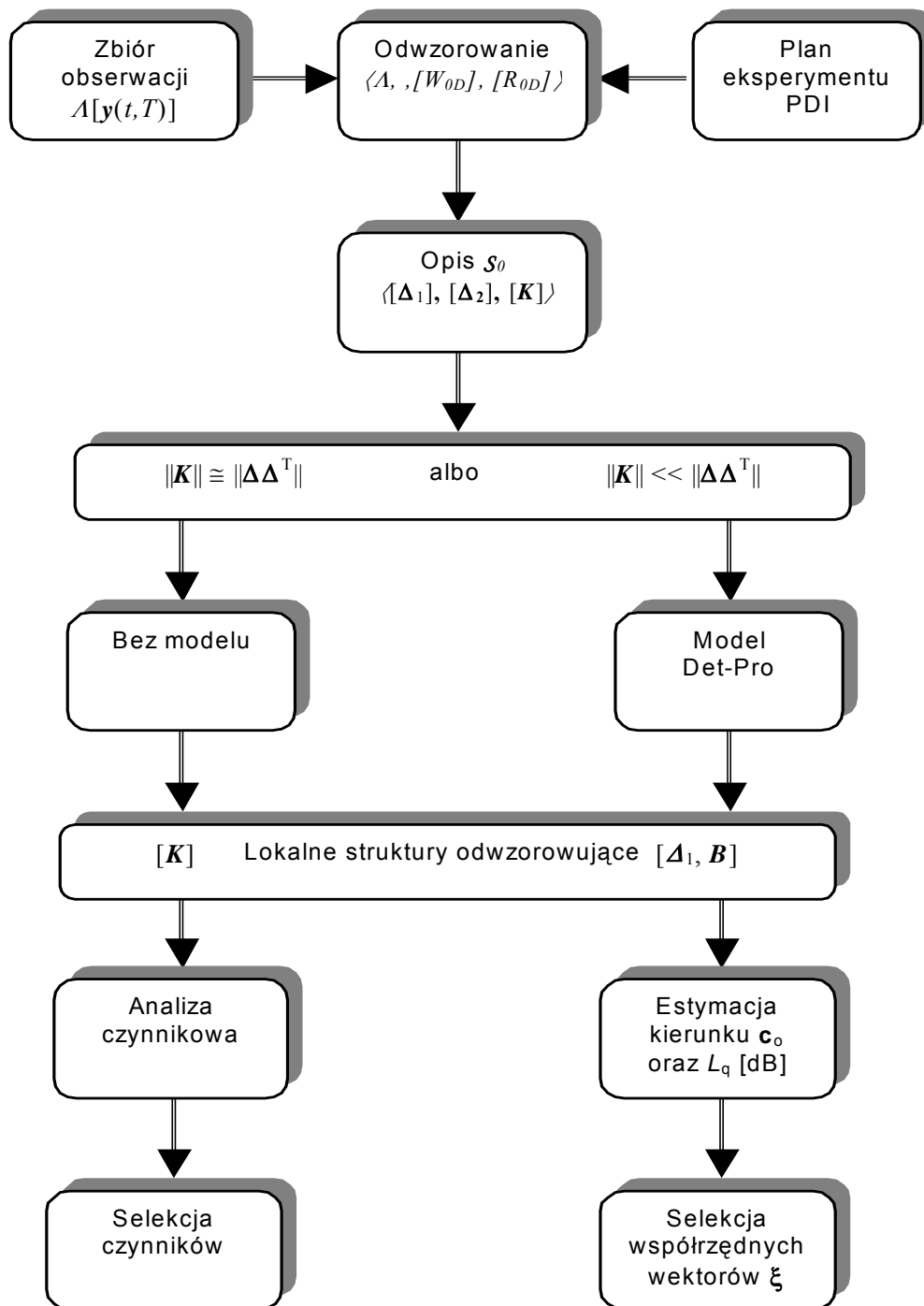
Zbiór obserwacji zawierał:

- wektory ξ widm tercjowych emitowanego hałasu, $\dim(\xi) = m = 33$;
- macierze kowariancji K dla ustalonych W1 i W2

Pomiary wykonano w pomieszczeniu o prowizorycznie wytłumionych trzech ścianach i suficie (rys. 4) tak, by mikrofon pomiarowy znalazł się w polu bezpośrednim.

Wyniki

Skuteczność eliminacji zakłócających zmian W2 była rzędu kilkudziesięciu dB. Prosta i efektywna okazała się także procedura selekcji, co ilustruje przypadek przedstawiony na rys.4. Czterokrotnej redukcji $\dim(\xi) - n = 8$, towarzyszy jedynie 30% spadek wartości q_1 . Pozostałe rezultaty są na ogół podobne [5].



Rys.2. Etapy procedury badania i oceny odwzorowań lokalnych PDI

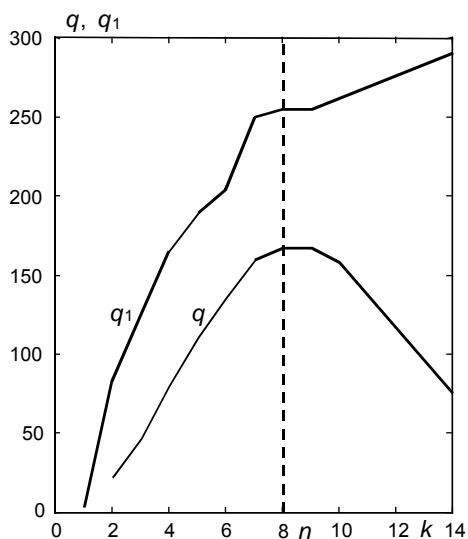
5.2. Przykład II

Podstawowym celem badań było tu ilościowe porównanie zróżnicowania odwzorowań lokalnych W1 w kierunku innowacji dla różnych charakterystyk sygnału mierzonego. Wykorzystano zbiór pomiarów prędkości drgań y małej przekładni uzyskany w czynnym eksperymencie czynnikowym 2^3 . W opisie powtórzeń ułamkowych 'oznaczono:

- dla W1 $m_1 = 1$, s_1 (stan zdatny) \Rightarrow s_2 (stan niezdatny);

- dla W2 $m_2 = 2$, zmianę prędkości obrotowej – $n_1 \Leftrightarrow n_2$; zmianę obciążenia – $o_1 \Leftrightarrow o_2$
Wektor ξ stanowiły modele AR rzędu $p = 33$ dla trzech kategorii sygnałów uzyskanych na bazie y . Były to:

1. y_F – reprezentacja y odfiltrowana w paśmie $F = [0,8\text{fz}, 1,25\text{fz}]$;
2. x – rezultat demodulacji kąta, $x = \text{Arg}(y_F)$;
3. x_d – realizacja x decymowana w stosunku 1:10.



Rys. 3. Przykład selekcji $\max(q)$ dla zbioru $n = 8$ współrzędnych ξ ,



Rys. 4. Stanowisko pomiarowe

Wyniki

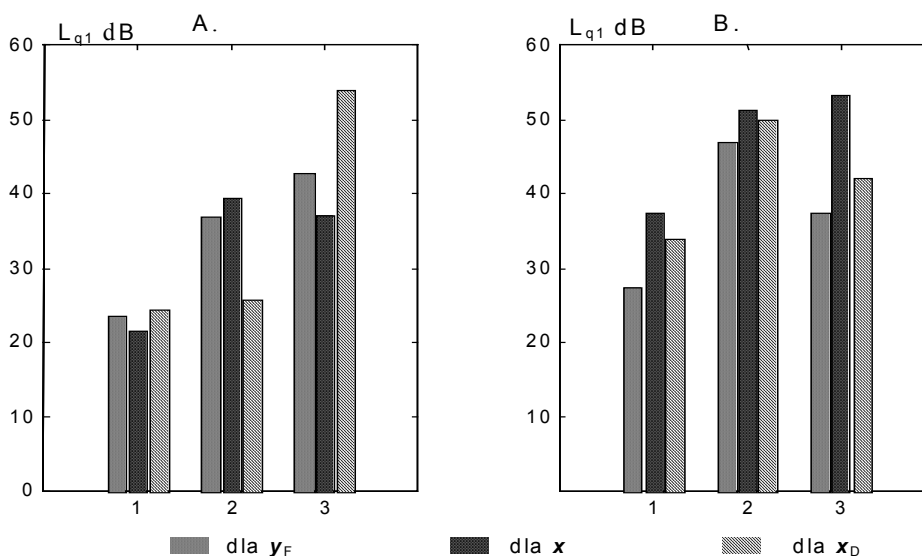
Przykłady oceny wpływu zmian obciążenia (A) oraz obrotów (B) na odwzorowanie W1 w kierunku innowacji dla sygnałów y_F , x , oraz x_D zestawia rys 5. Dla większej przejrzystości q_1 reprezentują poziomy L_{12}, L_1, L_2 :

- $L_{12} = 10\log(q_{12})$, dla $\Delta_1 \neq 0$ i $\Delta_2 \neq 0$;
- $L_1 = 10\log(q_1)$, dla $\Delta_1 \neq 0$ i $\Delta_2 = 0$;
- $L_2 = 10\log(q_2)$, dla $\Delta_1 = 0$ i $\Delta_2 \neq 0$

Miarodajne dla oceny doświadczeń ułamkowych 2^2 są wartości L_{12} . Duże wartości

L_1 weryfikują quasi-deterministyczny model odwzorowania.

Jak wskazuje rys. 8, wskaźnik q_1 okazał się precyzyjnym narzędziem porównywania przydatności różnych (a przynajmniej użytych) reprezentacji sygnału drgań. W większości przypadków ilościowa ocena stopnia innowacji niekoniecznie odpowiada wizualnemu zróżnicowaniu reprezentacji sygnału y , to ona jednak decyduje o jakości odwzorowania ZI.



Rys. 5. Wartości poziomów L_{q1} w kierunku innowacji dla prędkości drgań przekładni. Powtórzenia: **A.** ze zmianą prędkości obrotowej; **B.** ze zmianą obciążenia;
 1. L_{12} dla $\Delta_1 \neq 0$ i $\Delta_2 \neq 0$;
 2. L_1 dla $\Delta_1 \neq 0$ i $\Delta_2 = 0$;
 3. L_2 dla $\Delta_1 = 0$ i $\Delta_2 \neq 0$;

6. WNIOSKI

- Charakterystyka odwzorowania powinna być związana z procedurą estymacji ch-ki odwzorowującej (struktury) zapewniającej realnie osiągnięcie $SNR = q_{12}$, stanowi wówczas wskaźnik efektywności tej procedury, a jeśli jest metryką – miarę
- Kierunek innowacji c oraz wskaźniki q stanowią przede wszystkim dość precyzyjne narzędzie porównywania odwzorowań lokalnych diagnozowanych własności. w eksperymentach ich identyfikacji. Stąd
- Uogólniona macierz kowariancji wydaje się dobrą reprezentacją zmienności zakłócających związanych ze zmiennymi warunkami pracy obiektu, te ostatnie bowiem decydują o kierunku innowacji dla kategorii obiektów, których dotyczy metoda.
- Opis (c, q_1) poprzez zmianę w przestrzeni odwzorowania, lub czasie eksploatacyjnym, pozwala ocenić ilościowo wpływ zmiennych warunków pracy oraz nieliniowość odwzorowania i zredukować ich zakłócające działanie.
- W badanych przypadkach wykorzystanie składowej odwzorowania w kierunku innowacji powodowało wzrost SNR o 20 ÷ 50 dB.

7. LITERATURA

- [1]. Candy. J. V.: *Signal Processing, the Modern Approach*. London, Mc Graw-Hill, 1988
- [2]. Cempel C., Tomaszewski F.: *Diagnostyka maszyn, zasady ogólne*,
- [3]. Haykin S.: *Adaptive Filter Theory*. London Prentice-Hall, 1996.
- [4]. Jaworski H.: *Matematyczne podstawy metrologii*. W-wa, WNT, 1979
- [5]. Kaufman A.: *Introduction a la theorie des sous-ensembles flous*. Paris, Masson, vol.3, 1975
- [6]. Krzyworzecka P.: *Optymalizacja przetwarzania złożonego sygnału diagnostycznego*. Kraków, Wyd. Elektr. i Mech. Gór. AGH, rozp. dokt., 1972.
- [7]. Krzyworzecka P.: *Uwagi o charakterystykach odwzorowania istotnych własności obiektu diagnostyki*. W-wa, Met. Cyfr. Analiz. Sygn., PAN, Oss. 1979, 293 – 323
- [8]. Krzyworzecka P.: *Synchroniczne wspomaganie odwzorowań*

diagnostycznych. Kraków. Mon. AGH, n. 103, 2001

- [9]. Malina W., Sobczak W.: *Metody selekcji informacji*. W-wa, WNT, 1973
- [10]. Mańczak K.: *Planowanie eksperymentu*. W-wa, WNT, 1976
- [11]. Sadowski W.: *Podstawy ogólnej teorii systemów*. W-wa, PWN, 1977

8. WAŻNIEJSZE OZNACZENIA
I SKRÓTY

- B – uogólniona macierz kowariancji
- c_0 – wektor kierunku innowacji
- q_1 – wskaźnik zróżnicowania odwzorowania W_1 w kierunku innowacji
- q_2 – wskaźnik dopasowania do estymatora c
- Ξ – obszar odwzorowania (zmian ξ)
- Δ_k – wektor lokalnego odwzorowania W_k
- ξ – wektor obserwacji, charakterystyka y
- K – macierz kowariancji ξ
- A – zbiór obserwacji y
- x – sygnał wartościowy
- y – sygnał mierzony
- T – przedział t czasu obserwacji
- t – czas dynamiczny
- T – przedział obserwacji sygnału
- \mathcal{G} – czas eksploatacyjny
- w – wektor wag filtru adaptacyjnego
- W – własność ogólna mierzalna
- WS – własność szczególna, kategoria W
- DPR – dynamiczny proces resztkowy
- MN – model nominalny obiektu
- PDI – procedura identyfikacji diagnostycznej,
- PE – plan eksperymentu PDI
- SNR – *Signal to noise ratio*
- ZI – zmienność innowacyjna

Pracę zrealizowano w ramach projektu KBN nr 4 T07B 05426



Dr hab. inż. Piotr Krzyworzecka studiował na Wydziale Elektrotechniki AGH uzyskując dyplom magistra inżyniera elektryka o specjalności automatyka. Pracuje na tejże uczelni do dziś, początkowo w Katedrze Maszyn i Pomiarów Elektrycznych, potem (od 1987) w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki. Jest autorem ok. 80 publikacji, głównie o tematyce diagnostycznej, rzeczoznawcą SEP w zakresie elektroakustyki, sekretarzem Polskiej Sekcji Audio Engineering Society, a także członkiem PTDT od momentu jego powstania.

DEMODULACJA DRGAŃ MASZYN PRZY ZMIANACH PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ

Piotr KRZYWORZEKA

Katedra mechaniki i Wibroakustyki AGH, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, krzyworz@agh.edu.pl

Streszczenie

Jak wewnętrzna skala czasu wpływa na działanie demodulatora kąta?. Czy liniowa aproksymacja monotonicznych zmian cyklu nośnego może poprawić odtwarzanie nieznanego niskoenergetycznego sygnału modulującego obserwowalne procesy drganiowe maszyny? Autor podejmuje próbę odpowiedzi wykorzystując jako demodulator pętlę synchronizacji fazy PLL. Badania symulacyjne przeprowadzane dla założonego modelu fazy wskazują potencjalnie duże możliwości rozpoznania i selekcji składowej informacyjnej. Przynajmniej, jeśli chodzi o wartość skuteczną i harmonikę prędkości obrotowej, obciążenia estymat wyjściowych okazują się akceptowalne.

Słowa kluczowe: diagnostyka, decymacja, demodulacja, synchronizm.

MACHINE VIBRATIONS DEMODULATION – CASE OF VARIABLE ROTATION SPEED

Summary

Taking into account some particularities of machine modulation the paper is concerned with the possibility of Phase-locked Loop (PLL) output biasing elimination. Especially rotating speed fluctuations or trend can affect demodulation procedure. Proposed time scale transformation aims to reduce demodulation error due to monotonic trend of carrier frequency. VCO clock is now controlled by short time mean cycle of reference rotation speed, supposed carrier. Some simulated examples are discussed.

Key words: diagnostics, decimation, demodulation, synchronism.

1. ZEGARY UŻYTECZNE

Nie ma jednego czasu

Lokalne i globalne skale czasu wyznaczane są przez ciągi zdarzeń referencyjnych – zegary \oplus . Rola zegara, to generowanie zdarzeń porządkujących, organizujących inne ciągi zdarzeń. Regularny i nieregularny bieg czasu zależy od wyboru zegara, stąd celowym bywa poszukiwanie zegara reprezentatywnego dla pewnego podzbioru zdarzeń np. procesu wibroakustycznego zawierającego informacje diagnostycznie cenną.

Celowość zmiany

Skala czasu, w której:

- opis zmienności staje się prostszy,
- zachowane są istotne cechy zmienności informacyjnej,
- zmienność nieinformacyjna ulega redukcji,

może ułatwiać diagnozowanie w zmiennych warunkach pracy. Może, ale nie musi. W każdym przypadku coś się zyskuje i coś traci. Stopień złożoności realizacji praktycznej, wrażliwość metody na wybór odpowiednich parametrów konwersji, elastyczność w dopasowaniu do obiektu – wreszcie określenie, co w danym przypadku jest poszukiwana zmiennością informacyjną,

rozstrzygną o użyteczności proponowanej skali czasu.

2. CZAS CYKLU

Rozważymy obiekty, w których ma miejsce powtarzanie oddziaływań elementów, lub mediów w ruchu. Sekwencja wybranego ciągu zdarzeń realizacji celu podstawowego [4, 6], powtarza się w interwałach czasowych określanych mianem cyklu chwilowego Θ_k . Kolejne realizacje Θ_k nie są identyczne nawet w dobrym stanie technicznym i ustalonych warunkach pracy maszyny, (stąd ruch cykliczny nie stanowi tu synonimu okresowego).

Ruch cykliczny stwarza interesującą możliwość wyróżnienia oprócz upływających według rytmu zegara uniwersalnego czasów eksploatacyjnego \mathcal{S} i dynamicznego t , różniących się jedynie mnożnikiem skali, także trzeciej kategorii – skali czasu względnego ‘.’, którego rytm wyznacza cykl Θ – interwał czasowy kolejnych sekwencji. [8] Łączy go z czasem dynamicznym t zależność aproksymowana formułą (1).

$$\eta = n - 1 + \frac{t - \sum_{j=1}^{n-1} \Theta_j}{\Theta_n} \quad (1)$$

Dla przedziału T 03, 2001 obejmującego $1, \dots, n, \dots, M$ cykli: $\eta \in [0, mM]$, $t \in [0, T]$, m – ilość rozróżnialnych momentów cyklu.

Zastąpienie w formule transformacji (1) cyklu chwilowego Θ przez jego charakterystykę $\varphi_k(\Theta)$ może ułatwić adaptację skali 'η' dla danej kategorii metod odtwarzania zmienności wartościowej (por. rys. 3.. b. i c.). Zależność (1) przyjmuje wówczas postać (2)

$$\eta = n - 1 + \frac{t - \sum_{k=1}^{n-1} \varphi_k(\Theta)}{\varphi_k(\Theta)} \quad (2)$$

Jeśli $\varphi_k(\Theta)$ reprezentuje operacje uśredniania, ma miejsce aproksymacja skali cyklu chwilowego, realizująca:

- dla uśredniania przedziałowego przybliżenie łamaną;
- dla średniej ruchomej wygładzanie.

Zasadę tworzenia skali 'η(Θ)' z aproksymacją liniową w obrębie Θ_k przedstawia rys.1.

Warto zauważyć, że liczba obserwowalnych momentów η jest w praktyce skończona. Jej

zwiększanie, nie zawsze uzasadnione rzeczywistością potrzebą, utrudnia pomiar i przetwarzanie jego wyników. Potwierdzają to m.in. eksperymenty autora [8].

Zatem rozważanie ciągłej natury η droga interpolacji nie wydaje się celowe, choć teoretycznie możliwe, jeśli cykl chwilowy, lub jego charakterystykę φ opisuje funkcja Γ(t) ciągła w przedziale obserwacji T zgodnie z równaniem (3)

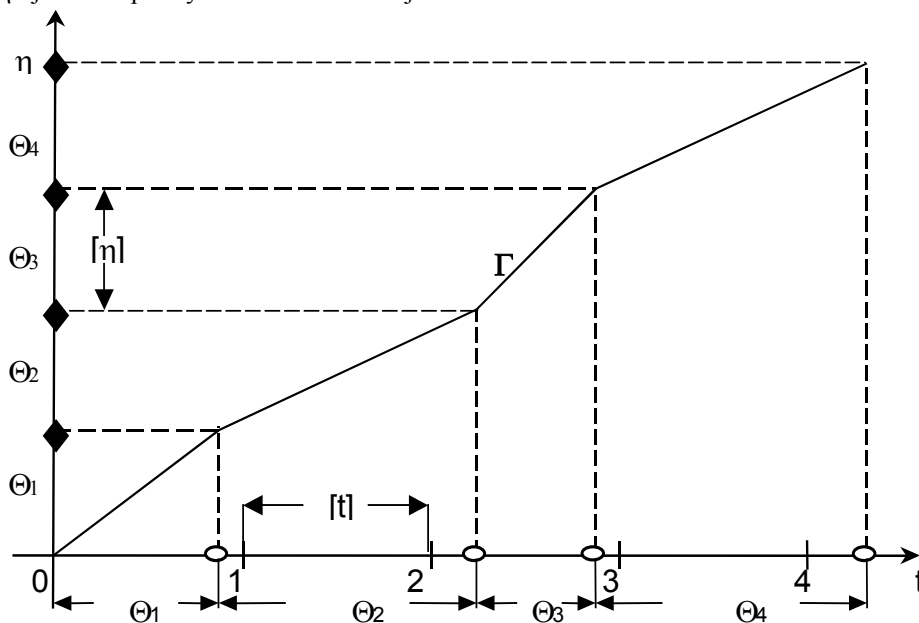
$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{1}{\Gamma(t)} \quad (3)$$

Zasadę tworzenia skali 'η(Θ)' z aproksymacją liniową w obrębie Θ_k przedstawia rys.1.

Na osi rzędnych równe interwały odpowiadające charakterystykom $\varphi_k(\Theta)$ stają się referencyjne dla zegara 'η' odpowiadając np. jego „sekundom” bądź ick wielokrotnościom.

Krzywa konwersji Γ może być w przedziale T sklejka funkcji φ_k (na rys. 2.1. łamaną). Jeśli:

$$\varphi_k(\Theta) = \varphi(\Theta) \text{ dla każdego } k, \text{ to } \varphi = \Gamma$$



Rys. 1. Graficzna interpretacja konwersji skali czasu 't' => 'η'

Warte zainteresowania okazują się dwa przypadki:

Gdy $\varphi(\Theta)$ odpowiada cyklowi chwilowemu Θ , opis sygnału w dziedzinie częstotliwości przedstawia widmo rzędów wykorzystywane również w diagnozowaniu [12].

Widma rzędów cechuje dobra rozdzielczość i dynamika. Ich estymacja natomiast wymaga złożonych obliczeń i precyzyjnego pomiaru fazy (położenia) [ibidem]. Ponadto w tak zdefiniowanej skali 'η' tracona jest informacja o fluktuacjach cyklu, które mogą być wynikiem modulacji drgań

przez dynamiczne procesy resztkowe, cenne źródło wczesnej informacji diagnostycznej.

Niedogodności powyższej pozwala w wielu przypadkach uniknąć liniowa aproksymacja monotonicznych zmian cyklu. Wówczas w przedziale T:

$$\varphi(t) = \Theta_{ref} \left(1 + \frac{\Delta_{\Theta}}{\Theta_{ref}} t \right). \quad (4)$$

3. DEMODULACJA KĄTA DRGAŃ MASZYN CYKLICZNYCH

3.1. Trudności

Wiele badań szczegółowych [1,2,3] wskazuje na występowanie modulacji kąta i jej impulsowej wersji PPM już we wczesnych stadiach ewolucji uszkodzeń, natomiast dopiero zaawansowane zużycie (np. ciernie i luz dla przekładni) dają zauważalny ogólny wzrost mocy widma całego sygnału drgań [10]. Nie wnikając w szczegóły, w każdym przypadku rezultaty demodulacji mogą stanowić wiarygodną bazę oceny stanu technicznego 4), jedynie wówczas, jeśli jej procedura PDSM będzie estymatorem nieobciążonym] i to w różnych stanach eksploatacyjnych.

Jednakże, jeśli prędkość obrotowa, a zatem i częstotliwość nośna nie są stałe, nieskuteczne okazują się metody demodulacji kąta opracowane i optymalizowane dla sygnałów nośnych określonej formy i stałej częstotliwości. Źródeł obciążenia należy szukać w odtwarzaniu niewłaściwych składowych fazy chwilowej – $\text{Arg}[y(t)]$.

3.2. Pętla synchronizacji fazy PLL

Potencjalnie duże możliwości adaptacji do specyficznych wymagań PDSM prezentuje układ śledzący fazę (*Tracking filter*), znany jako pętla synchronizacji fazy PLL, powszechnie od lat stosowany w telekomunikacji i technice pomiarowej przede wszystkim dla różnego rodzaju demodulacji *on-line*. Pomijając obszernie opisywaną zasadę działania układu PLL i analizę jego dynamiki [1,3,9,13] warto rozważyć wpływ sposobu odtwarzania przez podukład zwany tradycyjnie VCO, chwilowej fazy sygnału y (por. rys. 2).

3.3. Model fazy maszynowej modulacji kąta

Spróbujmy rozważyć, jakie warunki powinna spełniać transformacja skali czasu dynamicznego by na wyjściu dominowała zmienność informacyjna?. Otóż o poprawności interpretacji

rezultatów demodulacji oprócz metody decyduje przyjęty model fazy sygnału y .

Rzeczywisty MSDM jest ciągiem niepowtarzalnych impulsów o zmodulowanym położeniu [1,3]. Model PPM [1,10] wskazuje na odtwarzanie przez modulację kąta każdej ze składowych harmoniki ciągu impulsów. Dalsze rozważania dotyczyć, zatem będą fazy chwilowej składowej harmonicznej PPM, z reguły pierwszej.

Właściwe modelowanie dotyczy, zatem samej fazy, w której należy generalnie wyróżnić cztery składowe (5) o różnej jakościowo zmienności i odmiennej, choć nie zawsze jednoznacznej interpretacji:

$$\text{Arg}[Y(jt)] = \Phi(t) = \Phi_C(t) + \Phi_X(t) + \Phi_F(t) + \Phi_T(t) \quad (5)$$

gdzie:

1. $\Phi_C(t)$ – faza sygnału nośnego przy ustalonym cyklu Θ_C ;
2. $\Phi_T(t)$ – rezultat monotonicznej zmiany cyklu nośnego;
3. $\Phi_X(t)$ – składowa informacyjna, tu odtworzenie zmienności, DPR;
4. $\Phi_F(t)$ – nieinformacyjne fluktuacje związane ze stanem eksploatacyjnym.

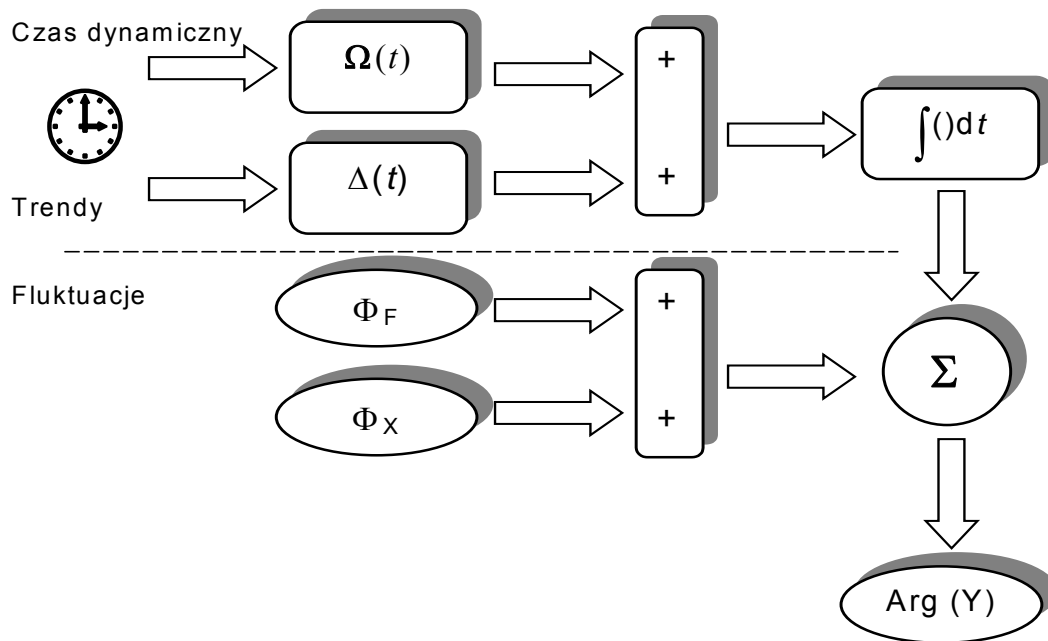
Jak je odróżnić i rozróżnić? Które stanowią zakłócenie utrudniające diagnozowanie? Jak ograniczyć działanie zakłócające skuteczne odtworzenie fazy informacyjnej, bezpośrednio nieobserwowalnej?

W perspektywie czasu dynamicznego postępy procesów zużycia nie są na ogół mierzalne, zatem monotoniczny wypadkowy trend fazy $\Phi_C + \Phi_T$ można przypisać nieinformacyjnej zmianie częstości nośnej.

Pętla synchronizacji fazy umożliwia aproksymację rzeczywistej fazy nośnej niestacjonarnego sygnału y (np. przy zmiennej prędkości obrotowej) Działanie takie sprowadza demodulację do usunięcia wypadkowego nieliniowego trendu fazy $\Phi_C + \Phi_T$. Można je interpretować jako wynik transformacji skali czasu doprowadzającej proces nośny do stacjonarności w sensie stałości cyklu – $\Theta_C = \text{const}$.

Rozróżnienie fluktuacji Φ_X od Φ_F wymaga potraktowania indywidualnego. Wierne odtwarzanie $\Phi_X(t)$ nie zawsze jest konieczne i możliwe brak, bowiem referencji kształtu, a także przesłanek powtarzalności kolejnych realizacji, ze względu na losową naturę procesu DPR [3].

Reasumując, bazę użytecznej transformacji skali czasu 't' \Rightarrow 'η' powinien stanowić cykl nośny Θ_C . Niestety w ogólnym przypadku nie istnieje postać drgań generowana specjalnie w tym celu. Drganiaowy sygnał nośny y_0 nie musi być tożsamy z kinematycznym, dynamicznym, lub innym elementem realizacji celu podstawowego maszyny.



Rys 2. Odtwarzanie fazy chwilowej w układzie PLL

3.4. Aproksymacja krótkoterminowych trendów Θ_c

W zastosowaniach praktycznych liniowy trend cyklu występuje rzadko, służy natomiast skutecznie jako model aproksymujący monotoniczną zmianę $\Delta\Theta_c$ w przedziale obserwacji T [1,3,4].

Testowaną alternatywę stanowi wykorzystanie średniej przedziałowej cyklu chwilowego dla liniowej aproksymacji zmian częstości nośnej przedziałami monotonicznymi. (4), także rys. 3.c. Linia konwersji jest łamaną jak na rys. 1.

Rozwiązanie takie wiąże się z ryzykiem tworzenia fluktuacji pasożytniczych deformujących oryginalną PPM, (co w przypadku wąskopasmowego sygnału nośnego odpowiada fazie Φ_F).

Dla wstępnego rozróżnienia składowych Φ można rozważyć selekcję częstotliwościową przynajmniej części udziału DPR (por. rys. 4, pasmo F_X).

Do redukcji trendu Ω_c prowadzić też może transformacja skali czasu ' t ' \Rightarrow ' \mathcal{G} ' poprzez proporcjonalną selekcję próbek, jaką oferuje. znana w literaturze procedura liniowej decymacji – PLD.[1, 4, 6].

Obszar wspólny F_F i F_X powinien być minimalizowany przez właściwy dobór bazowej charakterystyki cyklu, [3] Jeśli filtr pasmowy okaże się mało skuteczny trzeba poszukać innych czynników różnicujących. W rezultacie jako pasmo symptomatyczne demodulacji należy uznać takie,

w którym dominuje zmienność wywołana zmianą stanu technicznego a nie stanu eksploatacyjnego.

4. BADANIA SYMULACYJNE

4.1. Cel i zakres

Proponowany model argumentu zmodulowanego sygnału drgań (3) pozwala prześledzić przetwarzanie składowych fazy w procesie demodulacji i ocenić wstępnie trafność kryteriów podziału, i możliwości selekcji fazy uznanej za informacyjną.

Badana obejmowały:

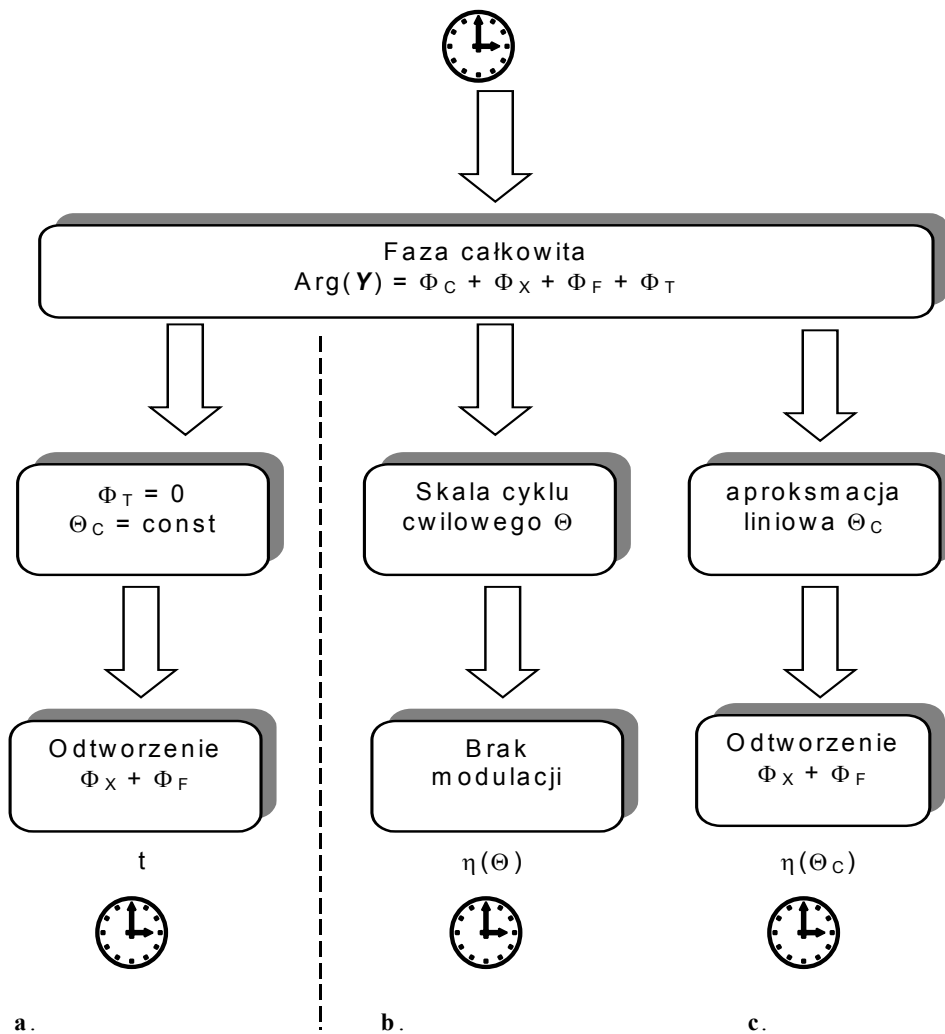
- adaptacje i dostrojenie modelowego demodulatora PLL;
- zakres i skuteczność aproksymacji cyklu nośnego;
- wpływ rodzaju sygnału modulującego.

Jako ilościowe kryterium oceny przyjęto błąd względny odtworzenia wartości skutecznej sygnału modulującego – x . Dla fali prostokątnej porównywano także odtworzenie pierwszych siedmiu harmonicznych widm RMS przez sygnał wyjściowy PLL – x_p oraz po filtracji pasmowej – x_{pf} .

Alternatywna metoda demodulacji wykorzystująca argument sygnału analitycznego

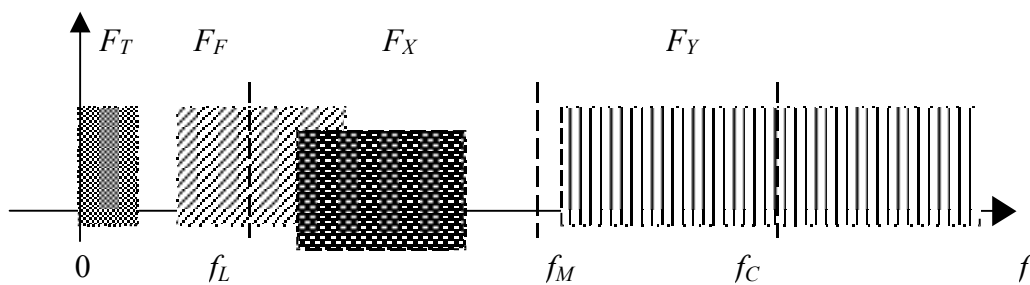
$$x_h = \text{detrend}\{\text{Arg}\{Y(t)\}\}$$

okazała się w danym obszarze badań nieprzydatna.



Rys. 3. Możliwości demodulacji kąta sygnału drgań w zależności od skali czasu odtworzonej nośnej:

- a) skala czasu dynamicznego 't',
- b) skala czasu rzędów, lub cyklu chwilowego,
- c) aproksymacja o stałym przyroście cyklu



Rys. 4. Modulacja fazy – zakresy częstotliwości sygnałów przy wąskopasmowej fali nośnej
 F_T – trend częstotliwości obrotowej (i nośnej $\Rightarrow f_c$) w przedziale T ,
 F_F – pasmo częstotliwości odpowiadające zakłócającym fluktuacjom fazy Φ_F ,
 F_X – pasmo częstotliwości sygnału modulującego Φ_X ,
 F_Y – pasmo częstotliwości modulacji (maksymalne użyteczne)

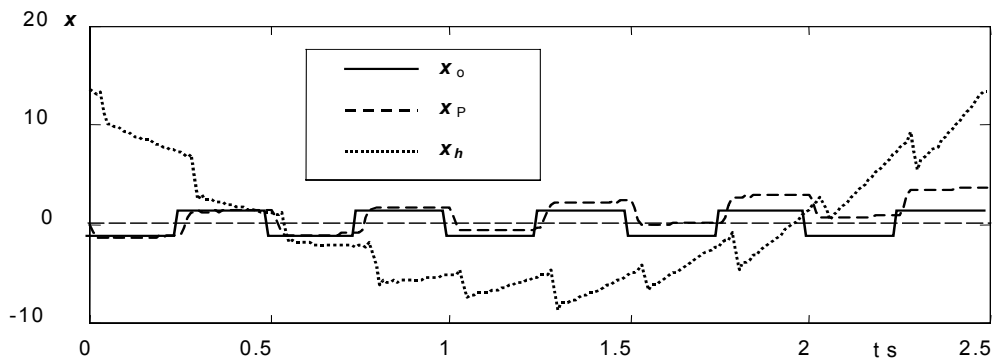
4.2. Przykłady

Przy wybiegu, lub rozbiegu maszyny zmiany prędkości obrotowej przybliża krzywa wykładniczą, a w mniejszym przedziale czasu odcinek prostej. W obu przypadkach aproksymacja liniowym przyrostem cyklu nie będzie dokładna. Czy jednak okaże się zadowalająca?

Rozważmy dwa przypadki:

1. aproksymacji liniowego przyrostu częstości nośnej o 10% liniowym spadkiem cyklu nośnego Θ_C .

$$\Omega_C(t) = \Omega_{CO} \left(1 + b \frac{t}{t_M} \right) \Rightarrow \frac{\Omega_{VCO}}{1 - \frac{t}{ct_M}}$$



Rys. 5. Wpływ modulatora na odtwarzanie x_o – liniowy wzrost częstości nośnej

Dla przyjętego przedziału aproksymacji demodulacja PLL okazuje się znacznie obciążona w obu przypadkach (rys. 6.c i rys.7.c) przez fluktuacje wywołane różnicą zmienności rzeczywistego i odtworzonego cyklu nośnego. Nie dyskwalifikuje to jednak ani metody, ani wyniku.

W modulacjach niezamierzonych postać sygnału modulującego nie jest na ogół znana dokładnie. Dotyczy to także ewolucji kształtu. Symptomatyczne okazują się zmiany charakterystyk statystycznych pojedynczych impulsów np. skoszenia, lub kurtozy [2].

Otóż na rys. kształt fali prostokątnej odtworzony został poprawnie. Podobnie widmo

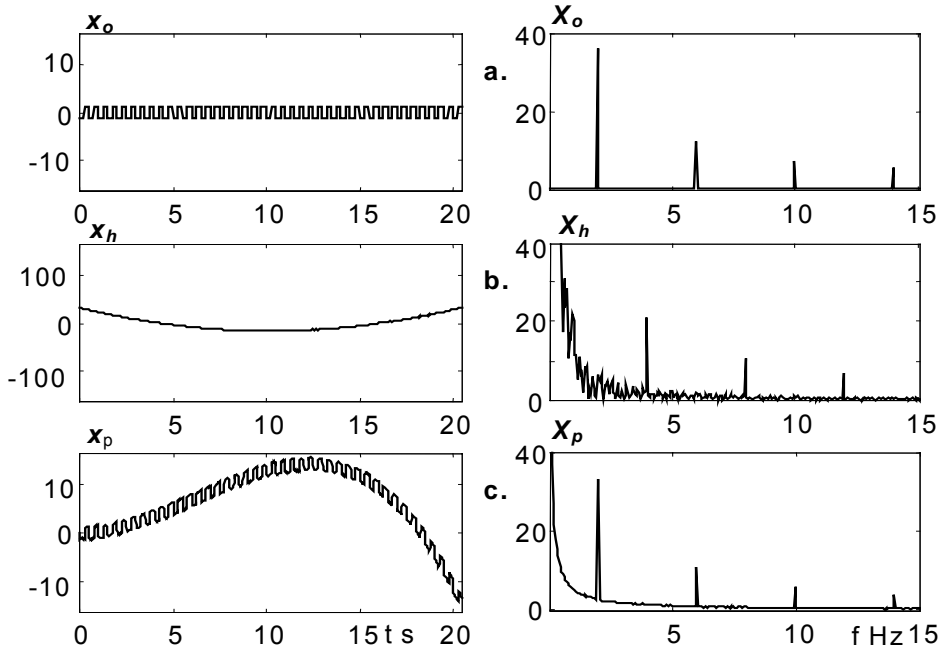
2. aproksymacji wykładniczego spadku częstości nośnej o 10% liniowym spadkiem cyklu nośnego Θ_C .

$$\Omega_C(t) = \Omega_{CO} \left[1 - \exp\left(-a \frac{t}{t_M}\right) \right] \Rightarrow \frac{\Omega_{VCO}}{1 + \frac{t}{ct_M}}$$

W obu przypadkach zmiana skali czasu eliminuje jedynie liniowo-odcinkową zmianę cyklu nośnego. Jej wpływ na kształt i widmo rezultatów demodulacji przedstawiają rys. 5, 6 i 7.

RMS w zakresie harmoniki 1 – 7. Wolnozmiennie fluktuacje dają się łatwo odfiltrować, co usuwa obciążenie (rys. 7. b) odtwarzając poprawnie wartość skuteczną x_o – również potencjalny nośnik zmienności innowacyjnej.

Symulacje pozwalają także wyznaczyć przedziały czasowe akceptowalnych rezultatów aproksymacji przy zadanej względnej zmianie częstości nośnej sygnału y . Powinny zatem poprzedzać każdorazowo badanie rzeczywistych sygnałów drgań, jako procedury skalujące demodulator synchroniczny.



A.

B.

Rys. 6. Rezultaty demodulacji dla liniowego przyrostu częstości nośnej

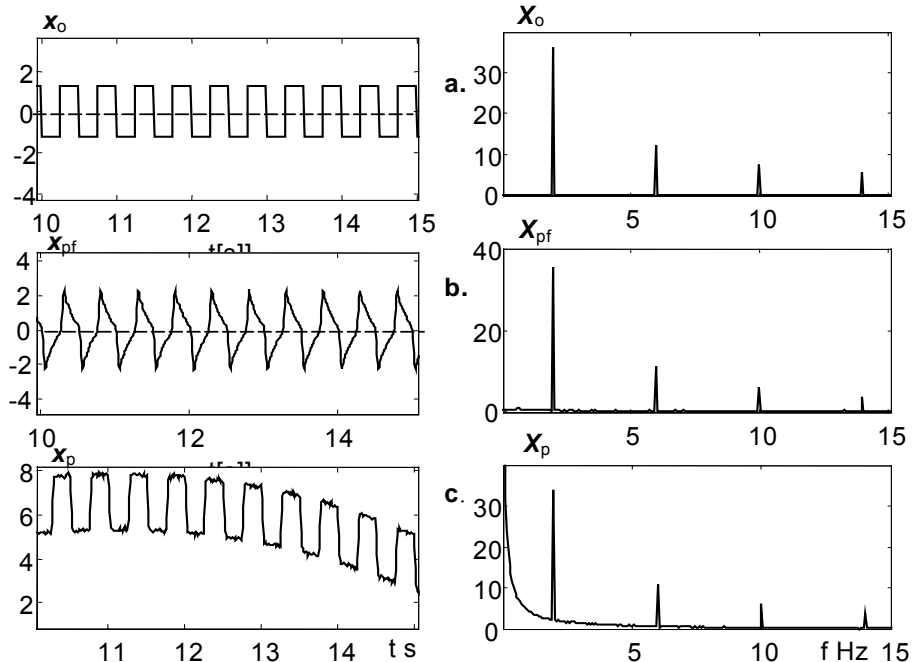
A - realizacje czasowe, B - widma RMS

a) sygnał modulujący

b) $\Phi_T + \Phi_F + \Phi_X$

c) na wyjściu PLL

$\delta x_{pf} = -4.8\%$ $\delta x_p = 634\%$



A.

B.

Rys. 7. Rezultaty demodulacji dla wykładniczego spadku częstości nośnej:

A - realizacje czasowe (fragment), B - widma RMS

a) sygnał modulujący

b) PLL i filtr pasmowy

c) na wyjściu PLL

$\delta x_{pf} = -4.85\%$ $\delta x_p = 302\%$

5. UWAGI I WNIOSKI

- Wybór skali czasu pozwala akcentować pewne cechy zmienności i redukować inne.
- Wskaznikiem stopnia dopasowania skali czasu generatora PLL do rzeczywistego cyklu nośnego jest podobieństwo pewnych cech jakościowych i ilościowych (tu kształtu i wartości skutecznej kształtu i wartości skutecznej modelowego i odtworzonego sygnału Φ_x).
- Odtwarzając sygnał nośny o stałym przyroście cyklu jednoczesne spełnienie obu warunków nie zawsze okazało się możliwe.
- W przypadku nieokreśloności lub nieznanowości a priori kształtu fazy informacyjnej bardziej przydatne mogą okazać się jej uśredniane charakterystyki energetyczne RMS, PSD, SNR.
- W doborze skali czasu odtwarzania nośnej celowy wydaje się kompromis, tak by możliwie szybka i stabilna procedura demodulacji odtwarzała wybrane cechy zmienności i informacyjnej z niezbędną dokładnością.
- Rozróżnienie informacyjnych i zakłócających fluktuacji fazy nie zawsze jest możliwe drogą prostej filtracji pasmowej.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1]. Adamczyk J., Krzyworzecka P., Łopacz H.: Systemy synchronicznego przetwarzania sygnałów diagnostycznych. Kraków, Collegium Columbianum, 1999
- [2]. Bigret R., Feron J. L.: *Diagnostic – maintenance disponibilite des machines tournantes*. Paris, Masson, 1995
- [3]. Cioch W., Krzyworzecka P.,: *Modulacje niezamierzone w diagnozowaniu głośnika*. Diagnostyka, vol. 28, 2003, 29 – 36
- [4]. Cioch W., Krzyworzecka P.,: *Dynamiczna kompensacja wpływu zmian długości cyklu na sygnał drganiowy*. Mat XXVII Sympozjum Diagnostyka Maszyn, z. 1, 1999, 55 – 68
- [5]. Krzyworzecka P.: *Application of phase locked loop circuit to on-line phase demodulation of Narrow-band Diagnostic Signal*. W-wa, Machine Dynamics Probl. n. 2, 1999, 55 – 68
- [6]. Krzyworzecka P.: Synchroniczne wspomaganie odwzorowań diagnostycznych. Kraków. Mon. AGH, n. 103, 2001
- [7]. Kudrewicz J.: Dynamika pętli fazowej. W-wa, WNT, 1991.
- [8]. Radkowski St.: Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych: W-wa, Radom, WITE, 2002
- [9]. Sobkowski J.: Częstotliwościowa analiza sygnałów. W-wa, Wyd. MON, 1975

- [10]. Piotrowski A., Stankiewicz A., Balunowski J., Solbut A.: *Diagnostics symptoms forming in the rotating machine monitoring based on the order tracking analysis*. II International Congress of Technical Diagnostics, Diagnostyka'2000, Poland, Warsaw 19-22 September 2000.
- [11]. Trees van H.L.: *Detection, Estimation and Modulation Theory v. 2*. N.Y., John Wiley, 1974.

7. WAŻNIEJSZE OZNACZENIA I SKRÓTY

- DFM – demodulacja częstotliwości
 DPM – demodulacja fazy
 DPR – dynamiczny proces resztkowy
 PDSM – procedura demodulacji sygnału maszyny
 PLL – *Phase-locked loop*, pętla synchronizacji fazy
 PPM – *Pulse-Position Modulation*, modulacja położenia impulsów
 SNR – *Signal to noise ratio*, stosunek mocy sygnału I szumu
 VCO – Voltage controlled oscillator, generator sterowany napięciem

- δ – błąd względny
 Φ_C – faza nośna
 Φ_x – faza wartościowa
 Φ_F – faza fluktuacji
 Φ_T – faza trendu
 Ω_C – częstość nośna
 Θ_C – cykl nośny
 x_0 – referencyjny sygnał modulujący
 x_2 – wysokoczęstotliwościowy sygnał wymuszenia (modulowany)
 x_p – rezultat demodulacji fazy PLL
 x_h – rezultat demodulacji fazy jako argumentu sygnału analitycznego
 y – zmodulowany sygnał drganiowy
 y_C – sygnał nośny

Pracę zrealizowano w ramach projektu KBN nr 4 T07B 05426

Informacje o Autorze na str. 20.

PRÓBA WYZNACZENIA ZALEŻNOŚCI STATYSTYCZNEJ POMIĘDZY PARAMETRAMI DIAGNOSTYCZNYMI SILNIKA POJAZDU POLONEZ, A EMISJĄ SPALIN

Wiesław PIEKARSKI, Sławomir JUŚCIŃSKI

Katedra Energetyki i Pojazdów
Akademia Rolnicza w Lublinie
ul. Głęboka 28 20 – 612 Lublin
tel. (081) 445 61 47, e-mail: wpiek@hortus.ar.lublin.pl

Mirosława WESOŁOWSKA – JANCZAREK

Katedra Zastosowań Matematyki
Akademia Rolnicza w Lublinie
ul. Akademicka 13 20 – 950 Lublin
tel. (081) 445 61 47, e-mail: janczar@ursus.ar.lublin.pl

Streszczenie

W artykule zaprezentowano badania silników, które obejmowały pomiary parametrów sygnałów diagnostycznych takich jak: ciśnienie sprężania, względny spadek ciśnienia sprężanego powietrza w cylindrach i skład spalin. Badania sygnałów diagnostycznych względnego spadku ciśnienia sprężanego powietrza w cylindrach i ciśnienia sprężania, wykonywano w dwóch próbach: bez oleju i z olejem wtryskiwanym do cylindra. Jednakże w przypadku silników wyposażonych w katalizator TWC, nie wtryskiwano oleju do cylindra ze względu na realne niebezpieczeństwo uszkodzenia katalizatora.

Słowa kluczowe: pojazd, silnik, emisja spalin, parametry diagnostyczne.

AN ATTEMPT AT THE DETERMINATION OF THE STATISTICAL INTERDEPENDENCY BETWEEN THE DIAGNOSTIC PARAMETERS OF THE POLONEZ VEHICLE ENGINE AND FUMES EMISSIONS

Summary

The article presents engine tests involving measurements of the parameters of diagnostic signals such as : compression pressure, relative drop of the compressed air pressure in the cylinders and fume contents. Tests on the diagnostic signals concerning the relative drop of the compressed air pressure in the cylinders and the compression pressure were carried out in two trials: without oil and with oil injected to the cylinder. However, in case of engines with the catalyst TWC, oil was not injected into the cylinder because of the real danger of damage to the catalyst.

Key words: vehicle, engine, fumes emissions, diagnostic parameters.

1. WPROWADZENIE

Obecnie przeżywamy przełom cywilizacyjnych epok: cywilizacji kończącej się, nazywanej przemysłową i nadchodzącej, zwanej informacyjną. W procesie przeobrażeń technologicznych, szczególne miejsce zajmują rozwój motoryzacji oraz środków transportu i systemów transportowych.

Ostatnie dziesięciolecie to okres wielkiego boomu motoryzacyjnego. Rozwój motoryzacji, choć nieunikniony, niesie ze sobą szereg zjawisk negatywnych, z których najważniejsze to

zagrożenia dla środowiska naturalnego. Rokrocznie emitowana jest do atmosfery ogromna ilość związków i pyłów, dlatego szerokie wprowadzenie diagnostyki technicznej w systemie eksploatacji pojazdów ma na celu ograniczenie do minimum emisji składników toksycznych spalin [Żółtowski, Jankowski 1999].

2. CEL I ZAKRES

Badaniami objęto 30 egzemplarzy silników pojazdu samochodowego „Polonez” 1500/1600. O takim wyborze zdecydowała dostępność

egzemplarzy w różnym stanie technicznym i eksploatowanych w różnych warunkach.

Badaniami objęto silniki o różnym przypadkowo – losowo dobranym okresie pracy. W trakcie badań przyjęto założenia minimalizujące zakłócenia analizy związku składu spalin ze zużyciem układu TPC. Przyjęto następujące warunki dla wszystkich pomiarów:

- silnik zasilany benzyną bezołowiową 95,
- szczelny układ wydechowy,
- silnik doprowadzony do stanu równowagi cieplnej, temperatura cieczy i oleju ok. 60...80°C,
- układ zapłonowy i zasilania oraz luzy zaworowe wg zaleceń producenta,
- sprawny akumulator lub zasilanie z prostownika rozruchowego.

Wykorzystując wieloletnie doświadczenia w zakresie diagnostyki technicznej pojazdów, uznano za celowe przeprowadzenie badań na wybranych pojazdach samochodowych, aby ocenić możliwości praktycznego wykorzystania korelacji składu spalin ze stanem technicznym silnika, szczególnie układu tłok – pierścienie – cylinder (TPC).

Przyjęto, że skład spalin silnika o ZI, może być dobrym nośnikiem informacji diagnostycznych możliwych do wykorzystania w ocenie nie tylko przebiegu procesu spalania, ale przede wszystkim jego stanu technicznego [Merkisz 1992, Piekarski 1997].

Analizę spalin wykonywano dla trzech stanów pracy silnika:

- prędkości obrotowej biegu wolnego;
- średniej prędkości obrotowej – 2000...3000 obr/min.;
- stanu nieustalonego, czyli zwiększeniu na krótko do maksymalnej prędkości obrotowej dla danego silnika i gwałtownym zamknięciu przepustnicy.

Analizę spalin przeprowadzano z wykorzystaniem następujących analizatorów: AWAT AG-4, OLIVER K 90, Radiotechnika AI 9600.

3. ANALIZA STATYSTYCZNA WYNIKÓW BADAŃ

Celem analizy statystycznej było ustalenie zależności:

- średniego ciśnienia sprężania,
- średniego ciśnienia sprężania (próba olejowa),
- średniej szczelności,

traktowanych jako zmienne objaśniane (grupa I), od zawartości HC, CO, CO₂, O₂ w spalinach oraz od współczynnika λ przy prędkości obrotowej biegu jałowego, średniej prędkości obrotowej i w stanach nieustalonych, które są uznane jako zmienne objaśniające (gr. II).

Zastosowano statystyczną metodę analizy regresji wielokrotnej.

Dla każdej zmiennej z grupy I przeprowadzono regresję krokową postępującą wskazując jako zbiór zmiennych niezależnych wszystkie zmienne z grupy II. Następnie oszacowano równanie regresji względem tych zmiennych z grupy II, które okazały się statystycznie istotne.

Podano tabele zawierające analizy (współczynniki, ich błędy standardowe, wartości funkcji testowej, wartość p) oraz tabele analizy wariancji dla regresji, a ponadto wartości, które wskazują na „dobroć” oszacowania:

- współczynnik determinacji R², który określa, jaka część zmienności zmiennej objaśnianej jest wyjaśniona znalezionym równaniem regresji,
- błąd standardowy oszacowania

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - k - 1}} \quad (1)$$

gdzie:

n – liczebność próby,

k – ilość zmiennych objaśniających w równaniu regresji,

y_i – wartość zmiennej objaśnianej w próbie,

\hat{y}_i – wartość wyznaczona z oszacowanego

równania regresji.

W analizie wariancji testowana jest hipoteza H₀, stwierdzająca, że rozważana regresja nie jest istotna. Jeżeli wartość funkcji testowej jest większa od wartości krytycznej F_α to hipotezę odrzucamy przy ustalonym poziomie istotności α. Wartość α określa prawdopodobieństwo popełnienia błędu I rodzaju polegającego na odrzuceniu H₀, mimo, że jest ona prawdziwa. Natomiast wartość p zamieszczana również w tabeli jest funkcją obliczonej wartości funkcji testowej F i wskazuje prawdopodobieństwo, dla jakiego obliczana wartość funkcji testowej byłaby wartością krytyczną testu. Wartość krytyczna F_α wyznacza obszar krytyczny testu.

Podano także wykresy rozrzutu zmiennej objaśnianej względem każdej ze zmiennych objaśniających i metodami graficznymi spróbowano pokazać, czy rozkład badanych cech z grupy I jest bliski rozkładowi normalnemu ze stabilną wariancją reszt. Warto tu jeszcze dodać, że test F jest dość odporny na odchylenia od normalności [Kornacki, Mielniczuk 2001].

3.1. Analiza wyników badań pojazdu samochodowego Polonez

Dla kolejnych cech w tabelach (1-8) podano wyniki analizy regresji oraz analizę wariancji dla regresji.

Zmienna objaśniana: średnie ciśnienie sprężania

Tab. 1. Wyniki analizy regresji dla średniego ciśnienia sprężania

	Współczynniki	Błąd standardowy współczynników	Wartość funkcji testowej t(28)	Poziom p
W. wolny	10,86122	0,313531	34,64165	1,55E-24
HC _{M/M}	-0,0012	-0,0012	0,000334	0,001181

Tab. 2. Analiza wariancji dla średniego ciśnienia sprężania

	Suma kwadrat.	Stopnie swobody	Średni kwadrat	F	Poziom p
Regresja	28,19173	1	28,19173	13,46324	0,001181
błąd	60,55443	28	2,162658		
Razem	88,74617				

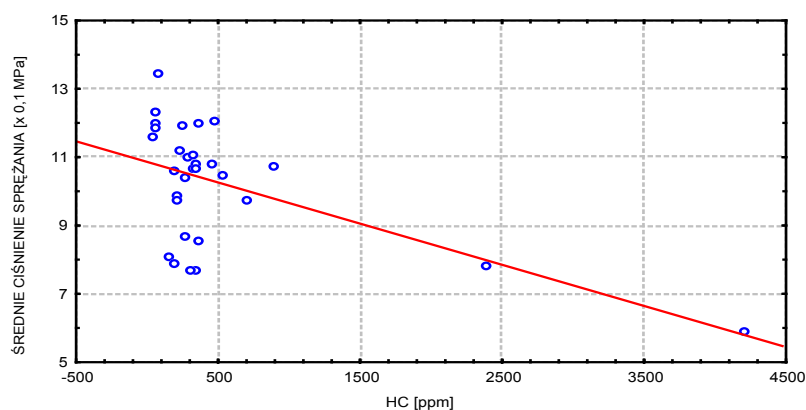
$$R^2=0,318 \quad S_e \approx 1,471$$

Równanie regresji:

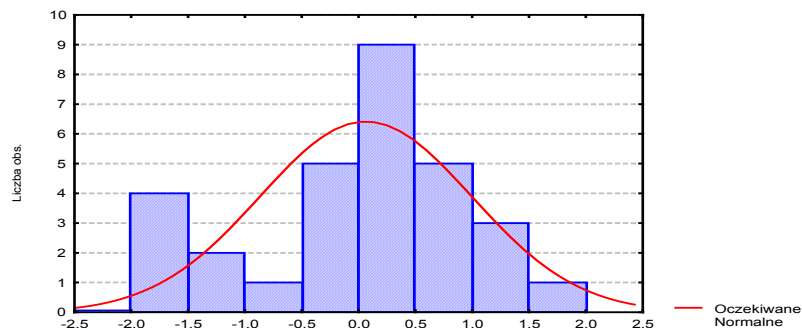
$$\text{ŚREDNIE CIŚNIENIE SPRĘŻANIA} = 10,861 - 0,001 \cdot \text{HC}_{M/M} \quad (2)$$

gdzie: HC_{M/M} – zawartość węglowodorów w spalinach w stanach niustalonych.

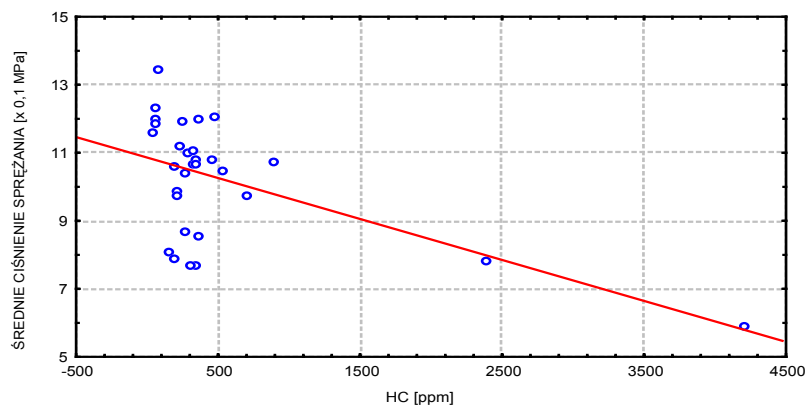
Rysunek 1 przedstawia wykres rozrzutu przebiegu zmian zależności średniego ciśnienia sprężania od zawartości węglowodorów w spalinach, rysunek 2 prezentuje rozkład reszt standaryzowanych, rysunek 3 obrazuje graficznie prawdopodobieństwo reszt.



Rys. 1. Wykres rozrzutu przebiegu zmian zależności średniego ciśnienia sprężania od zawartości węglowodorów w spalinach dla stanów niustalonych



Rys. 2. Rozkład reszty standaryzowanej dla analizy średniego ciśnienia sprężania



Rys. 3. Wykres rozrzutu przebiegu zmian zależności średniego ciśnienia sprężania od zawartości węglowodorów w spalinach dla stanów nieustalonych

Zmienna objaśniana: średnie ciśnienie sprężania (próba olejowa)

Tab. 3. Wyniki analizy regresji dla średniego ciśnienia sprężania (próba olejowa)

	Współczynniki	Błąd standardowy współczynników	Wartość funkcji testowej t(28)	Poziom p
W. wolny	12,57466	0,437663	28,73136	2,54E-22
HC _w	-0,00329	0,001309	-2,51077	0,018097

Tab. 4. Analiza wariancji dla średniego ciśnienia sprężania (próba olejowa)

	Suma kwadratów	Stopnie swobody	Średni kwadrat	F	Poziom p
Regresja	9,736858	1	9,736858	6,303975	0,018097
błąd	43,24764	28	1,544559		
Razem	52,9845				

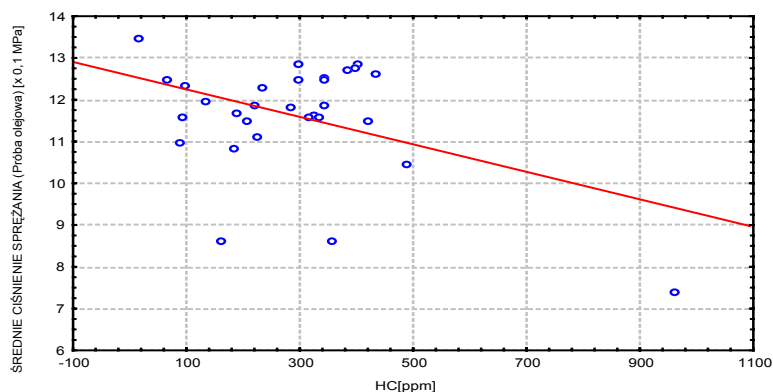
$$R^2=0,184 \quad S_e \approx 1,243$$

Równanie regresji:

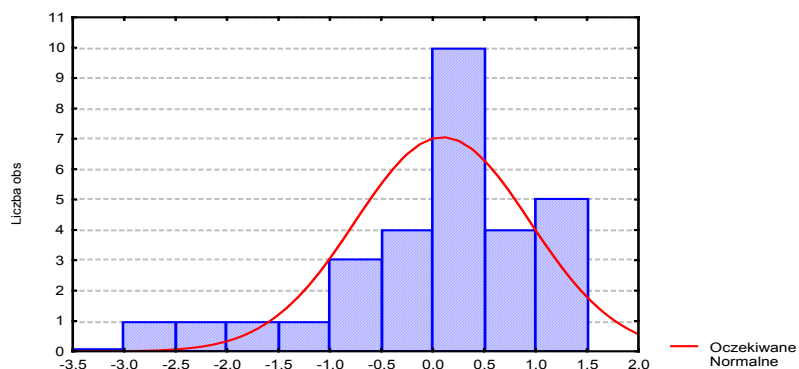
$$\text{ŚREDNIE CIŚNIENIE SPRĘŻANIA PRÓBA OLEJOWA} = 12,575 - 0,003 * \text{HC}_w \quad (3)$$

gdzie: HC_w – zawartość węglowodorów w spalinach dla prędkości obrotowej biegu jałowego.

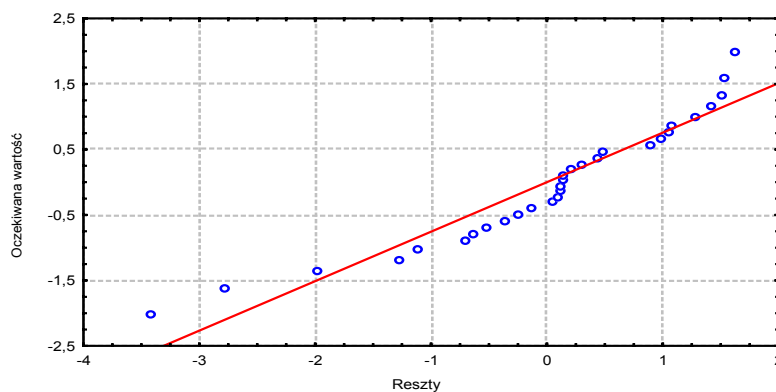
Rysunek 4 przedstawia wykres rozrzutu przebiegu zmian zależności średniego ciśnienia sprężania w próbie olejowej od zawartości węglowodorów w spalinach, rysunek 5 prezentuje rozkład reszt standaryzowanych, rysunek 6 obrazuje graficznie prawdopodobieństwo reszt.



Rys. 4. Wykres rozrzutu przebiegu zmian zależności średniego ciśnienia sprężania w próbie olejowej od zawartości węglowodorów w spalinach dla prędkości obrotowej biegu jałowego



Rys. 5. Rozkład reszty standaryzowanej dla analizy średniego ciśnienia sprężania w próbie olejowej



Rys. 6. Normalny wykres prawdopodobieństwa reszt dla analizy średniego ciśnienia sprężania w próbie olejowej

Zmienna objaśniana: średnia szczelność

- Wariant pierwszy - regresja względem węglowodorów HC

Tab. 5. Wyniki analizy regresji dla średniej szczelności

	Współczynniki	Błąd standardowy współczynników	Wartość funkcji testowej t(28)	Poziom p
W. wolny	89,155	2,643518	33,72589	3,23E-24
HC _w	-0,01894	0,007908	-2,39475	0,023566

Tab. 6. Analiza wariancji dla średniej szczelności

	Suma kwadrat.	Stopnie swobody	Średni kwadrat	F	Poziom p
Regresja	323,1534	1	323,1534	5,73482	0,023566
błąd	1577,782	28	56,34936		
Razem	1900,935				

$$R^2=0,170 \quad S_e \approx 7,507$$

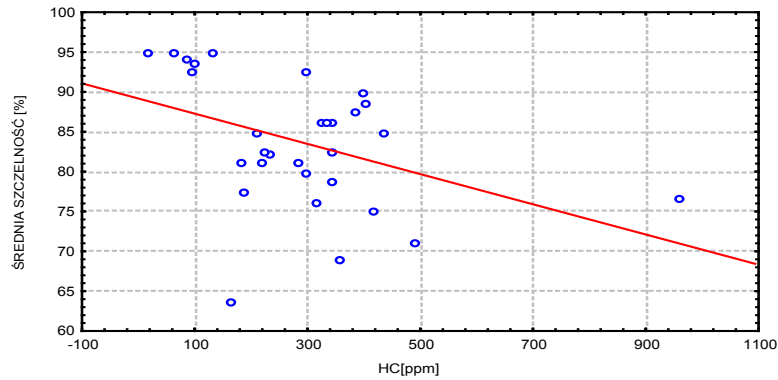
Równanie regresji:

$$\text{ŚREDNIA SZCZELNOŚĆ} = 89,155 - 0,019 * \text{HC}_w \quad (4)$$

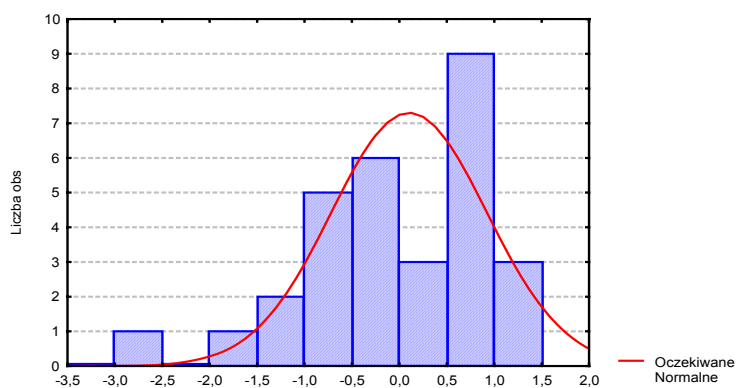
gdzie: HC_w – zawartość węglowodorów w spalinach dla prędkości obrotowej biegu jałowego

Rysunek 7 przedstawia wykres rozrzutu przebiegu zmian zależności średniej szczelności od

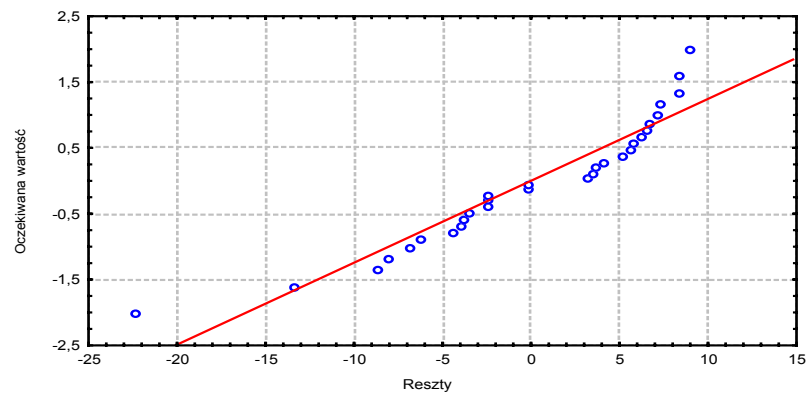
zawartości węglowodorów w spalinach, rysunek 8 prezentuje rozkład reszt standaryzowanych, rysunek 9 obrazuje graficznie prawdopodobieństwo reszt.



Rys. 7. Wykres rozrzutu przebiegu zmian zależności średniej szczelności od zawartości węglowodorów w spalinach dla prędkości obrotowej biegu jałowego



Rys. 8. Rozkład reszty standaryzowanej dla analizy średniej szczelności



Rys.9. Normalny wykres prawdopodobieństwa reszt dla analizy średniej szczelności

- Wariant drugi regresja krokowa postępującą względem wszystkich danych z grupy II bez lambda (ostatecznie zależność od HC_w i O_2_w)

Tab. 7. Wyniki analizy regresji dla średniej szczelności

	Współczynniki	Błąd standardowy współczynników	Wartość funkcji testowej t(27)	Poziom p
W. wolny	83,88395	2,941943	28,51311	,000000
O_2_w	1,13713	,384695	2,95593	,006399
HC_w	-,01757	,007015	-2,50447	,018604

Tab. 8. Analiza wariancji dla średniej szczelności

	Suma kwadrat.	Stopnie swobody	Średni kwadrat	F	Poziom p
Regresja	708,908	2	354,4538	8,028548	,001836
błąd	1192,028	27	44,1492		
Razem	1900,935				

$$R^2=0,373$$

$$S_e = 6,645$$

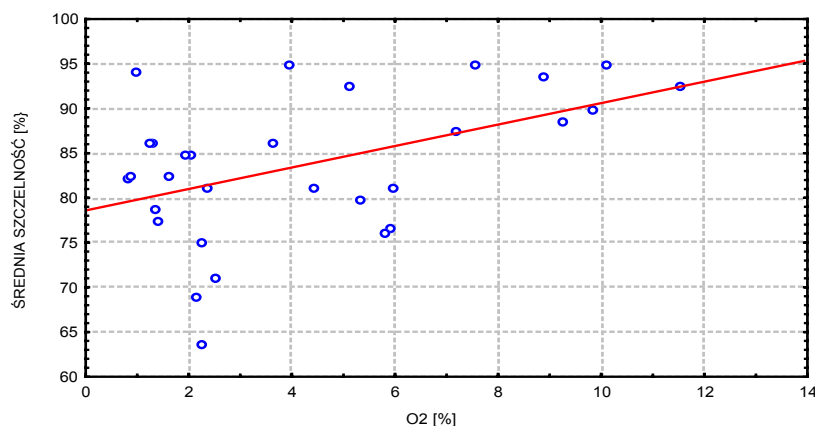
O_{2w} – zawartość tlenu w spalinach dla prędkości obrotowej biegu jałowego

Równanie regresji:

$$\text{ŚREDNIA SZCZELNOŚĆ} = 83,884 + 1,137 \cdot O_{2w} - 0,018 \cdot HC_w \quad (5)$$

gdzie: HC_w – zawartość węglowodorów w spalinach dla prędkości obrotowej biegu jałowego

Rysunek 10 przedstawia wykres rozrzutu przebiegu zmian zależności średniej szczelności od zawartości tlenu O_2 w spalinach.



Rys.10. Wykres rzutu przebiegu zmian zależności średniej szczelności od zawartości tlenu O_2 w spalinach dla prędkości obrotowej biegu jałowego

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Kluczowym zagadnieniem w procesie eksploatacji silników jest maksymalne wykorzystanie bezinwazyjnej diagnostyki technicznej pozwalającej na poprawną ocenę stanu technicznego. Warunki współpracy podsystemu funkcjonalnego TPC decydują nie tylko o niezawodnym funkcjonowaniu silnika, lecz przede wszystkim o ekonomicznej eksploatacji i ekologii spalin.

Dotychczasowy stan wiedzy z zakresu procesów zużycia układu TPC, zużycia oleju silnikowego oraz składu spalin, nie pozwalał na jednoznaczne i szczegółowe określenie zależności pomiędzy wspomnianymi parametrami. W niniejszej pracy podjęto zatem opis tego problemu.

Wiedzę zdobytą podczas prac badawczych, analiz pomiarów i studiów literaturowych można przedstawić w postaci następujących wniosków ogólnych:

1. Skład spalin spełnia wszelkie wymagania stawiane sygnałom diagnostycznym i może być wykorzystywany do diagnozowania stanu

technicznego układu TPC stanowiąc wyjątkowo łatwo dostępny parametr diagnostyczny. Przemawia za tym fakt, że przebieg zależności parametrów stanu układu TPC od zawartości toksycznych składników w spalinach opisuje regresja liniowa, a stąd wynika, że przebieg ten jest wyraźny i liniowy, a zatem odznacza się wszelkimi cechami pozwalającymi uznać go za sygnał diagnostyczny.

2. Ocena stanu technicznego silnika na podstawie analizy spalin może być wykorzystana w ramach szeroko rozumianej autodiagnostyki. Istnieją przesłanki do wykorzystania prezentowanej metody w ciągłej samoocenie stanu układu TPC, realizowanej przez układy diagnostyki pokładowej pojazdów ze względu na łatwą dostępność sygnału diagnostycznego składu spalin.
3. Składnikiem spalin najlepiej opisującym zużycie układu TPC są węglowodory HC, co jest naturalną konsekwencją termicznego procesu zużycia oleju w komorze spalania. Znajdują to odzwierciedlenie w wartościach współczynników determinacji określanych przy

opisie danych doświadczalnych równaniami regresji liniowej.

4. Zawartość tlenu węgla CO w spalinach stanowi wtórny sygnał diagnostyczny opisujący stan układu TPC, gdyż zwiększony poziom CO w spalinach jest następstwem nieprawidłowości procesu spalania, których przyczyną jest zużycie układu tłokowego.
5. Przeprowadzenie badań trwałościowych silników w warunkach hamowni silnikowej przyczyniłoby się do znacznej poprawy współczynnika R^2 oraz umożliwiłoby uzyskanie formuł i algorytmów do precyzyjnego prognozowania zużycia układu TPC.

Podsumowując, niniejsza praca jest fundamentem do dalszych prac badawczych. Jednocześnie został wykazany związek stanu technicznego układu TPC ze składem spalin emitowanych przez silnik spalinowy. Określone zostały także obszary wykorzystania proponowanej metody diagnostycznej.

Reasumując analizę sformułowanych wniosków potwierdzających celowość podjęcia niniejszego tematu, można sformułować następujące ogólne spostrzeżenia:

1. Skład spalin jest jednym z najlepszych sygnałów diagnostycznych możliwych do wykorzystania w ocenie stanu układu TPC, gdyż cechuje się dużą dostępnością oraz łatwością pomiaru i w sposób

prawidłowy opisuje stany diagnostyczne układu tłokowego.

2. Proponowana metoda może mieć zastosowanie w diagnostyce i autodiagnostyce w odniesieniu do silników trakcyjnych i stacjonarnych.
3. Proponowana metodyka oceny stanu układu TPC umożliwia precyzyjne łączenie parametrów ekologicznych ze stanem technicznym silnika.

LITERATURA:

- [1] Kornacki J., Mielniczuk J.: „Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych” Wydawnictwa Naukowo – Techniczne Warszawa 2001.
- [2] Merksiz J.: Studium wpływu zużycia oleju na emisję toksycznych związków w szybkoobrotowych silnikach spalinowych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Seria rozprawy nr 261, Poznań 1992
- [3] Piekarski W.: Analiza oddziaływania agregatów ciągnikowych na środowisko przyrodnicze, rozprawa habilitacyjna, Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Lublinie, Lublin 1997.
- [4] Żółtowski B., Jankowski M.: Diagnostyka '99. Materiały konferencyjne. Cz. 1 i 2 Bydgoszcz – Borówno 1999.



Prof. dr hab. inż. Wiesław Piekarski, jest Prodziekanem Wydziału Inżynierii Produkcji i Kierownikiem Katedry Energetyki i Pojazdów Akademii Rolniczej w Lublinie.



Prof. dr hab. Mirosława Wesołowska – Janczarek jest Kierownikiem Katedry Zastosowań Matematyki Akademii Rolniczej w Lublinie. Zajmuje się statystyką matematyczną, teorią eksperymentu i zastosowań metod matematycznych do analizy wyników eksperymentów.

Mgr inż. Sławomir Juściński
Katedra Energetyki i Pojazdów
Akademia Rolnicza w Lublinie
ul. Głęboka 28 20 – 612 Lublin
tel. (081) 445 61 07

MONITOR MAGISTRALI CAN SYSTEMU POŚREDNIEGO STEROWANIA SAMOLOTEM PZL-110

Paweł RZUCIDŁO

Politechnika Rzeszowska, Katedra Awioniki i Sterowania
35-959 Rzeszów, Al. Powstańców Warszawy 8, tel./fax: (17) 8544319, email: pawelrz@prz.edu.pl

Streszczenie

W eksperymentalnym systemie pośredniego sterowania SPS-1¹ samolotem PZL-110 „Koliber” zastosowano magistralę danych CAN. Pozwala ona na wymianę informacji pomiędzy poszczególnymi urządzeniami. Monitorowanie pakietów danych pojawiających się na magistrali może być bardzo pomocne w trakcie badań pojedynczych urządzeń, podczas integracji systemu, badań laboratoryjnych jak i w trakcie prób w locie. W niniejszym opracowaniu przedstawiono narzędzie do monitorowania magistrali CAN, które rozwijano równolegle z systemem pośredniego sterowania samolotem i wykorzystywano w kolejnych etapach prac nad nim. Głównym elementem systemu monitorującego jest oprogramowanie. Pozwala ono nie tylko na podgląd, rejestrację i wstępną obróbkę danych lecz również umożliwia sterowanie poszczególnymi urządzeniami, symulację wybranych modułów sprzętowych i diagnostykę magistrali.

Słowa kluczowe: monitorowanie, rejestracja, sterowanie pośrednie, CAN, badania w locie.

CAN BUS MONITOR OF THE FLY-BY-WIRE CONTROL SYSTEM USED ON PZL110 AIRCRAFT

Summary

The CAN data bus was used in the project of the experimental Fly-by-Wire control system (SPS-1) mounted on the board of PZL-110 “Koliber” general aviation aircraft. This solution allows to free communication between individual modules of system. Monitoring of the bus state and data frames is useful during particular hardware tests, system integration, laboratory and in-flight tests. This report intends to present specific monitor tool developed simultaneously to SPS-1. Main part of CAN monitoring system is software. It realizes acquisition, visualization and conversion of booked data. Beside of it CAN Monitor controls and simulates selected modules of SPS-1 system and it works as the bus diagnostics tool.

Keywords: monitoring, acquisition, FBW, CAN, in-flight, tests.

1. CHARAKTERYSTYKA SYSTEMU MONITORUJĄCEGO

Podczas prób w locie istotna jest możliwość bieżącej kontroli parametrów i warunków pracy testowanych urządzeń. System monitorujący powinien odpowiadać nie tylko za wizualizację i rejestrację poszczególnych wielkości lecz także pozwalać na szybką modyfikację wybranych współczynników, swobodne załączanie i wyłączanie poszczególnych modułów, czy wreszcie umożliwiać pełną diagnostykę badanych układów.

Prezentowane rozwiązanie pozwala na sterowanie testowanym systemem z poziomu

operatora eksperymentu, kontrolę pracy systemu i układów pomiarowych oraz monitorowanie i rejestrację różnorodnych pakietów danych przesyłanych na magistrali.

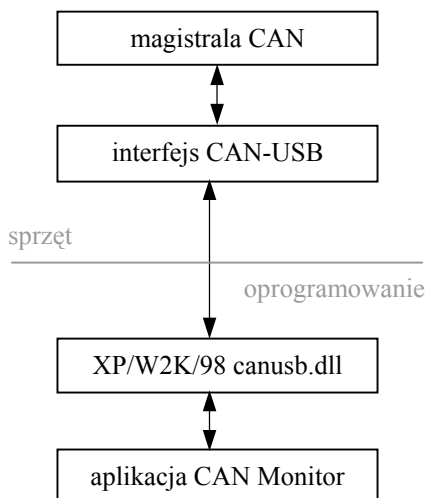
System monitorujący jest zbudowany w oparciu o komputer klasy PC i typowy interfejs CAN-USB umożliwiający pełną komunikację z magistralą komunikacji szeregowej CAN 2.0 [1]. Standard CAN został opracowany w latach 80-tych na potrzeby przemysłu motoryzacyjnego. Od tego czasu rozpowszechnił się i jest wykorzystywany w wielu innych dziedzinach techniki. Standard ten definiuje zarówno stronę sprzętową jak i metody transmisji danych, sposoby rozstrzygnięcia konfliktów czy też detekcję uszkodzeń magistrali.

¹ System wykonano w ramach pracy naukowej finansowanej ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2001-2003 jako projekt badawczy.

Ponadto cechuje się dobrymi osiągnięciami, jest rozwiązaniem sprawdzonym, a układy i narzędzia niezbędne do obsługi są powszechnie dostępne.

Wymagania sprzętowe w stosunku do komputera, na którym ma pracować oprogramowanie monitora są niewielkie i ograniczają się w praktyce do złącza USB (podczas prowadzonych testów procesor z zegarem 600MHz, 32MB RAM i szybka pamięć masowa w zupełności wystarczały). W trakcie badań nad pośrednim systemem sterowania samolotem PZL-110 „Kolibier” [6, 8] monitor pracował zarówno na stacjonarnym komputerze (laboratorium) [5] jak i na przenośnym (próby w locie).

Oprogramowanie monitora zrealizowano w środowisku Visual Basic. Dostęp aplikacji do magistrali odbywa się za pośrednictwem odpowiedniej biblioteki dll (ang. *dynamic link library*) [2]. Korzystanie z monitora wymaga uprzedniej instalacji oprogramowania interfejsu, natomiast aplikacja *CAN Monitor* może być uruchamiana bezpośrednio ze swego macierzystego katalogu *can_monitor*. System monitorujący zawiera kilka podkatalogów zawierających pliki pomocy, dodatkowe programy, skrypty oraz pliki źródłowe. Wzajemne relacje sprzętu i oprogramowania przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Struktura sprzętu i oprogramowania

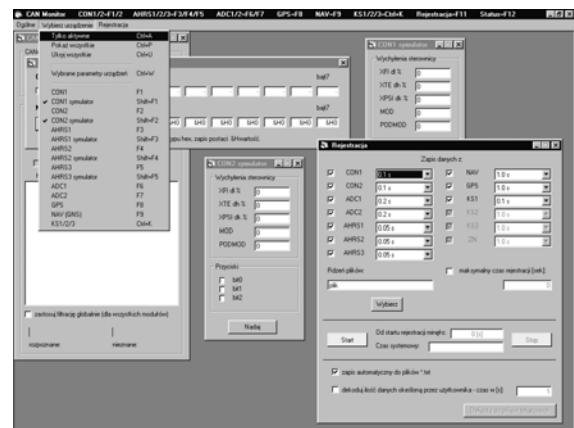
2. MOŻLIWOŚCI APLIKACJI CAN MONITOR

Opracowana wersja aplikacji *CAN Monitor* dostosowana jest do monitorowania i rejestracji danych przesyłanych magistralą CAN systemu pośredniego sterowania SPS-1 [4, 7, 8]. W tabeli 1 zestawiono urządzenia komunikujące się przy pomocy pokładowej magistrali.

Funkcjonalnie aplikacja *CAN Monitor* składa się z okna głównego i przyporządkowanych mu okien podrzędnych (rys. 2). Dzielą się one ze względu na zawarte w nich funkcje (status, filtracja, rejestracja) bądź rodzaj obsługiwanego urządzenia (tab. 1). Wywołanie wybranego okna odbywa się z paska

menu lub za pomocą odpowiedniego skrótu z klawiatury. Szybki i łatwy dostęp do ważnych funkcji programu jest szczególnie istotny podczas prób w locie. Z tego względu zastosowano odpowiednie kombinacje klawiszy, poprzez które można dokonywać szybkiego przełączania okien, wywoływać urządzenia aktywne bądź automatycznie pomijać informacje od nieaktywnych. Menu główne programu dzieli się na następujące menu szczegółowe:

- diagnostyka,
- urządzenia,
- symulatory,
- rejestracja,
- kokpit.



Rys.2. Okno aplikacji CAN Monitor

Tabela 1. Zestawienie obsługiwanych urządzeń

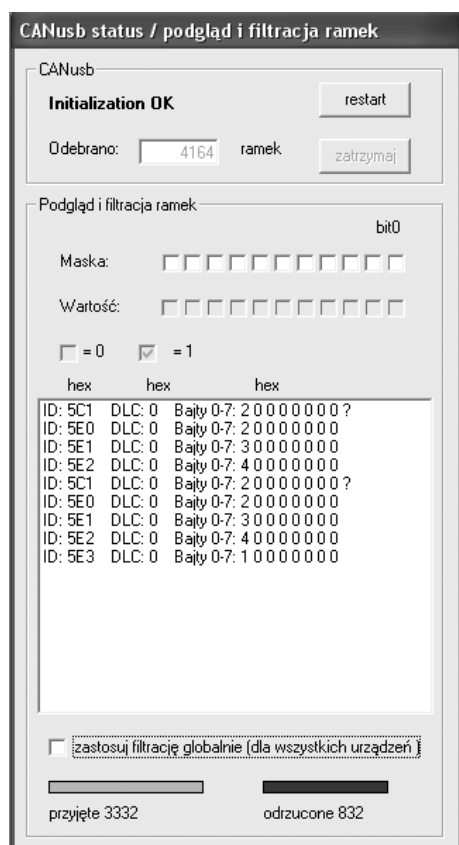
Nazwa	Liczba urządzeń	Oznaczenie	Częstość komunikacji [Hz]
Centrale aerometryczne	2	ADC1-2	5
Inercyjne układy odniesienia	3	AHRS1-3	20
Sterownice i pulpity sterownicze	2	CON1-2	10
Systemy nawigacji satelitarnej	2	GPS, GNS	1
Komputery sterujące	3	KS1-3	10
Moduł sterowania zespołem napędowym	1	ZN1	10

2.1. Diagnostyka magistrali i interfejsu CAN-PC

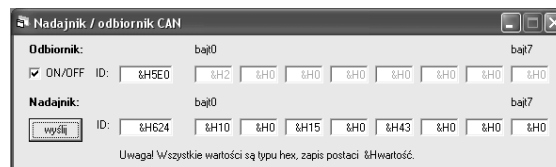
Program *CAN Monitor* umożliwia detekcję stanów awaryjnych magistrali i interfejsu łączącego ją z komputerem PC. Informuje on użytkownika o niezdatności systemu lub błędnym działaniu urządzeń w przypadkach:

- wystąpienia błędu podczas transmisji/odbioru danych,
- pojawienia się na magistrali nieznanego pakietu danych,
- odłączenia magistrali,
- utraty komunikacji interfejsu z magistralą,
- utraty komunikacji interfejsu z PC,
- przepełnienia bufora FIFO interfejsu,
- nieprawidłowej instalacji interfejsu CAN-PC.

Informacje o stanie magistrali i interfejsu są wyświetlane w postaci komunikatów słownych. Pojawienie się niepożądanych danych jest sygnalizowane ogólnie czerwoną kontrolką oraz dodatkowo znakiem zapytania przy każdej nieznannej ramce. Poprzez wykorzystanie opcji filtracji można blokować przyjmowanie pakietów o wybranych identyfikatorach.



Rys. 3. Diagnostyka magistrali, podgląd i filtracja odbieranych pakietów

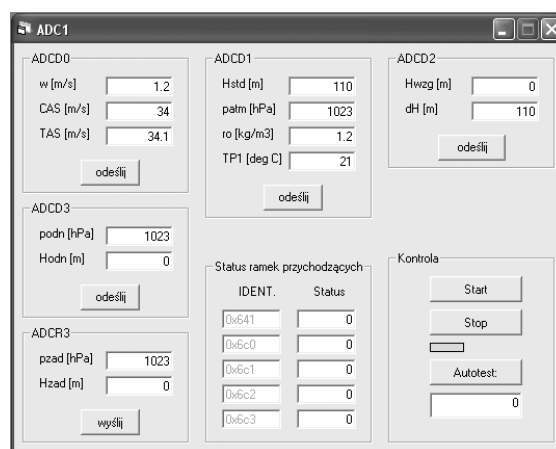


Rys. 4. Testowy nadajnik / odbiornik CAN

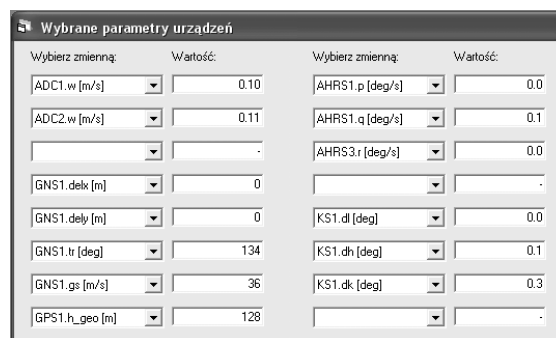
2.2. Monitorowanie pracy urządzeń

Oprogramowanie obsługuje wszystkie urządzenia zastosowane w systemie pośredniego sterowania samolotem i podłączone do magistrali CAN (tab. 1). Każde urządzenie posiada własne okno, w którym wyświetlane są jego parametry (rys. 5). W zależności od trybu pracy urządzenia parametry są przesyłane w sposób ciągły bądź na życzenie jest odsyłany pojedynczy pakiet. Ponadto we wszystkich oknach istnieją przyciski pozwalające na załączanie i wyłączanie urządzeń oraz wprowadzanie ich w tryb autotestu.

Każde okno posiada znacznik graficzny pozwalający na szybką ocenę czy urządzenie wysłało dane (zielona, ruchoma listwa). Istnieją również pola diagnostyczne informujące o statusie odpowiednich ramek przychodzących.



Rys. 5. Okno centrali aerometrycznej nr 1



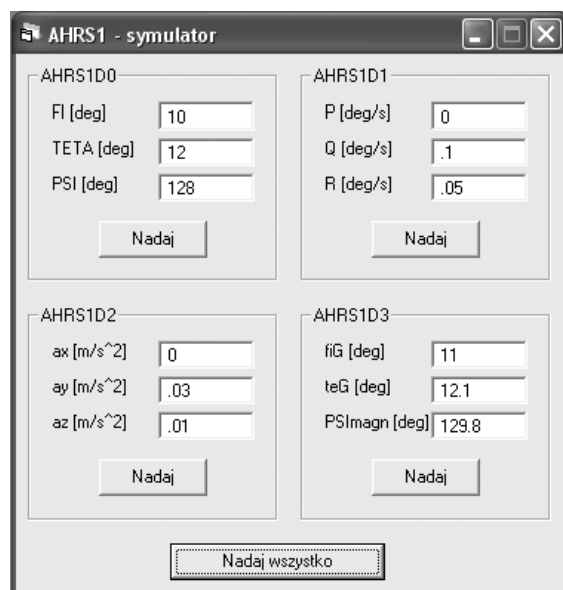
Rys. 6. Fragment okna z wybranymi parametrami urządzeń

Podczas prób w locie możliwy jest tradycyjny podgląd parametrów urządzeń (rys. 5). Jest to wygodne, gdy obserwuje się parametry dwóch lub trzech urządzeń. W przypadku konieczności porównania parametrów z większej liczby urządzeń jest to uciążliwe, wymaga wielu zabiegów i rozprasza operatora. Z tego względu zastosowano w programie *CAN Monitor* okno pozwalające na jednoczesny wybór i śledzenie do dwudziestu czterech dowolnych parametrów różnych urządzeń (rys. 6).

2.3. Symulacja pracy urządzeń pokładowych

W trakcie badań nad odległościowym układem sterowania samolotem PZL-110 „Koliber” zaistniała potrzeba budowy symulatorów urządzeń pokładowych. Zdecydowały o tym głównie względy praktyczne. Symulatory umożliwiły badanie systemu sterowania bez fizycznego udziału niektórych urządzeń. Ponadto przyczyniły się do wczesnego wykrycia usterek i pozwoliły na sprawne przeprowadzenie badań laboratoryjnych [5].

Symulacja rzeczywistych urządzeń polega na wysyłaniu pakietów informacyjnych zawierających wartości wybranych parametrów na magistralę CAN, właściwych dla danego urządzenia. Dla systemu SPS-1 zaprojektowano protokół transmisji, w którym każdemu urządzeniu przyporządkowano odpowiedni zestaw identyfikatorów [4, 8]. Wynikiem działania danego urządzenia (lub symulatora) jest więc pojawienie się określonego pakietu informacji o konkretnym identyfikatorze na magistrali CAN.

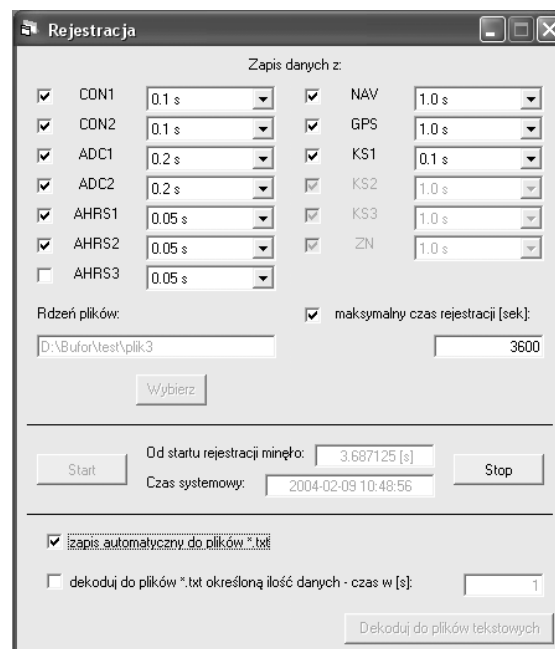


Rys. 7. Okno symulatora inercyjnego układu odniesienia nr 1

2.4. Rejestracja

Oprogramowanie systemu monitorującego umożliwia rejestrację parametrów wszystkich obsługiwanych urządzeń pokładowych (tab. 1). Użytkownik ma możliwość dokonania wyboru urządzeń i częstotliwości zapisu według własnych potrzeb (1÷20Hz). Nazwa rdzenia plików, w których będą zapisywane pomiary musi być każdorazowo zmieniona. W przeciwnym wypadku program nie będzie rejestrował danych i wyświetli stosowny komunikat. Jest to zabezpieczenie przed przypadkowym nadpisaniem danych.

Rejestrator umożliwia określenie maksymalnego czasu pracy. Po jego przekroczeniu proces zapisu zostaje zatrzymany. Ponadto możliwa jest automatyczna konwersja zarejestrowanych danych do plików tekstowych.



Rys. 8. Okno rejestratora

W celu minimalizacji objętości zbiorów i usprawnienia procesu rejestracji dane są zapisywane do zakodowanych plików binarnych. Ze względów bezpieczeństwa jest to zbiór plików, z których każdy zawiera dane tylko z jednej minuty pracy rejestratora (w przypadku awarii systemu monitorującego w trakcie prób w locie istnieje możliwość odzyskania choćby części zarejestrowanych danych). Praktycznie jest to rozwiązane w ten sposób, że w każdej kolejnej minucie jest tworzony nowy plik, którego nazwa składa się z rdzenia i sufiksu w postaci minuty pracy rejestratora. Wraz z danymi jest zapisywany dokładny czas ich odbioru z magistrali.

Bezpośrednio po zakończeniu rejestracji pliki binarne mogą zostać zamienione na odpowiednie pliki tekstowe: con1.txt, con2.txt, ahrs1.txt, itd. W pierwszej linijce tekstu umieszczony jest opis

zarejestrowanych parametrów wraz z jednostkami. Druga linijka zawiera czas rozpoczęcia rejestracji. Dane umieszczone są w kolumnach. W pierwszej z nich zawarty jest czas jaki upłynął od momentu rozpoczęcia rejestracji do chwili odbioru danych z magistrali, następne natomiast zawierają wartości odpowiednich parametrów.

Przykładowa zawartość pliku tekstowego z zarejestrowanymi danymi:

```
%t[s], w[m/s], cas[m/s], hstd[m], p[hPa], ro[kg/m3]
%03-10-24 12:53:05
.09825 .55 7.5 193 990.2 1.22
.31925 -.01 7.5 193.4 990.2 1.22
.52925 .09 7.5 192.6 990.3 1.22
.76925 -.49 8 193.2 990.2 1.22
.98025 -.49 7.5 192.2 990.3 1.22
1.21025 -.98 7.3 189.8 990.6 1.22
1.42025 -2.74 7.6 190.4 990.5 1.22
...
```

Programowy rejestrator, poza uruchomieniem i zatrzymaniem, nie wymaga w trakcie lotu żadnej ingerencji ze strony operatora. Rejestrator informuje jedynie o czasie jaki upłynął od uruchomienia rejestracji. Do zapisu wielkości przedstawionych w tabeli 1 (z podanymi częstotliwościami) podczas godzinowego lotu wymagane jest 4.7MB miejsca na nośniku o możliwie krótkim czasie dostępu (np. twardy dysk, pamięć USB).

2.5. Wirtualny kokpit

Dodatkową funkcją monitora magistrali CAN jest wirtualny kokpit (rys. 9). Umożliwia on śledzenie wartości ważniejszych parametrów generowanych przez wybraną centralę aerometryczną i jeden z trzech inercyjnych układów odniesienia. Wielkości takie jak prędkość rzeczywista, prędkość wznoszenia, wysokość barometryczna, kurs magnetyczny czy orientacja przestrzenna samolotu są wizualizowane poprzez wskazania typowych przyrządów pilotażowo-nawigacyjnych.



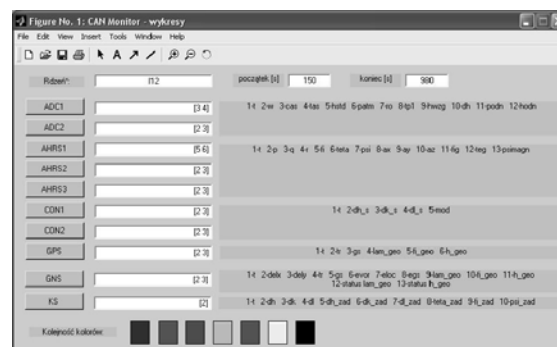
Rys. 9. Wirtualny kokpit

Operator ma możliwość dokonywania nastaw wirtualnych przyrządów. W takim przypadku odpowiednio uformowany pakiet danych jest przesyłany do rzeczywistego urządzenia i ma to bezpośredni wpływ na jego parametry pracy (np. zmiana ciśnienia odniesienia dla pomiaru wybranej wysokości barometrycznej skutkuje wysłaniem informacji o tym zdarzeniu do centrali aerometrycznej).

3. PODSUMOWANIE

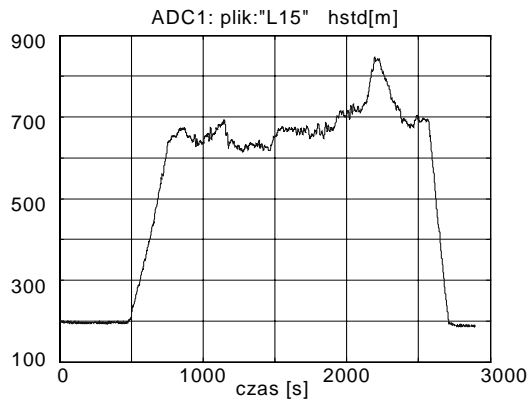
Program CAN Monitor był zastosowany do analizy i gromadzenia danych w badaniach laboratoryjnych, próbach naziemnych oraz badaniach w locie układu pośredniego sterowania SPS-1 zamontowanego w samolocie PZL-110 „Koliber” [8]. Dwanaście godzin lotów próbnych zarejestrowanych zostało w plikach binarnych, przekonwertowanych następnie na pliki tekstowe o łącznej objętości 402MB.

Uzupełnieniem programu CAN Monitor są zewnętrzne skrypty umożliwiające aproksymację danych do jednakowych chwil czasowych i szybkie kreślenie wykresów. Skrypty są połączone w elastyczny sposób z całością systemu. Wyposażono je ponadto w interfejs GUI (ang. Graphical User Interface) co umożliwia ich szybką i intuicyjną obsługę (rys. 10).

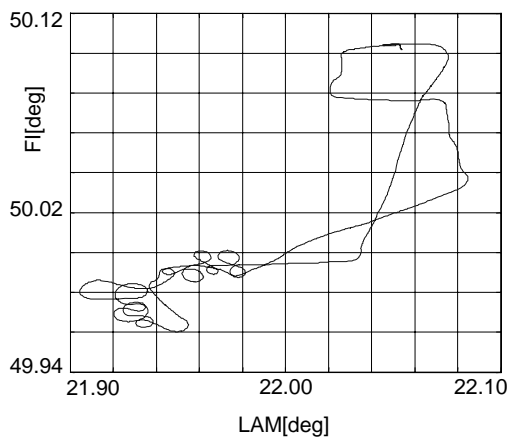


Rys. 10. Moduł do szybkiego kreślenia i opisywania wyników badań

Przykładowe rejestracje typowych parametrów lotu przedstawiają rys. 11 i 12.



Rys. 11. Wysokość lotu wg ciśnienia standardowego (2003-10-24, początek rejestracji godz. 10:47:59 GMT)



Rys. 12. Trajektoria lotu wykreślona we współrzędnych geograficznych (2003-10-24, początek rejestracji godz. 10:47:59 GMT)

Prezentowane oprogramowanie monitora nie jest wersją ostateczną. Jest ono ściśle związane z badaniami nad systemem sterowania pośredniego samolotem lekkim i w dalszym ciągu będzie podlegało rozbudowie. Dalsza modyfikacja i rozszerzanie możliwości programu *CAN Monitor* będą ułatwione dzięki jego otwartej i modułowej budowie [3].



Rys. 13. PZL-110 „Koliber” - próby w locie

LITERATURA

- [1] CAN Specification Version 2.0, Robert Bosch GmbH, 1991;
- [2] Pieniżek J., Rzucidło P., Mikrokomputerowe systemy pomiarowe dla potrzeb lotnictwa, tom I, str. 193-201, Konferencja Awioniki, Waplewo 2001;
- [3] Pieniżek J., Tomczyk A.: System pomiarowo-nawigacyjny dla samolotów lekkich, Elektronizacja, nr 7-8, 2002, str. 25-29, również: VII Konferencja Naukowa Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne, tom. I, str. 295-300, Rzeszów 2002;
- [4] J. Pieniżek, System sterowania samolotem z zastosowaniem magistrali CAN, Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe (17) nr 1, str. 33-40, I Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Zastosowania Magistrali CAN”, Gliwice 2003;
- [5] Rogalski T., Dołęga B., The Laboratory Stand Intends to Test and Prototype Control System for Small Transportation Aircraft, International Multidisciplinary Conference, Baia Mare 2003;
- [6] Tomczyk A., Experimental Fly-By-Wire Control System for General Aviation Aircraft, AIAA-2003-5776, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 11-14 August 2003, CD-ROM ISBN 1-56347-638-X, Austin, Texas;
- [7] Tomczyk A., Zintegrowany system pomiarowy dla lekkich samolotów z pośrednim systemem sterowania, X Konferencja „Mechanika w Lotnictwie”, str. 421-431, Kazimierz Dolny 3-5 czerwca 2002;
- [8] Tomczyk A. [red.], Zintegrowany system pośredniego sterowania lekkim samolotem dyspozycyjnym, Grant KBN 8 T12C 049 20, Rzeszów 2003.



mgr inż. Paweł Rzucidło jest absolwentem Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej (2001) w specjalności "Awionika". Od 2001 roku zatrudniony jako asystent w Katedrze Awioniki i Sterowania.

DIAGNOZOWANIE JAKOŚCI PARTII WYROBÓW METODĄ STATYSTYCZNEJ KONTROLI ODBIORCZEJ Z OCENĄ LICZBOWĄ

Jerzy SZKODA

Katedra Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, Uniwersytet Warmińsko-Mazurskiego
ul. Oczapowskiego 11, 10-736 Olsztyn, tel./fax (089) 523-34-63

Streszczenie

W artykule scharakteryzowano ocenę liczbową w diagnostowaniu jakości partii wyrobów metodą statystycznej kontroli odbiorczej i warunki jej stosowania.

Opisano algorytm postępowania w diagnostowaniu jakości partii na podstawie statystycznej kontroli odbiorczej z oceną alternatywną.

Słowa kluczowe: diagnostyka, statystyczna kontrola odbiorcza, jakość, plany badań.

DIAGNOSING THE ARTICLES LOT QUALITY BASED ON STATISTICAL RECEPTION INSPECTION WITH NUMERICAL ESTIMATION

Summary

The paper presents the numerical estimation in diagnosing the articles lot quality based and conditions of its application. It also describes the diagnosis algorithm based on statistical reception inspection with numerical estimation.

Key words: diagnostics, statistical methods, quality, research plan.

1. WSTĘP

Diagnostowanie jakości partii wyrobów metodą statystycznej kontroli odbiorczej z oceną liczbową jest możliwe wówczas, gdy rozkład wartości mierzonych cechy wyrobu ma rozkład normalny.

Zawsze jednak, gdy możemy diagnostowanie jakości partii wyrobów przeprowadzić na podstawie statystycznej kontroli odbiorczej z oceną alternatywną lub oceną liczbową, należy wykorzystać tę drugą ocenę. Statystyczna kontrola odbiorcza z oceną alternatywną jest bowiem obciążona znaczną niepewnością. Aby uzyskać większą pewność diagnostowania jakości partii wyrobów, trzeba pobierać duże próbki, co wiąże się ze zwiększeniem kosztów kontroli.

2. WARUNKI STOSOWANIA STATYSTYCZNEJ KONTROLI ODBIORCZEJ Z OCENĄ LICZBOWĄ

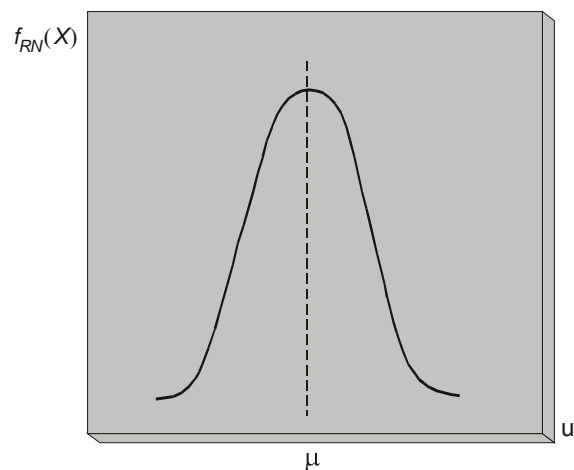
Statystyczną kontrolę odbiorczą /SKO/ z oceną liczbową można prowadzić wówczas, gdy wartości cech wyrobów mają rozkład normalny (RN).

Rozkład normalny opisywany jest funkcją gęstości $f_{RN}(u)$ o postaci (1):

$$f_{RN}(u) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) \quad (1)$$

gdzie: $u = \frac{X - \mu}{\sigma}$;

X – wartość cechy wyrobu,
 μ – wartość oczekiwana rozkładu,
 σ – odchylenie standardowe
i ma kształt „dzwonowy” (rys. 1).



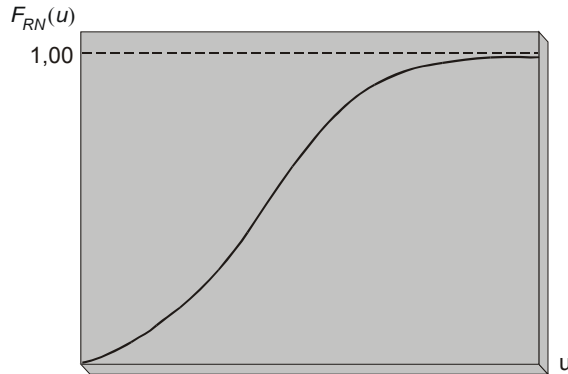
Rys. 1. Graficzny obraz funkcji gęstości rozkładu normalnego cechy wyrobu

Prawdopodobieństwo zdarzenia, że zmienna losowa będzie przyjmowała wartości z określonego przedziału, wyznacza się na podstawie dystrybuanty $F_{RN}(u)$ (2):

$$F_{RN}(u) = \int_{-\infty}^u f_{RN}(u) du,$$

(2)

a jej kształt przybiera postać pokazaną na rys. 2.



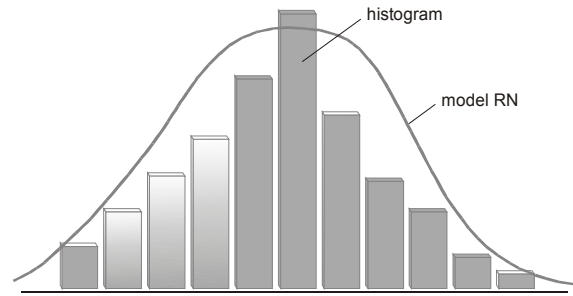
Rys. 2. Graficzny obraz postaci dystrybuanty rozkładu normalnego cechy wyrobu

Założenie o rozkładzie normalnym wartości cechy wyrobu jest bardzo ważne. Wykorzystanie bowiem tablic wartości SKO z oceną liczbową w praktycznym posługiwaniu się normami, oparte jest na wyliczeniach wynikających z RN. Konsekwencją tego jest również określona postać wzorów i współczynników zawartych w normach, pozwalających zdiagnozować jakość przedstawianych do kontroli partii wyrobów.

W przypadku, gdy rozkład zebranych wyników wyraźnie odbiega od RN może to skutkować niewłaściwymi wartościami wskaźników wykorzystywanych do diagnozowania jakości partii wyrobów i podejmowania decyzji o przyjęciu lub odrzuceniu partii wyrobów. Sytuacje takie powodować mogą duże koszty badań.

Aby tego uniknąć należy zweryfikować hipotezę o normalności rozkładu wyników pomiarów. Można tego dokonać trzema sposobami, a mianowicie:

1. Dokonując analizy danych przedstawionych za pomocą histogramu – po kształcie histogramu można wstępnie określić normalność rozkładu (rys. 3). Metoda ta może się jednak okazać zawodna, ponieważ dobierając różne szerokości przedziałów można otrzymać różne jego kształty.
2. Wykorzystując testy statystyczne do sprawdzania normalności rozkładu danych np. Shapiro-Wilka. Testy te pozwalają na precyzyjną weryfikację normalności, wymagają jednak pewnego poziomu wiedzy z zakresu statystyki.
3. Wykorzystując graficzną metodę sprawdzania normalności rozkładu – za pomocą prostego do odczytania wykresu na siatce RN.



Rys. 3. Kształt modelu RN dla histogramu wartości pomiarów cechy wyrobów

3. PROCEDURA TESTU NORMALNOŚCI ROZKŁADU ZA POMOCĄ SIATKI RN

Metoda ta wymaga uporządkowania wyników obserwacji według wartości niemalejących (3):

$$X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_n \quad (3)$$

Takie uporządkowane wyniki obserwacji noszą nazwę ciągu „statystyk pozycyjnych” próbki.

Do testu wykorzystuje się papier ze siatką rozkładu normalnego. Papier taki można kupić w firmach sprzedających papier milimetrowy, logarytmiczny z naniesioną siatką odciętych i rzędnych.

Jeśli założymy, że X jest zmienną losową o RN z wartością średnią μ i odchyleniem standardowym σ oraz że $u = (X - \mu)\sigma$. Wówczas, jeśli mamy n wartości X_i i przedstawimy je na wykresie jako rzędne punktów o odciętych u_i , to otrzymane punkty (u_i, X_i) leżąc będą na prostej o nachyleniu σ przechodzącej przez punkt o współrzędnych $(0, \mu)$.

Jeżeli populacja ma RN, to liniową skalę odciętych u można zastąpić skalą prawdopodobieństw $F_{RN}(u)$ (wzór 2).

Podziałka pionowa dla wartości X jest liniowa, podczas gdy podziałka pozioma odpowiada skali prawdopodobieństw $F_{RN}(u)$.

W praktyce wartości μ i σ dla badanej populacji są z reguły nieznanne. Niemożliwe jest zatem określenie wartości u_i lub $F_{RN}(u_i)$, odpowiadających wynikom obserwacji X_i . Wiadomo jednak, że jeżeli powtarza się pobieranie próbek losowych n wyników obserwacji z populacji o RN to średnia arytmetyczna oraz wartość oczekiwana wielkości $F_{RN}(X_i)$ równa się wartościom wyliczonym ze wzoru 4, bez względu jakie są wartości μ i σ :

$$F_{RN}(i) = \frac{i}{n+1} \quad (4)$$

W konsekwencji graficzny test odstępstw od normalności oparty na zastosowaniu siatki RN polega na:

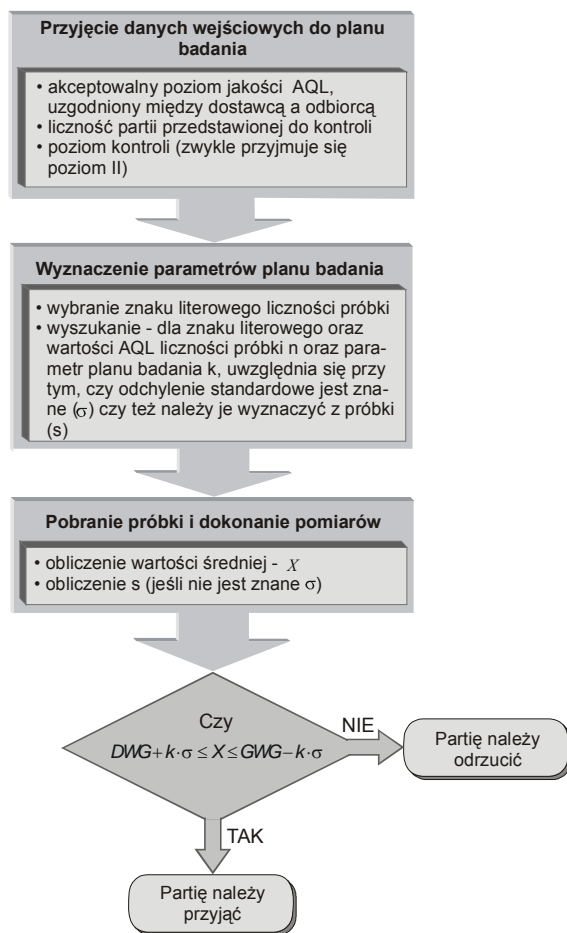
- a) ustaleniu odpowiedniej skali dla pionowej podziałki X ;

b) naniesieniu punktów o rzędnych X_i , gdzie X_i jest i-tą statystyką pozycyjną próbki i odpowiadających im odciętych $F_{RN}(X_i)$ według wzoru 4.

Jeżeli rozkład prawdopodobieństwa jest ściśle normalny, to wartości X_i , odpowiadające wartościom $i/(n+1)$ dystrybuanty tego rozkładu, będą graficznie reprezentowane przez punkty leżące na prostej przechodzącej przez punkt o współrzędnych $(0, \mu)$ i mającej nachylenie σ .

4. ALGORYTM STATYSTYCZNEJ KONTROLI ODBIORCZEJ Z OCENĄ LICZBOWĄ

Planowanie i przeprowadzanie statystycznej kontroli odbiorczej z oceną liczbową dokonuje się według algorytmu przedstawionego na rysunku 4.



Rys. 4. Algorytm postępowania w SKO z oceną liczbową

W SKO z oceną liczbową plan badań może być przeprowadzony według metody s lub według metody σ . Plany badań według metody s należy stosować wówczas, gdy odchylenie standardowe badanej cechy wyrobu nie jest znane przed rozpoczęciem kontroli.

Plany badania według metody σ stosuje się wtedy, gdy odchylenie standardowe badanej cechy wyrobu jest znane.

Ustalenie planu badania w SKO z oceną liczbową dokonuje się z wykorzystaniem normy PN-ISO 3951:1997.

5. ANALIZA PRZYPADKU. DIAGNOZA JAKOŚCI PARTII TŁOCZONYCH PODKŁADEK DYSTANSOWYCH Z WYKORZYSTANIEM SKO Z OCENĄ LICZBOWĄ

Po dłuższej obserwacji procesu tłoczenia podkładek dystansowych, i badaniach partii tych wyrobów stwierdzono, że wartość odchylenia standardowego dla grubości podkładek jest stabilna i stała i wynosi $\sigma = 0,01$.

W tej sytuacji podjęto decyzję o przeprowadzeniu kontroli jakości dalszych partii podkładek metodą SKO z oceną liczbową (metodą σ).

Specyfikację partii tłoczonych podkładek dystansowych poddawanych kontroli jakości przedstawiono w artykule [1].

Do wybrania znaku literowego liczności próbki wykorzystuje się tabelę 1. Dla przedziału liczności partii odpowiadającemu $N = 2500$ podkładek i poziomu kontroli normalnej (II) ustalono znak literowy K.

Tabela 1. Znaki literowe liczności próbek

Liczność partii	Specjalne poziomy kontroli		Ogólne poziomy kontroli		
	S-3	S-4	I	II	III
2 ÷ 8	B	B	B	B	C
9 ÷ 15	B	B	B	B	D
16 ÷ 25	B	B	B	C	E
26 ÷ 50	B	B	C	D	F
51 ÷ 90	B	B	D	E	G
91 ÷ 150	B	C	E	F	H
151 ÷ 280	B	D	F	G	I
281 ÷ 500	C	E	G	H/I ¹⁾	J
501 ÷ 1200	D	F	H	J	K
1201 ÷ 3200	E	G	I	K	L
3201 ÷ 10000	F	H	J	L	M
10001 ÷ 35000	G	I	K	M	N
35001 ÷ 150000	H	J	L	N	P
150001 ÷ 500000	H	K	M	P	P
500001 i więcej	H	K	N	P	P

¹⁾ Stosować H dla liczności partii 281 do 400 oraz I - dla liczności partii 401 do 500.

Źródło: opracowanie na podstawie PN-ISO 3951:1997

Dla określonego znaku literowego K oraz AQL = 1,5 w tabeli 2 określono liczbę próbek $n = 19$ oraz parametr planu badania $k = 1,79$.

Tabela 2. Plany jednostopniowe stosowane podczas kontroli normalnej (tablica podstawowa):
metoda „σ”

Znak literowy liczności próbki	Akceptowane poziomy jakości (kontrola normalna)																					
	0,10		0,15		0,25		0,40		0,65		1,00		1,50		2,50		4,00		6,50		10,00	
	n	k	n	k	n	k	n	k	n	k	n	k	n	k	n	k	n	k	n	k	n	k
B	↓																					
C	↓																					
D	↓																					
E	↓																					
F	↓																					
G	4	2,39	4	2,30	4	2,14	5	2,05	5	1,88	6	1,78	6	1,62	7	1,45	8	1,28	9	1,07	11	0,877
H	5	2,46	5	2,34	6	2,23	6	2,08	7	1,95	7	1,80	8	1,68	9	1,49	10	1,31	12	1,11	14	0,906
I	6	2,49	6	2,37	7	2,25	8	2,13	8	1,96	9	1,83	10	1,70	11	1,51	13	1,34	15	1,13	17	0,924
J	8	2,54	9	2,45	9	2,29	10	2,16	11	2,01	12	1,88	14	1,75	15	1,56	18	1,38	20	1,17	24	0,964
K	11	2,59	12	2,49	13	2,35	14	2,21	16	2,07	17	1,93	19	1,79	22	1,61	25	1,42	29	1,21	33	0,995
L	16	2,65	17	2,54	19	2,41	21	2,27	23	2,12	25	1,97	28	1,84	32	1,65	36	1,46	42	1,24	49	1,03
M	22	2,69	23	2,57	25	2,43	27	2,29	30	2,14	33	2,00	36	1,86	42	1,67	48	1,48	55	1,26	64	1,05
N	31	2,72	34	2,62	37	2,47	40	2,33	44	2,17	49	2,03	54	1,89	61	1,69	70	1,51	82	1,29	95	1,07
P	42	2,73	45	2,62	49	2,48	54	2,34	59	2,18	65	2,04	71	1,89	81	1,70	93	1,51	109	1,29	127	1,07

Źródło: opracowanie na podstawie PN-ISO 3951:1997

Do badania według planu badania $(n_\sigma-k)=$
(19-1,79) wylosowano próbkę podkładek i dokonano
pomiaru ich grubości (tab. 3).

$$DWG + k \cdot \sigma \leq \bar{X} \leq GWG - k \cdot \sigma \quad (5)$$

$$4,95 + 1,79 \cdot 0,01 \leq 5,031 \leq 5,05 - 1,79 \cdot 0,01$$

Tabela 3. Wyniki pomiarów grubości podkładek
w próbce [mm]

5,035	5,040	5,011	5,022	5,046
5,023	5,032	5,046	5,036	5,025
5,030	5,024	5,033	5,035	5,024
5,039	5,041	5,020	5,029	

Obliczona wartość średnia grubości podkładek
w próbce wyniosła $\bar{X} = 5,0311$ mm.

Badanie warunku przyjęcia partii dokonano na
podstawie wzoru 5:

$$4,968 \leq 5,031 \leq 5,032 \quad (6)$$

Relacja (6) stanowiła podstawę do podjęcia
decyzji o przyjęciu, diagnozowanej jakości partii
podkładek, i zwolnienia jej z produkcji.

W celu upewnienia się, że przyjęte założenia
o normalności rozkładu wartości grubości podkładek
są zasadne, przeprowadzono test normalności
rozkładu metodą graficzną z wykorzystaniem siatki
RN.

Zbiór wyników pomiarów grubości podkładek
znajdujących się w próbce (tab. 3) uporządkowano
w postaci statystyk pozycyjnych według wzoru 3,
które przedstawiono w kolumnie 1 i 3 tabeli 4.

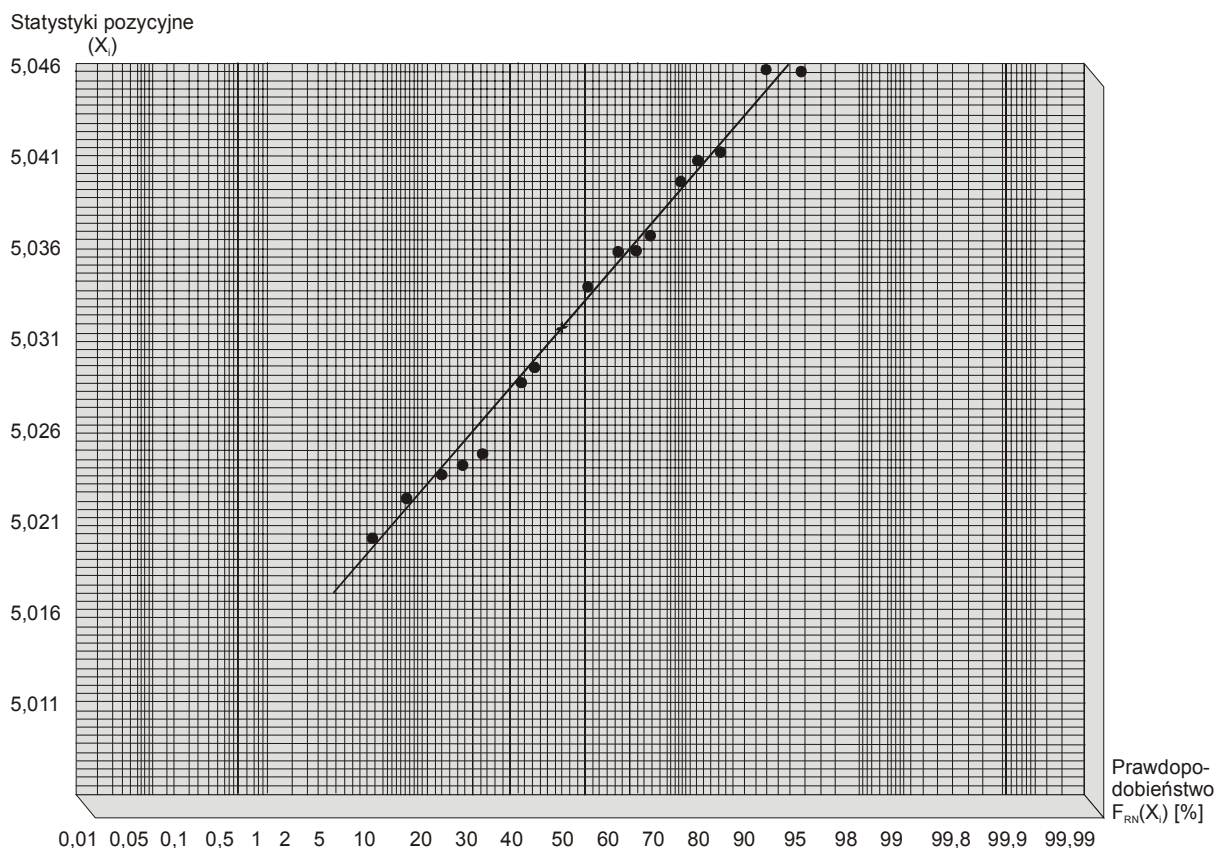
Tabela 4. Zestawienie statystyk pozycyjnych i wartości prawdopodobieństw
ich wystąpienia

Statystyki pozycyjne w pobranej próbce podkładek X_i	Wartości prawdopodobieństwa $F(X_i)$	Statystyki pozycyjne w pobranej próbce podkładek X_i	Wartości prawdopodobieństwa $F(X_i)$
1	2	3	4
5,011	0,05	5,033	0,55
5,020	0,10	5,035	0,60
5,022	0,15	5,035	0,65
5,023	0,20	5,036	0,70
5,024	0,25	5,039	0,75
5,024	0,30	5,040	0,80
5,025	0,35	5,041	0,85
5,029	0,40	5,046	0,90
5,030	0,45	5,046	0,95
5,032	0,50		

Wykres prostej rozkładu na siatce RN przedstawiono na rysunku 5.

Przedstawione na rysunku 5 punkty $[F_{RN}(X_i), X_i]$ są praktycznie dobrze skorelowane z prostą RN,

zatem można przyjąć założenie, że rozkład badanej cechy podkładek dystansowych ma charakter RN.



Rys. 5. Zastosowanie siatki RN do testu normalności rozkładu pomiarów grubości podkładek w pobranej próbce

6. STOSOWANIE METODY GRAFICZNEJ W SKO Z OCENĄ LICZBOWĄ

Przy braku odpowiedniej bazy komputerowej w celu stwierdzenia zgodności partii wyrobów z wymaganiami jakościowymi można wykorzystać proste metody graficzne.

Metody te są mniej precyzyjne od obliczeniowych, nie mniej jednak ich zastosowanie ogranicza ilość niezbędnych w procedurach analitycznych obliczeń i przyspiesza proces oceny partii wyrobów. Aby zapewnić dokładność oceny należy precyzyjnie odczytywać dane z wykresów.

Wyróżnia się **metodę graficzną s**, gdy odchylenie standardowe nie jest znane przed badaniem oraz **metodę graficzną σ** , gdy odchylenie standardowe badanej partii jest znane i utrzymuje się na stałym poziomie. Sposób postępowania w ocenie jakości partii metodą graficzną σ , określa algorytm przedstawiony na rysunku 6.

Wartość MPSD otrzymuje się, mnożąc f_σ przez różnicę między górną GWG a dolną DWG granicę tolerancji, to jest (7):

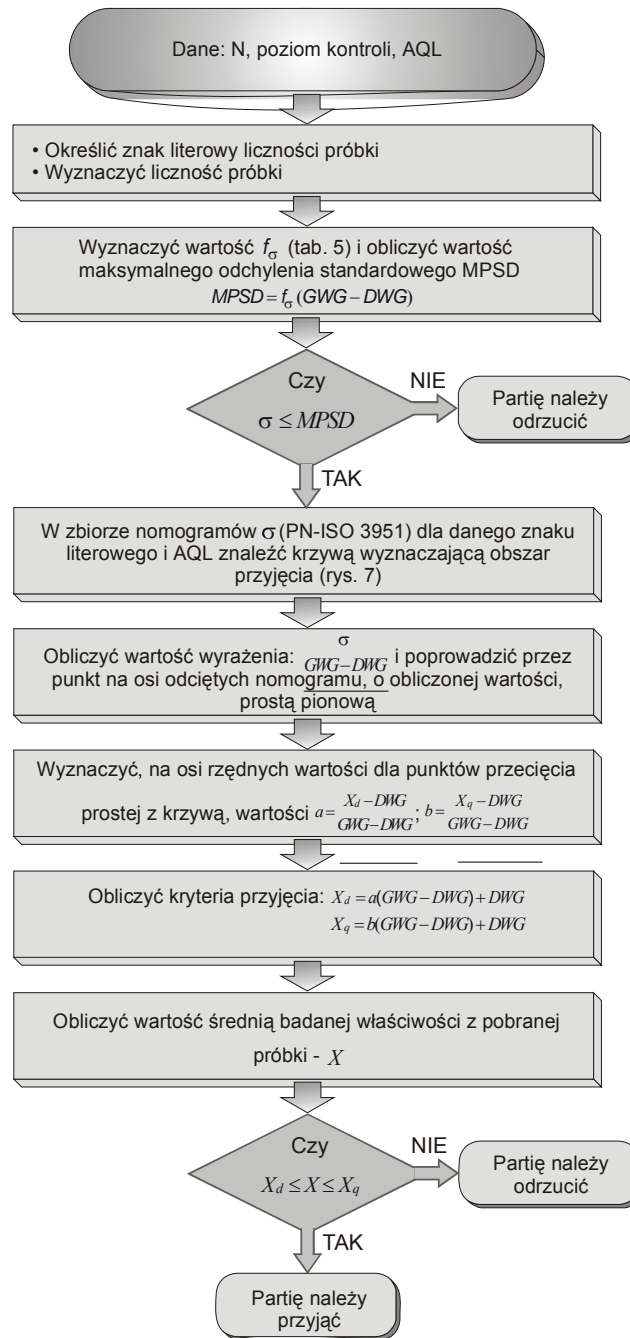
$$MPSD = f_\sigma (GWG - DWG) \quad (7)$$

Wartość MPSD wskazuje największą dopuszczalną wartość odchylenia standardowego procesu. Jeśli odchylenie standardowe procesu jest mniejsze niż wartość MPSD, to istnieje możliwość, lecz nie pewność, że partia zostanie uznana za zgodną z wymaganiami.

Dla danych z przykładu przedstawionego w pkt. 5:

- wyznaczamy z tabeli 5 wartość $f_\sigma = 0,206$ (AQL 1,50);
- obliczamy wartość $MPSD = f_\sigma (GWG - DWG) = 0,206 \cdot 0,1 = 0,0206$, ponieważ $\sigma \leq MPSD$ przechodzimy do dalszych badań;
- obliczamy wartość standaryzowaną σ (8):

$$\frac{\sigma}{GWG - DWG} = \frac{0,01}{5,05 - 4,95} = 0,1, \quad (8)$$

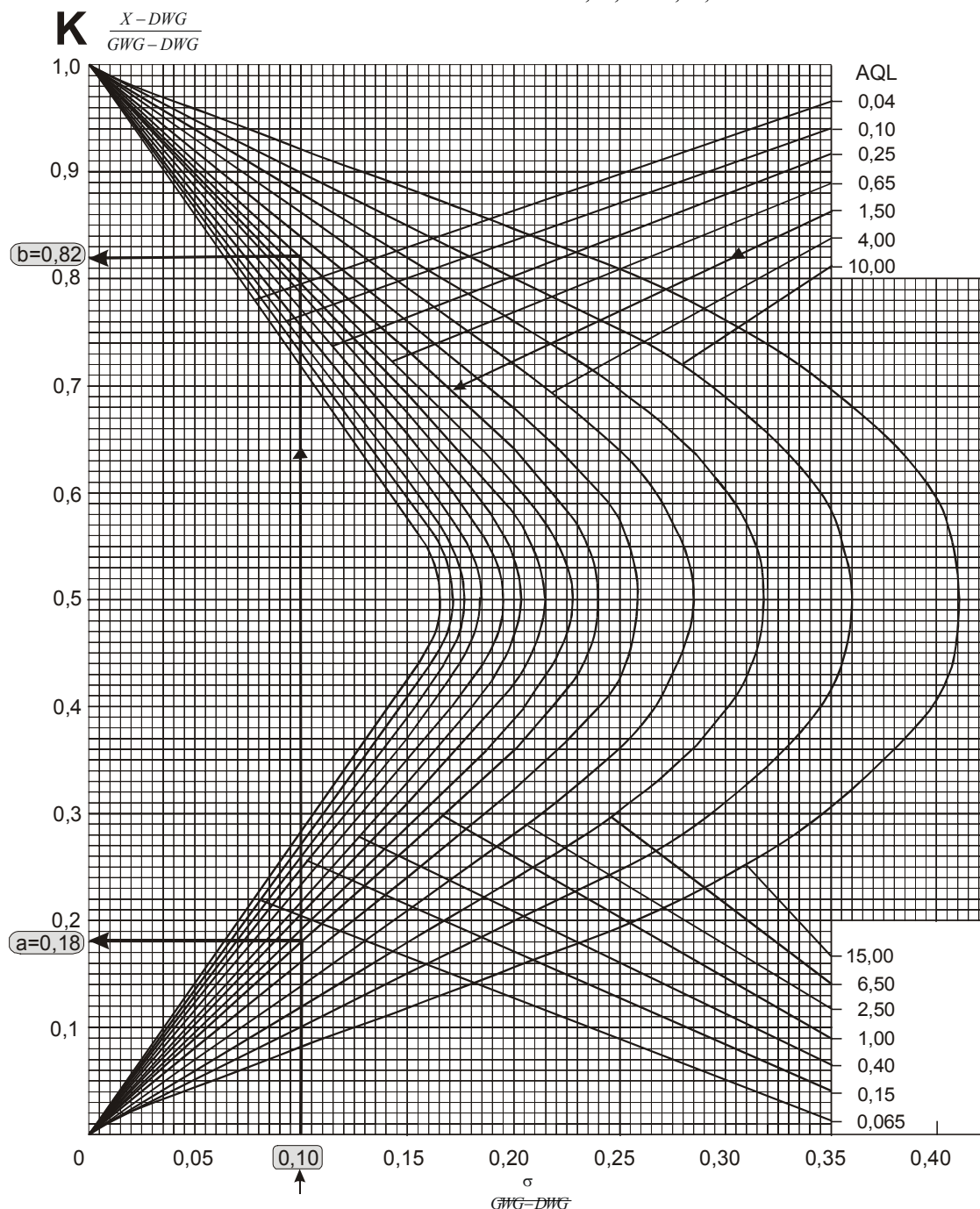
Rys. 6. Algorytm postępowania w metodzie graficznej σ Tabela 5. Wartości f_σ dla maksymalnego odchylenia standardowego procesu (MPSD): metoda „ σ ”

Akceptowane poziomy jakości (kontrola normalna) AQL												
	0,10	0,15	0,25	0,40	0,65	1,00	1,50	2,50	4,00	6,50	10,00	
0,147	0,152	0,157	0,165	0,174	0,184	0,194	0,206	0,223	0,243	0,271	0,304	0,347
0,10	0,15	0,25	0,40	0,65	1,00	1,50	2,50	4,00	6,50	10,00		
Akceptowane poziomy jakości (kontrola obostrzona) AQL												
	0,10	0,15	0,25	0,40	0,65	1,00	1,50	2,50	4,00	6,50	10,00	
Akceptowane poziomy jakości (kontrola ulgowa) AQL												

Źródło: opracowanie na podstawie PN-ISO 3951:1997

- wyznaczamy z nomogramu σ -K (rys. 7) wartości a i b z przecięcia prostej o współrzędnej

$$\frac{\sigma}{GWG - DWG} = 0,1 \text{ i krzywej K, dla AQL} = 1,5, a = 0,18, b = 0,82;$$



Rys. 7. Nomogram - σ - K. Źródło: opracowanie na podstawie PN-ISO 3951:1997

- obliczamy wartości kryteriów przyjęcia \bar{X}_d i \bar{X}_q :

$$\bar{X}_d = a(GWG - DWG) + DWG = 0,18 \cdot 0,1 + 4,95 = 4,968$$

$$\bar{X}_q = b(GWG - DWG) + DWG = 0,82 \cdot 0,1 + 4,95 = 5,032;$$

- badamy warunki (9):

$$\bar{X}_d \leq \bar{X} \leq \bar{X}_q$$

(9)

ponieważ $4,968 \leq 5,031 \leq 5,032$ to partię wyrobów należy przyjąć.

Jeżeli prosta o współrzędnej $\frac{\sigma}{GWG - DWG}$ nie przecina krzywej to dla danego znaku literowego i określonej wadliwości i przyjętych założeń nie ma planu badania.

W podobny sposób jak dla metody σ można ustalać plany badania dla metody s wykorzystując odpowiednie nomogramy normy PN-ISO 3951:1997.

7. PODSUMOWANIE

Przedstawione, w artykule [1] i pkt. 5, przykłady oceny jakości partii tłoczonych podkładek dystansowych metodą alternatywną i metodą liczbową ujawniły istotny fakt, a mianowicie znaczące obniżenie liczności pobieranych do badań próbek w metodzie z oceną liczbową w porównaniu do metody z oceną alternatywną. Spostrzeżenie to ma charakter ogólny i można je odnieść dla wszystkich poziomów kontroli (tab. 6).

Z zestawienia sporządzonego w tabeli 6 wynika, że liczności próbek pobieranych do SKO z oceną liczbową są od 4 do 8 razy mniejsze w porównaniu z SKO z oceną alternatywną. Daje to możliwości dokonania dużych oszczędności w diagnostowaniu jakości partii metodą SKO, jeżeli prowadzi się ją według oceny liczbowej.

Metoda kontroli / Metoda oceny	Ulgowy	Normalny	Obostrzony
Alternatywna	20	125	200
Liczbowa	5	19	25
Stosunek liczności próbek	4 : 1	7 : 1	8 : 1

Tabela 6. Zestawienie liczności próbek do badań

Wynika z tego wniosek, że zawsze gdy jest to możliwe należy przeprowadzać SKO z oceną liczbową.

8. LITERATURA

- [1] Szkoda J.: Diagnostowanie jakości partii wyrobów metodą statystycznej kontroli odbiorczej z oceną alternatywną. *Diagnostyka* Vol. 26, 2003, str. 26.
- [2] Szkoda J.: Zarządzanie jakością w procesach realizacji maszyn i urządzeń technicznych. Wyd. Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Olsztyn, 2002.



Prof. dr hab. inż. Jerzy SZKODA jest pracownikiem naukowym Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie oraz Wojskowego Instytutu Techniki Pancernej i Samochodowej w Sulejówku. Jest członkiem Sekcji Podstaw Eksploatacji KBM Polskiej Akademii Nauk, Polskiego Towarzystwa Naukowego Motoryzacji. Jego zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia dotyczące eksploatacji maszyn i urządzeń technicznych oraz systemów zarządzania jakością i sterowania jakością produkcji maszyn.

DIOKSYNY W OLEJU SILNIKOWYM

Bogdan ŻÓŁTOWSKI

ATR Bydgoszcz

e-mail: bogzol@mail.atr.bydgoszcz.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono podstawowe informacje w zakresie szkodliwego działania dioksyn i furanów, szczególnie w aspekcie zanieczyszczenia środowiska naturalnego oraz szkodliwego ich działania na organizm ludzki. Analizując możliwe przyczyny i źródła ich powstawania zwrócono uwagę na powstawanie dioksyn w silnikach spalinowych. Zaproponowano w tym względzie nowe narzędzia badania dioksyn w oleju silnikowym.

Słowa kluczowe: badania dioksyn, spektroskopia, stan zagrożenia.

DIOKSYNY IN ENGINE MOTOR OIL

Summary

If the basic information in running were introduced was in range harmful the rule the dioksyn and furanes, particularly in aspect of dirt of natural medium as well as the harmful rule on human organism. Possible causes and source of their formation analysing were turned the attention on formation the dioksyn in explosion engines. The new tools of audit were proposed in this regard the dioksyn in engine motor oil.

Keywords: study of dioksyne, spectroscopy, state of emergency.

1. WPROWADZENIE

Zanieczyszczenie środowiska szkodliwymi związkami chemicznymi powoduje coraz bardziej zauważalne pogarszanie stanu zdrowia ludzi i zwierząt. Działanie niektórych związków chemicznych, obcych do tej pory naturze, na system rozrodczy ludzi i zwierząt grozi stałym obniżaniem się zdolności prokreacyjnych.

Udowodniono [Grochowalski, 2000], że dioksyny oraz PCBs (polichlorowane bifenyle) mają bezpośredni wpływ na zakłócenie systemu hormonalnego oraz replikację kodu genetycznego. Dioksyny i furany powstają gdy chlor łączy się z innymi chemikaliami w wysokich temperaturach.

Dzięki wyjątkowej zdolności obronnej organizm ludzki dostosowuje się szybko do zachodzących zmian jakościowych i ilościowych w środowisku. Nie zawsze jednak system obronny człowieka jest **bezpieczny**, co wskazuje na potrzebę uszczelniania człowieka od zagrożeń.

W tej pracy przytoczono **główne** dane z zakresu badania dioksyn i furanów, skupiając się na nowej metodyce badania tych zagrożeń w kręgu problemów technicznych.

2. CHARAKTERYSTYKA ZAGROŻEŃ

Toksyczne działanie dioksyn polega na powolnym ale skutecznym uszkodzeniu

rozmnażających się komórek w organizmach żywych. Substancje te uszkadzając kod DNA są mutagenami.

Dioksyny są wspólną nazwą polichlorowanych dibenzo-para-dioksyn i polichlorowanych dibenzo-furanów (rys.1). Ponieważ atomy chloru mogą zajmować dowolne pozycje w cząsteczkach istnieje 75 kongenerów dioksyn i 135 kongenerów furanów.

W celu określenia potencjalnej toksyczności badanych próbek w rutynowo prowadzonych analizach chemicznych wymagane jest oznaczenie siedemnastu najbardziej toksycznych kongenerów. Poziom toksyczności oznacza się ze wzoru [2]:

$$TEQ = \sum_{i=1}^{i=17} m_i \times TEF_i + \sum_{j=1}^{j=12} (m_j \times TEF_j)$$

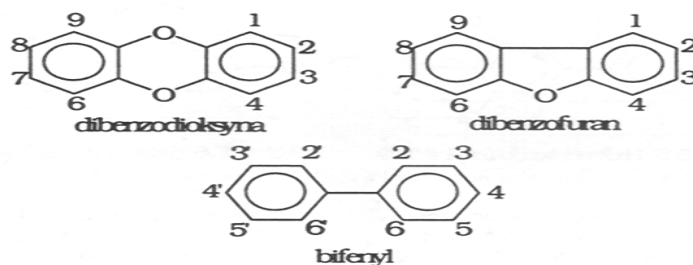
gdzie: m_i – masa pojedynczego kongeneru; TEF_i , TEF_j – współczynniki równoważne toksyczności badanego kongeneru w odniesieniu do najbardziej toksycznych [2,7].

Źródłami szkodliwych dioksyn w środowisku są głównie zakłady chemiczne (przetwarzające związki chloru), zakłady papiernicze, spalarnie odpadów komunalnych, przemysłowych i szpitalnych, huty żelaza i metali kolorowych, przetwórnice surowców wtórnych, instalacje energetyczne oraz **silniki samochodowe**.

Proces tworzenia się dioksyn (powstających w sposób naturalny) oraz podczas

gospodarowania odpadami najbardziej poznano w procesach spalania. Wystarczą śladowe ilości

chlorku na etapie spalania by powstały szkodliwe dioksyny, które nie zostają zniszczone.



Rys. 1. Budowa cząsteczek dioksyny i furanu z zaznaczonymi pozycjami atomów wodoru, które mogą być zastąpione atomami chloru

Dioksyny i furany są wysoce toksycznymi produktami ubocznymi wielu operacji przemysłowych, **takich jak spalanie lub spopielenie** opon, węgla i oleju, produkcja papieru i niektórych pestycydów, wytop metali i być może spalanie paliw w silniku diesel'a.

Te wszystkie źródła emitują razem około 14 kg dioksyn jakiego każdego roku powstają w USA, ale ilość dioksyn opadająca na powierzchnię USA każdego roku jest znacznie większa - szacowana na od 20 do 50 kilogramów. Oczywiście niektóre ważne źródła dioksyn nie zostały jeszcze zidentyfikowane. Dioksyny mogą być też przenoszone z innych krajów przez wiatr, czego dokładnie jeszcze nie stwierdzono.

Okres półżycia dioksyn w organizmach ludzkich wynosi około 5,8 – 7 lat. Okres półżycia jest to okres niezbędny do wydalenia z organizmu połowy aktualnej dawki dioksyny. Zatem zawartość dioksyny w naszych organizmach wzrasta wraz z wiekiem.

3. GROŹNE DIOKSYNY

Spośród ogółu społeczeństwa, niektórzy ludzie otrzymują niższą niż przeciętną dawkę dioksyn, a inni wyższą. Niektórzy bardziej narażeni członkowie populacji mogą ponosić ryzyko kilku przeciętnych efektów, włączając rozwijającą się toksyczność, obniżoną zdolność rozrodczą mężczyzn wynikającą ze zmniejszonej ilości spermy, większego prawdopodobieństwa niskiego wzrostu u kobiet, zmniejszonej zdolności do sprostanienia zagrożeniom systemu immunologicznego i innych.

Przeciętna ilość dioksyny u Amerykanów wynosi 9 nanogramów na kilogram (ng/kg) wagi ciała (nanogram jest miliardową częścią grama).

Natura produkuje tylko małe ilości dioksyny. Zdecydowana większość dioksyny powstaje w wyniku działalności ekonomicznej ludzi. Od około 1920 r. emisja przemysłowa oraz nie zwracanie uwagi na silne skutki toksyczne dioksynopodobnych chemikaliów spowodowało szerokie zniszczenie środowiska znaczącymi

ilościami dioksyn, furanów i PCB. Obecność dioksynopodobnych związków w środowisku pojawia się przede wszystkim w wyniku działalności przemysłu. W efekcie wszyscy jedzą i wdychają małe, lecz znaczące ilości dioksyny każdego dnia.

Dioksyny opadają z atmosfery na ląd i wodę i są następnie (pośrednio) wprowadzane do łańcucha pokarmowego, lub dostają się bezpośrednio do sieci wodnej, a stamtąd do łańcuch żywnościowego. Ponad 90% dioksyn w naszych organizmach dostaje się tam z pożywieniem. Głównym źródłem dioksyny u ludzi jest mięso, ryby oraz produkty mleczarskie, chociaż inhalacja może być istotnym źródłem w pobliżu niektórych źródeł emisji, jak na przykład krematoria.

Przepracowany olej silnikowy dodawany jako spoiwo do pasz zwierzęcych jest źródłem szkodliwych dla człowieka dioksyn. Nowoczesne metody badania olejów silnikowych za pomocą spektrografii masowej umożliwiają ocenę tych zagrożeń.

4. UZASADNIENIE BADAŃ OLEJÓW SILNIKOWYCH

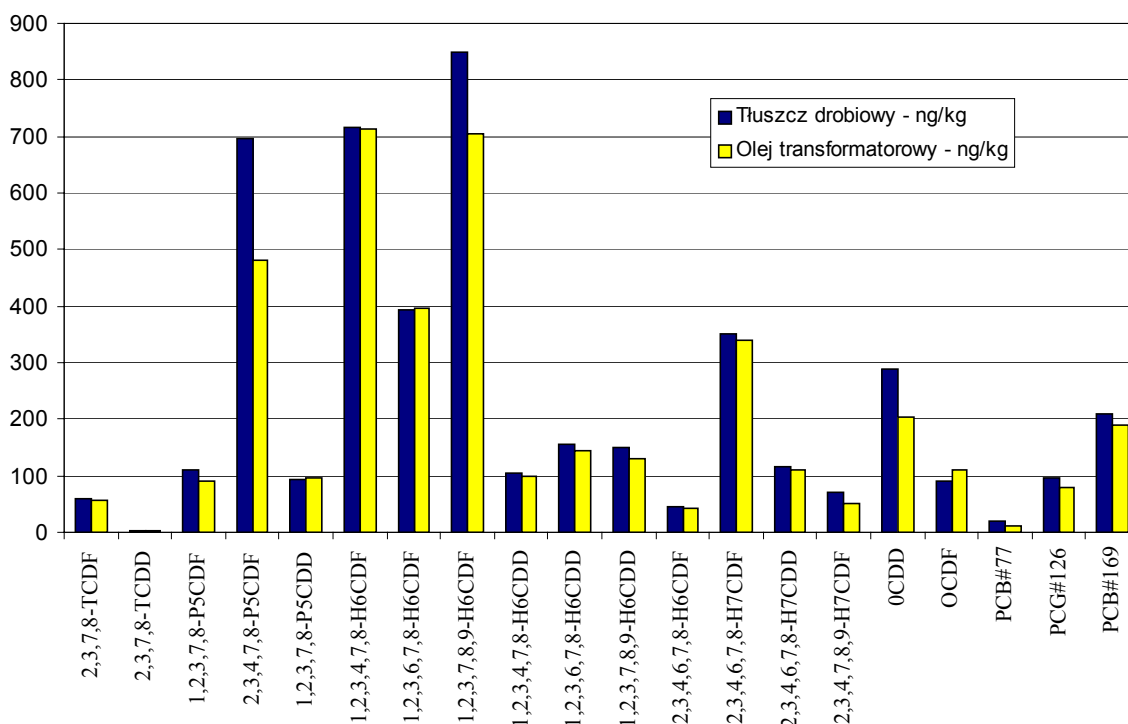
Potrzebę badań olejów silnikowych pod względem zawartości dioksyn wywołało skażenie paszy dla kurcząt w Belgii. Informacja o źródle skażenia paszy do karmienia kurcząt w okresie luty – marzec 1999r. została szeroko nagłośniona w prasie. Źródłem skażenia miał być przepracowany olej silnikowy wykorzystywany jako lepiszcze tej paszy. Informacja ta wymaga sprawdzenia metodami dostępnymi w laboratoriach, tym bardziej, że wiele opracowań z tego obszaru badań podaje, że przepracowane oleje silnikowe zawierają jedynie śladowe stężenie dioksyn [2].

Badania próbek świeżego oleju silnikowego, jak i oleju zużytego po przebiegu 15000 km wykazały obecność dioksyn w stężeniu na poziomie, jaki występuje w tłuszczu z nie skażonych produktów żywnościowych. Olej po

przebiegu 15000 km zawiera tyle dioksyn co tłuszcz rybny.

Badania dioksyn oleju transformatorowego wskazały na duże prawdopodobieństwo, iż to

właśnie on był przyczyną powstania dioksyn, groźnych dalej dla ludzi (rys.2).



Rys. 2. Stężenia 17 kongenerów w próbce tłuszczu drobiowego z mięsa „kurcząt belgijskich” oraz w użytym oleju transformatorowym [2]

Wyjaśnianie „afery belgijskiej” w wielu badaniach jednoznacznie wskazało na użycie do paszy drobiowej oleju transformatorowego, co jednak pozostawia niepokój co do zagrożeń związanych z olejami silnikowymi.

5. ANALIZA SPEKTROSKOPOWA

Dotychczasowe metody badania i analizy dioksyn oparte były na metodach chromatografii gazowej w sprzężeniu ze spektrometrią mas z tzw. wielostopniową fragmentacją oznaczanej cząsteczki związku chemicznego. Stanowi to alternatywę do wysokorozdzielczej spektrometrii masowej w analizie śladowej.

W tej pracy zaproponowano wykorzystanie do badań dioksyn w oleju silnikowym spektroskopii masowej w podczerwieni [1,5,6].

Spektroskopia jest działem fizyki atomowej i jądrowej oraz chemii atomowej badającej struktury energetyczne cząsteczek, atomów, jąder atomowych i cząstek elementarnych poprzez obserwację i analizę rozkładu energii (widm) promieniowania emitowanego, pochłanianego lub rozpraszanego przez dany obiekt fizyczny [6].

Spektroskopia dzieli się wg rodzaju badanego promieniowania na: radiospektroskopie i

spektroskopie optyczną (z podziałem na spektroskopie promieniowania podczerwonego, spektroskopie światła widzialnego i spektroskopie promieniowania ultrafioletowego, spektroskopie rentgenowską, spektroskopie promieniowania gamma, spektroskopie promieniowania beta, spektroskopie promieniowania alfa, spektroskopie neutronową).

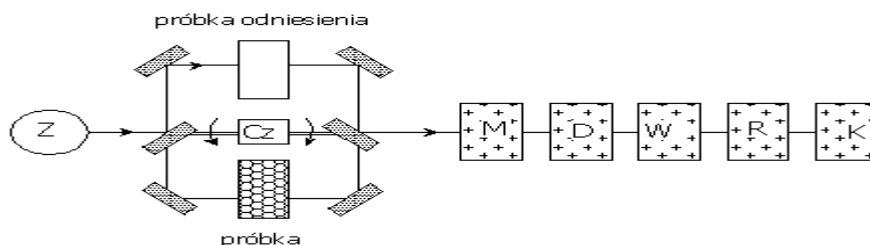
Analiza spektroskopowa prowadzona jest w dwóch kierunkach: badania jakościowe widm (struktura chemiczna i fizyczna) i badania ilościowe (natężenie promieniowania w funkcji stężenia)[5].

Spektrometria w podczerwieni (ang. *infrared* - IR) jest metodą opartą na absorpcji promieniowania podczerwonego przez oscylujące cząsteczki. Mimo, że promieniowanie IR zostało wykryte w początkach ubiegłego wieku (F.N.Herschel, 1800), a pierwsze prace dotyczące absorpcji promieniowania IR ukazały się z początkiem obecnego wieku (Coblentz, 1905), to właściwy rozwój tej metody nastąpił w latach pięćdziesiątych [5,6].

Nowe możliwości pomiarowe stworzyło wprowadzenie spektrometrii IR z transformacją Fouriera w latach siedemdziesiątych i komputeryzacja urządzeń pomiarowych w latach osiemdziesiątych.

W spektrometrii w podczerwieni stosuje się zazwyczaj skalę liczb falowych (cm^{-1}), rzadziej

skalą długości fali (μm). Promieniowanie podczerwone obejmuje szerszy zakres długości fali aniżeli promieniowanie UV – VIS. Zakres podczerwieni dzieli się na trzy obszary: bliską, średnią i daleką podczerwień. Podział ten wynika nie tylko z różnicy w naturze zjawisk obserwowanych w trzech różnych zakresach, a w każdym przypadku bada się widmo oscylacyjne. Wiąże się to z zastosowaniem różnych



Rys. 3. Schemat dwuwiązkowego spektrofotometru IR; Z — źródło promieniowania, Cz — czopki, M — monochromator, D — detektor, W — wzmacniacz, R — rejestrator, K — komputer [1,6]

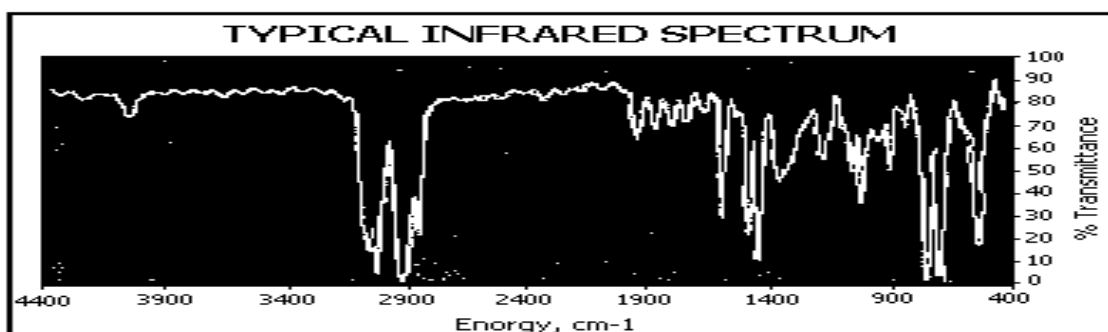
Spektroskopia fourierowska umożliwia badanie procesów niskoenergetycznych (np. ruchów translacyjnych i rotacyjnych molekuły w sieci krystalicznej). Znajduje zastosowanie w analizie drgań molekuł w fizyce chemicznej i astrofizyce. FTIR sprzężona z termograwimetrią (TG/FTIR) służy do analizy gazów wydzielających

rodzajów źródeł promieniowania, detektorów i materiałów optycznych w spektrometrach.

Widma oscylacyjne cząsteczek bada się za pomocą spektrometrów na podczerwień. Współczesne spektrometry IR są urządzeniami skomplikowanymi, bogato wyposażonymi w urządzenia elektroniczne i komputery, które sterują procesem pomiarowym i służą do przetwarzania i analizowania widm (rys.3).

się podczas ogrzewania tworzyw sztucznych.

Widmo IR cząstki prezentowane jest w formie wykresu obrazującego natężenie względne promieniowania przepuszczalnego przez cząsteczkę (transmitancję) w stosunku do zarejestrowanego zakresu widmowego ($E \propto \nu$ [cm^{-1}]) (rys.4).



Rys. 4. Widmo IR

W badanym zakresie widmowym cząsteczki ukazują się pasma absorpcji o różnej intensywności, niosące z sobą informacje strukturalne. Każde pasmo absorpcji odpowiada określonym jakościowo przejściom oscylacyjnym w obrębie cząsteczki wraz z ich częstościami wyrażonymi liczbą falową.

Badania cząstek wieloatomowych posiadających różne grupy funkcyjne wykazały, że ich częstości absorpcji są stałe. Widmo IR związków organicznych można podzielić na trzy zakresy [5,6]:

- 4000-1300 cm^{-1} – specyficzne grupy funkcyjne i typ wiązań;
- 1300-909 cm^{-1} – zakres „odcisku palca” (finger print region);
- 909-650 cm^{-1} – zakres substancji pierścieni aromatycznych.

Widmo IR jest właściwością charakterystyczną dla danego związku chemicznego i dlatego wykorzystuje się je do identyfikacji związków. Zebrany dotychczas bogaty materiał doświadczalny pozwala na przypisanie poszczególnym grupom funkcyjnym ściśle określonych obszarów, w których występują charakterystyczne dla nich pasma absorpcyjne.

Jak dotychczas technika spektroskopii w podczerwień jest analizą uzupełniającą, która umożliwia:

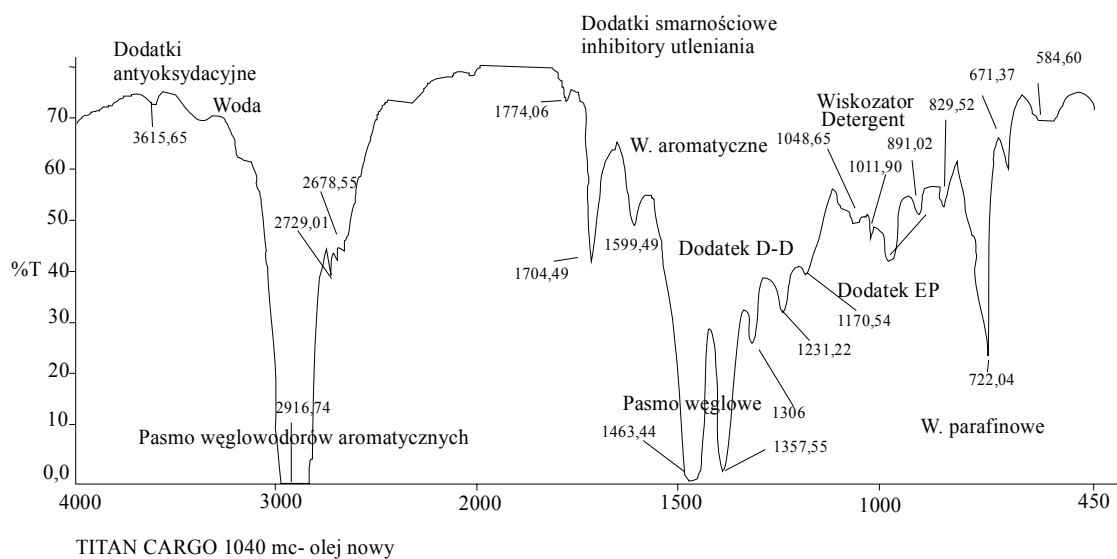
- identyfikację oleju bazowego (olej mineralny, polialfaolefiny (PAO), olej estrowy),
- określenie kompatybilności olejów, doboru zamienników,
- określenie dodatków uszlachetniających i ich udział w stosunku do oleju świeżego,
- detekcję procesów (np. oksydacji, nitrogenizacji, sulfatyzacji),

- detekcję domieszek i zanieczyszczeń (np. woda, paliwo, substancja mineralna itp.).

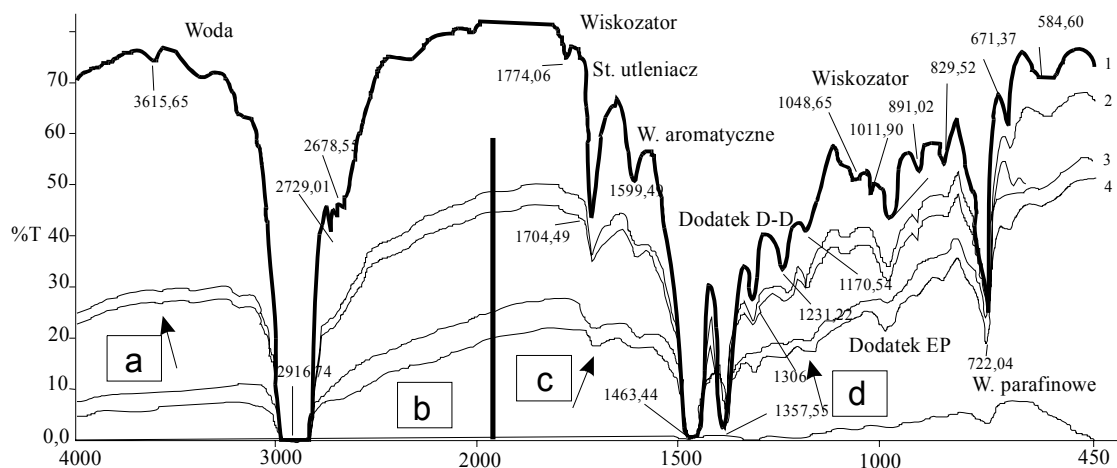
Widmo IR jest właściwością charakterystyczną dla danego związku chemicznego i dlatego wykorzystuje się je do identyfikacji związków. Zebrany dotychczas bogaty materiał doświadczalny pozwala na przypisanie poszczególnym grupom funkcyjnym ściśle określonych obszarów, w których występują charakterystyczne dla nich pasma absorpcyjne. Widmo związku daje możliwość stwierdzenia identityczności substancji badanej ze wzorcem.

6. ANALIZA SKŁADU OLEJÓW SILNIKOWYCH

Każdy olej posiada swój specyficzny skład. Do oceny jakości oleju metodą spektroskopową niezbędna jest znajomość wiedzy z zakresu chemii (budowa związków itp.) oraz jakie czynniki wpływają na zmianę własności oleju. Oceniając olej metodą spektroskopową musimy znać położenie poszczególnych związków chemicznych na widmie FT-IR. Do tego celu służy tabela, która pozwala na przypisanie poszczególnym grupom funkcyjnym ściśle określonych obszarów, w których występują charakterystyczne dla nich pasma absorpcyjne dla olejów świeżych (rys.5).



Rys. 5. Położenie poszczególnych grup funkcyjnych w widmie FT-IR



- 1 - TITAN CARGO 1040 mc- olej świeży
- 2 - TITAN CARGO 1040 mc, olej przetworzony - 4 tys. km
- 3 - TITAN CARGO 1040 mc, olej przetworzony - 5 tys. km
- 4 - TITAN CARGO 1040 mc, olej przetworzony - 10 tys. km

Analiza Widma FT-IR

Rys. 6. Widmo świeżego i przetworzonego oleju TITAN CARGO MC

Widmo FT-IR podczerwieni testowanego oleju pokazuje (rys.6) zanik piku (a) 3640 cm^{-1} (dodatku anty utleniającego) oraz bardzo małe piki (c) $1500\text{--}1774\text{ cm}^{-1}$ (St. Utleniania, D-D, wiskozator, uszczuplenie węglowodorów aromatycznych - te zwykle wąskie piki poszerzają się oraz zaokrągłają, co jest wynikiem oksydacji i nitrogenizacji).

Zanik pików (d) $1000\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ sugeruje nam obecności glikolu w oleju silnikowym.

Zagęszczenie oleju spowodowane zawartością sadzy jest częstym zjawiskiem w silnikach Diesla. Do określenia zawartości sadzy, punkt (b), w oleju możemy posłużyć się metodą DIN51452, która wykorzystuje widmo FT-IR. W tym konkretnym przykładzie olej kwalifikuje się do natychmiastowej wymiany.

Widmo FT-IR pozwala na regularną rejestrację zmian oleju silnikowego a także wyrywkowe porównanie z innymi właściwościami fizyko - chemicznymi oraz wyznaczenie dopuszczalnych wartości granicznych odnoszących się do pików poszczególnych partii widma.

Badania należy kontynuować w kierunku oznaczeń ilościowych, charakteryzujących spadek zawartości dodatków uszlachetniających oraz postępujące w oleju procesy przeobrażeniowe takie jak: oksydacji, nitrogenizacji oraz sulfatyzacji.

Efektywne zastosowanie techniki FT-IR zostało już wprowadzone w praktyce (np. przemysł lotniczy, wojskowy, monitoring urządzeń precyzyjnych) przy użyciu odpowiedniego i łatwo dostępnego oprogramowania (Spectrum One for Windows Analyser).

Wdrożenie analizy FT-IR do badania dioksyn może w powodzeniem uzupełnić, a docelowo zastąpić tradycyjne metody monitoringu oleju silnikowego, znakomicie ograniczyć czas wykonania oznaczeń i interpretacji wyników, co będzie miało przełożenie na skuteczne przeciwdziałanie zagrożeniom.

7. ZAKOŃCZENIE

Bazując na studiach tradycyjnej toksykologii można stwierdzić, że związki szkodliwe jakimi są dioksyne są **ekstremalnie efektywne** w powodowaniu różnorodnych skutków zagrożeń środowiska.

Stanowi to **adekwatny dowód możliwości** wystąpienia zagrożeń ze strony dioksyn u ludzi w postaci wielu skutków.

Przepracowany olej silnikowy dodawany jako spoiwo do pasz zwierzęcych może być źródłem szkodliwych dla człowieka dioksyn.

Nowoczesne metody badania olejów silnikowych za pomocą spektrografii masowej umożliwiają ocenę tych zagrożeń.

W pracy przedstawiono możliwości i wstępną propozycję badań olejów silnikowych, przydatną do oceny zagrożeń ze strony dioksyn.

LITERATURA

- [1] Cygański A.: Metody spektroskopowe w chemii analitycznej. WNT, Warszawa 1997.
- [2] Grochowalski A.: Badania nad oznaczeniem polichlorowanych dibenzo-dioksyn, dibenzofuranów i bifenyli. Politechnika Krakowska, Monografia 272, Kraków 2000.
- [3] Schneider K.: Uszkodzenie płodu, a nie rak, jest pierwotnym zagrożeniem od dioksyny. New York Times, May 11, 1994, pp. A1, A20.
- [4] Rodricks J.: Skalkulowane ryzyka. (N.Y.: Cambridge University Press, 1994, pp. 219).
- [5] Woods Schndler L.: Zrozumienie systemu immunologicznego. NIH, Publikacja nr 88-529] (Bethesda, Md.: Narodowy Instytut Zdrowia, lipiec 1988).
- [6] Żółtowski B., Wojciechowski D.: Spektrometria w badaniach użytkowych. DIAG'04, Ustronie 2004.
- [7] Żółtowski B., Wojciechowski D.: Analiza spektralna oleju silnikowego. DIAG'04, Ustronie 2004.



Prof. dr hab. inż. Bogdan ŻÓŁTOWSKI, prof. zw. ATR w działalności naukowej zajmuje się problemami dynamiki maszyn, wibrodiagnostyki, diagnostyki technicznej, metrologii i eksploatacji pojazdów. Ma w swoim dorobku ogólnie około 320 publikacji, w tym 19 pozycji zwartych (własne i współautorskie), 41 publikacji naukowych, 155 publikacji naukowo-technicznych i konferencyjnych oraz 45 opracowań naukowo-technicznych. Jest członkiem Instytutu Badań Nieniszczących NDT (Anglia), członkiem Sekcji Podstaw Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn Polskiej Akademii Nauk (od 1989r.), członkiem Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej, członkiem Zespołu Diagnostyki SPE KBM PAN. Jest także redaktorem działowym Diagnostyki Technicznej w Zagadnieniach Eksploatacji Maszyn PAN, członkiem Rady Programowej wydawnictwa PTDT – *DIAGNOSTYKA* oraz członkiem Oddziału PAN w Lublinie. Wypromował 7 doktorów nauk technicznych, recenzuje prace promocyjne.

WYKORZYSTANIE SIECI NEURONOWYCH CP W WIBROAKUSTYCZNEJ DIAGNOSTYCE USZKODZEŃ PRZEKŁADNI ZĘBATEJ

Jacek DYBAŁA, Stanisław RADKOWSKI

Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Podstaw Budowy Maszyn
ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, fax: (0-22) 660-86-22, e-mail: jdybala@simr.pw.edu.pl, ras@simr.pw.edu.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono sposób zastosowywania neuronowego klasyfikatora zbudowanego na bazie sieci neuronowej z propagacją przeciwną w diagnostyce wibroakustycznej przekładni zębatej. Ponadto, w pracy przedstawiono unikalną metodę selekcji cech stanu obiektu opartą na geometrii przestrzeni obserwacji. W końcowej części artykułu przedstawiono jako przykład wyniki eksperymentu laboratoryjnego.

Słowa kluczowe: selekcja cech, klasyfikacja obrazów, sieci neuronowe, diagnostyka wibroakustyczna.

USE OF CP NEURAL NETWORK IN VIBROACOUSTIC DIAGNOSTICS OF TOOTHED GEARS FAILURE

Summary

The article presents a way of applying a neural classifier constructed on the basis of counter-propagation neural network in vibroacoustic diagnostics of toothed gears. Moreover, in the paper the unique feature selection method of object state is presented. This method is based on geometry of the observation space. In final unit of article the results of laboratory experiment are presented as example.

Keywords: feature selection, pattern classification, neural networks, vibroacoustic diagnostics.

1. WSTĘP

Rozwój techniczny i cywilizacyjny stwarza coraz to nowe zapotrzebowania na środki diagnostyczne umożliwiające skuteczny wgląd w przebieg procesów eksploatacyjnych coraz bardziej skomplikowanych pojazdów, maszyn i urządzeń. Poszukiwane są zwłaszcza nieinwazyjne metody diagnostyczne, obywające się bez ingerencji w strukturę lub normalną pracę badanego układu. Do takich metod, z całą pewnością, można zaliczyć diagnostykę wibroakustyczną wykorzystującą jako nośnik informacji sygnały dźwiękowe i drgania.

Każdy obiekt w danej chwili czasu znajduje się w pewnym określonym stanie. W praktyce pełne rozpoznanie stanu technicznego obiektu nie zawsze jest możliwe i konieczne. Godząc się z pewnym dopuszczalnym poziomem nieokreśloności stanu wprowadzamy ustaloną liczbę klas stanu odpowiadających rozróżnialnym stanom obiektu, czyli stanom, których rozpoznanie jest uzasadnione ze względu na dalsze postępowanie z obiektem. W takim wypadku rozpoznawanie stanu technicznego obiektu sprowadza się do klasyfikacji stanu rozumianej jako proces zaszeregowania stanu obiektu do odpowiedniej klasy stanu.

Stan obiektu opisany jest zbiorem chwilowych wartości cech (właściwości) stanu obiektu.

Uporządkowany ciąg N wartości cech stanu obiektu $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ nazywa się wektorem obserwacji stanu obiektu [10]. Z geometrycznego punktu widzenia, składowe wektora obserwacji stanu obiektu można traktować jako współrzędne definiujące punkt w N -wymiarowej przestrzeni obserwacji stanu obiektu. Punkt ten jest obrazem stanu obiektu. Każdy stan obiektu ma zatem swój obraz w przestrzeni obserwacji stanu obiektu a poszczególnym rozróżnialnym stanom obiektu odpowiadają w tej przestrzeni określone obszary. Celem procesu diagnostycznego jest więc określenie w jakim obszarze przestrzeni obserwacji znajduje się obraz stanu obiektu w chwili kontroli. Sklasyfikowanie obrazu stanu obiektu odpowiada zakwalifikowaniu stanu obiektu do określonej klasy stanu.

Problematyczne może być jednak określenie obszarów przestrzeni obserwacji odpowiadających poszczególnym rozróżnialnym stanom obiektu. Wymaga to bowiem znajomości relacji pomiędzy cechami stanu obiektu a rozróżnialnymi stanami obiektu. Niestety, powiązanie przyczynowo-skutkowe między stanem obiektu a cechą stanu nie zawsze jest znane w sensie analitycznym. W rzeczywistych obiektach jednoznaczne określenie takich zależności jest często istotnie utrudnione lub nawet niemożliwe, ze względu na brak wiedzy

o strukturze obiektu oraz niepełną i niepewną informację o przebiegu zjawiska czy procesu. Czasami wiadomo jedynie jak w określonym stanie obiektu „wygląda” wektor obserwacji stanu obiektu, lecz nie jest jasne dlaczego jego „wygląd” jest właśnie taki.

Z powodu występujących trudności z opisem matematycznym relacji diagnostycznych, atrakcyjnym narzędziem realizacji modułu klasyfikacyjnego (klasyfikatora) wydają się być sieci neuronowe, które nie wymagają podawania wprost procedur klasyfikacyjnych potrafią bowiem same je zbudować na podstawie ciągu uczącego, złożonego z obrazów stanu obiektu, dla których znane jest prawidłowe przyporządkowanie do rozróżnialnych stanów obiektu (programowanie przez uczenie). Klasyfikacja musi być wtedy poprzedzona fazą uczenia, która umożliwia uzyskanie informacji niezbędnej dla określenia procedur klasyfikacyjnych.

Skuteczność klasyfikacji zależy od umiejętnego doboru ciągu uczącego, ponieważ jedynie w nim zawarta jest informacja niezbędna dla określenia obszarów przestrzeni obserwacji odpowiadających poszczególnym rozróżnialnym stanom obiektu. Wynikają z tego określone wymogi co do jakości tego ciągu. Wybór obrazów stanu obiektu należących do ciągu uczącego powinien zapewniać jego reprezentatywność. Wszystkie możliwe istotne zdarzenia wpływające na zmianę jakości działania obiektu muszą być reprezentowane w zbiorze uczącym. W ciągu uczącym należy także odwzorować wszelkie warunki, które mogą panować w trakcie działania obiektu. Pożądane jest także zapewnienie w ciągu uczącym równomiernej reprezentacji poszczególnych rozróżnialnych stanów obiektu. Nie bez znaczenia jest również liczebność ciągu uczącego. Należy bowiem pamiętać o konieczności zapewnienia dostatecznej liczby obrazów uczących, które w wystarczającym stopniu wypełnią przestrzeń obserwacji stanu obiektu, tak aby możliwe było poznanie istniejącej topografii obszarów rozróżnialnych stanów obiektu i wierne odwzorowanie jej właściwości.

2. SELEKCJA CECH STANU

Stan techniczny rzeczywistych obiektów jest na ogół opisywany dużą liczbą cech stanu. Wykorzystanie wszystkich cech w procesie rozpoznawania stanu obiektu często nie jest ani możliwe, ani konieczne. Koszt praktycznej realizacji systemu diagnostycznego rośnie wraz z liczbą wykorzystywanych cech stanu obiektu. Różna jest również użyteczność diagnostyczna tych cech. W związku z tym wskazana jest ocena stopnia informatywności cech stanu i usunięcie tych cech, których udział w procesie rozpoznawania stanu jest niewielki.

Określone cechy stanu obiektu, istotne pod względem jednej klasyfikacji stanu, mogą być

nieprzydatne dla potrzeb innej klasyfikacji stanu. Często bowiem obserwowane relacje pomiędzy cechami stanu obiektu a rozróżnialnymi stanami obiektu nie są jednoznaczne (identyczny stan może przejawiać się w różny sposób, różne stany mogą przejawiać się w ten sam sposób). W takich przypadkach mówimy, że nie wszystkie cechy niosą interesującą nas informację o obiekcie. Zazwyczaj trudno jest dokonać niezależnej oceny użyteczności każdej cechy stanu obiektu, gdyż na ogół istotne informacje zawierają się we współwystępowaniu cech. W praktyce często mamy bowiem do czynienia z sytuacją, że pewien zestaw cech dostarcza istotnych informacji, podczas gdy każdy podzbiór tego zestawu cech informacji tych już nie zawiera. Często informacja o stanie obiektu zawarta jest nie tyle w zmienności bezwzględnych wartości poszczególnych cech stanu, co w zmianach relacji pomiędzy cechami stanu. W związku z tym cech nie należy oceniać ani wybierać całkiem niezależnie, lecz powinny być one oceniane w pewnych grupach (zestawach), wynikających z natury rozwiązywanego problemu. Często zdarza się również, że liczne cechy stanu obiektu nie są od siebie odizolowane, lecz zachodzą między nimi pewne zależności. Wówczas cechy te dostarczają na różne sposoby tych samych informacji. W przypadku, kiedy między cechami występują związki korelacyjne, wystarczy posługiwać się pewnym ich podzbiorem czyli wybrać spośród dostępnych cech odpowiednią reprezentację, tak zbudowaną, by wśród nich nie było już nadmiarowych (redundantnych) cech.

Ograniczenie liczby wykorzystywanych cech może bardzo silnie wpłynąć na efektywność procesu rozpoznawania. Wykorzystanie tylko kilku z pośród potencjalnie nieskończenie wielu cech stanu obiektu związane jest zawsze z utratą części informacji. Jeśli w ten sposób zostanie utracona informacja istotna z punktu widzenia celów rozpoznawania, to straty tej nie da się zrekomensować żadnymi późniejszymi wysiłkami [12].

Powyższe rozważania wskazują, że wybór odpowiednich cech stanu obiektu stanowi jeden z ważniejszych problemów diagnostyki technicznej. Celowe jest więc posługiwanie się metodami pozwalającymi na selektywny wybór takich cech, które niosą wartościową i ważną informację z punktu widzenia jej przydatności w procesie rozpoznawania i których obserwacja umożliwi prawidłową klasyfikację stanu obiektu.

Wynikiem selekcji przeprowadzonej na N -elementowym zbiorze cech stanu obiektu jest utworzenie zredukowanego M -elementowego zestawu cech ($M < N$). Zredukowany zbiór cech odpowiada nowej M -wymiarowej przestrzeni obserwacji stanu obiektu. Zagadnienie selekcji cech stanu można zatem sprowadzić do poszukiwań takiej podprzestrzeni oryginalnej przestrzeni obserwacji stanu obiektu, w której topografia obszarów wyznaczonych przez obrazy stanu obiektu

tworzące ciąg uczący jest najbardziej korzystna ze względu na rozróżnianie klas stanu obiektu.

W niniejszej pracy oceny przydatności diagnostycznej określonej podprzestrzeni obserwacji stanu obiektu dokonywano na podstawie dwóch kryteriów: kryterium będącego pewną kombinacją miar rozprożeń obrazów stanu obiektu sformułowanych przez Sebestyena oraz kryterium liczby wzorców klas [2]. Stosowane kryteria wykorzystują pojęcie odległości w przestrzeni obserwacji, która w tym celu musi być wyposażona w odpowiednią metrykę. Dobór metryki może mieć wpływ na uzyskiwane wyniki. Problem przyjęcia właściwej metryki można rozwiązać w zasadzie jedynie na drodze empirycznej. Alternatywą jest podjęcie odpowiedniej decyzji całkowicie arbitralnie. W niniejszej pracy posługiwano się metryką euklidesową.

2.1. Zmodyfikowane kryterium Sebestyena

Zmodyfikowane kryterium Sebestyena [9, 10] jest kombinacją miar rozprożeń obrazów w podprzestrzeni obserwacji. Średnie rozproszenie obrazów w podprzestrzeni obserwacji obliczamy ze wzoru:

$$\bar{R} = \frac{1}{m \cdot (m-1)} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m d(\mathbf{w}_{oi}, \mathbf{w}_{oj}) \quad (2.1)$$

gdzie:

- \mathbf{w}_o – obraz stanu obiektu,
- m – liczba wszystkich obrazów,
- $d(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ – odległość między obrazem \mathbf{x} i \mathbf{y} .

Rozproszenie wewnętrzne klasy stanu A można obliczyć ze wzoru:

$$R_W^A = \frac{1}{m_A \cdot (m_A - 1)} \cdot \sum_{i=1}^{m_A} \sum_{j=1}^{m_A} d(\mathbf{w}_{oi}^A, \mathbf{w}_{oj}^A) \quad (2.2)$$

gdzie:

- \mathbf{w}_o^A – obraz stanu obiektu należący do klasy stanu A,
 - m_A – liczba obrazów należących do klasy stanu A.
- Średnie rozproszenie wewnątrzklasowe określa wzór:

$$\bar{R}_W = \frac{1}{K} \cdot \sum_{A=1}^K R_W^A \quad (2.3)$$

gdzie K oznacza liczbę klas stanu.

Rozproszenie między klasami stanu A i B obliczamy ze wzoru:

$$R_M^{AB} = \frac{1}{m_A \cdot m_B} \cdot \sum_{i=1}^{m_A} \sum_{j=1}^{m_B} d(\mathbf{w}_{oi}^A, \mathbf{w}_{oj}^B) \quad (2.4)$$

Średnie rozproszenie międzyklasowe opisane jest wzorem:

$$\bar{R}_M = \frac{1}{K \cdot (K-1)} \cdot \sum_{A=1}^K \sum_{\substack{B=1 \\ B \neq A}}^K R_M^{AB} \quad (2.5)$$

Zmodyfikowane kryterium Sebestyena jest sformułowane następująco:

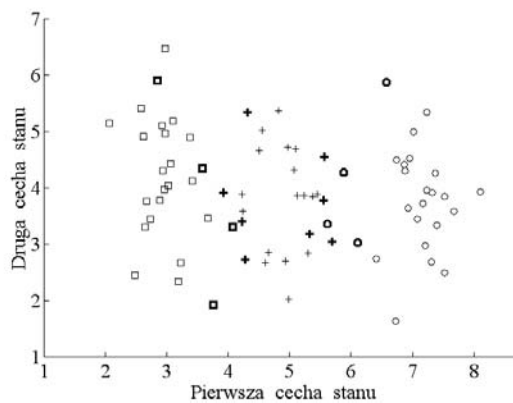
$$K_S = \frac{\bar{R}_M - \bar{R}_W}{\bar{R}} \quad (2.6)$$

Poszukiwana jest taka podprzestrzeń obserwacji, która daje największą wartość kryterium. Preferuje się w ten sposób podprzestrzenie obserwacji stanu obiektu, w których występują duże względne odległości między obszarami poszczególnych klas stanu przy jednoczesnym dużym względnym skupieniu wewnętrznym każdego z tych obszarów. Bezwymiarowa postać kryterium umożliwia porównywanie różnych podprzestrzeni obserwacji nawet w sytuacji występowania dużych różnic wymiarów poszczególnych składowych wektora obserwacji stanu obiektu.

Przedstawione kryterium nie bierze jednak pod uwagę wielomodalności rozkładów obrazów w przestrzeni, która często ma miejsce w praktyce. Wykorzystanie do oceny przydatności podprzestrzeni obserwacji wyłącznie tego kryterium, silnie faworyzującego rozkłady jednomodalne jest w praktyce niewystarczające.

2.2. Kryterium liczby wzorców klas

Obok zmodyfikowanego kryterium Sebestyena zastosowano inne kryterium oceny przydatności diagnostycznej określonej podprzestrzeni obserwacji stanu obiektu. Dla każdej analizowanej podprzestrzeni obserwacji obliczano liczbę wzorców klas (L_w). Wzorcami klasy są wybrane obrazy będące przedstawicielami danej klasy. Podstawowa trudność przy stosowaniu wzorców polega na opracowaniu techniki ich wyznaczania. W prezentowanym rozwiązaniu wzorce klasy opisują topografię obszarów wyznaczonych w podprzestrzeni obserwacji przez obrazy danej klasy. Z pewnym uproszczeniem wzorce można utożsamiać z obrazami „rozdzielającymi” w podprzestrzeni obserwacji obszary poszczególnych klas (obrazami „brzegowymi” obszarów klas). Należy podkreślić, że poszczególne podprzestrzenie obserwacji mogą mieć różne wzorce klas. W sposób graficzny idea wzorców została przedstawiona na rysunku 2.1.



Rys. 2.1. Interpretacja graficzna wzorców klas

Kwadraty, krzyżyki i kółka przedstawiają hipotetyczny rozkład obrazów (3 klasy)

w dwuwymiarowej podprzestrzeni obserwacji. Elementy pogrubione oznaczają wzorce poszczególnych klas (obrazy „brzegowe” tych klas). Liczba wzorców klas danej podprzestrzeni obserwacji jest sumą liczb wzorców wszystkich klas ($L_w=4+8+4$). Zastosowana technika wyznaczania wzorców powoduje to, że liczba wzorców klas nie może być mniejsza niż liczba klas (każda klasa musi mieć przynajmniej jeden wzorec) i większa niż liczba obrazów tworzących ciąg uczący.

Poszukiwana jest taka podprzestrzeń obserwacji, która ma najmniejszą liczbę wzorców klas. Preferuje się w ten sposób podprzestrzenie obserwacji o mniej skomplikowanej „powierzchni styku” obszarów wyznaczonych przez obrazy poszczególnych klas. Niską ocenę przydatności otrzymują natomiast te podprzestrzenie obserwacji, w których występuje zjawisko nakładania się obszarów wyznaczonych przez obrazy poszczególnych klas. Kryterium to informuje nas ponadto jak „daleko” jest nasze rozwiązanie od rozwiązania idealnego (liczba wzorców klas = liczba klas).

Algorytm wyznaczania wzorców danej klasy można scharakteryzować jako ciąg operacji prowadzących do usunięcia „niereprezentatywnych, nadmiarowych” obrazów danej klasy:

1. Dla każdego obrazu należącego do danej klasy obliczamy odległość od najbliższego mu obrazu należącego do innej klasy, którą to odległość oznaczmy jako d_0 ;
2. Rozpoczynając redukcję od tego obrazu należącego do danej klasy, którego odległość d_0 jest najmniejsza (pierwszy obraz bazowy), eliminujemy te obrazy należące do danej klasy, których odległość od obrazu bazowego jest mniejsza od ich odległości d_0 ;
3. Po odrzuceniu z danej klasy pierwszej grupy obrazów, kontynuujemy redukcję bazując na następnych (jeszcze nie wyeliminowanych) w kolejności (według rosnącej odległości d_0) obrazach należących do danej klasy odrzucając z danej klasy kolejne grupy obrazów;
4. Brak następnego obrazu bazowego sygnalizuje koniec redukcji.

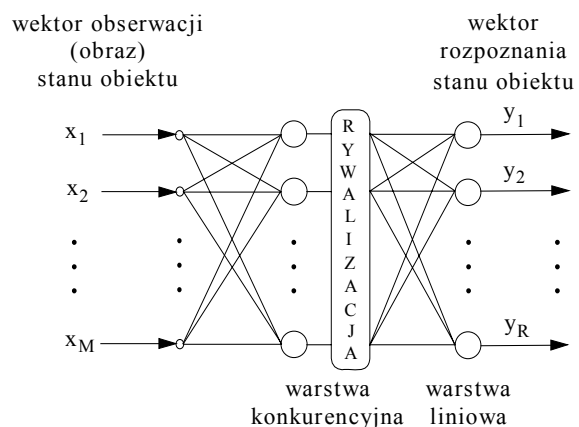
Obrazy, które nie zostały wyeliminowane w trakcie redukcji są wzorcami danej klasy. Wzorcami danej klasy są zatem obrazy bazowe. W szczególnym przypadku wzorcem danej klasy może być jeden obraz (pierwszy obraz bazowy).

3. NEURONOWY KLASYFIKATOR STANU OBIEKTU

Najczęściej do budowy neuronowego klasyfikatora stanu obiektu wykorzystuje się jednokierunkowe sieci nieliniowe [1, 13]. Ciekawą alternatywą wydają się być jednak sieci z kontrapropagacją (propagacją przeciwną) zwane również sieciami CP (Counter Propagation) bazujące na uczeniu konkurencyjnym, nazywanym także często uczeniem z rywalizacją (neurony jakby

rywalizują, konkurują ze sobą o możliwość korekty wag, czyli o możliwość nauki) [5, 6, 8, 11]. Sieci CP stosowane są wprawdzie do węższej klasy zagadnień niż jednokierunkowe sieci nieliniowe ale za to uczą się znacznie szybciej a ustalenie ich struktury jest prostsze. Doskonale zdają egzamin jako systemy klasyfikacji i rozpoznawania obrazów [11] oraz klasyfikatory wektorowe [8].

Sieć CP została opracowana przez Roberta Hecht-Nielsena w latach 1987 – 1988 i jest kombinacją dwóch rodzajów sieci: sieci konkurencyjnej i sieci liniowej [4]. Schemat sieci neuronowej CP klasyfikującej stan badanego obiektu przedstawiono na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Schemat sieci neuronowej CP klasyfikującej stan obiektu

Uczenie sieci przebiega równocześnie w obydwu warstwach sieci. Wektor rozpoznania stanu obiektu należy interpretować w następujący sposób: jeżeli sieć neuronowa uzna, że stan obiektu odpowiada klasie stanu 2, to na wyjściu numer 2 pojawi się najsilniejszy sygnał.

Poszczególne warstwy sieci spełniają w procesie rozpoznawania stanu obiektu różne zadania. Warstwa konkurencyjna dzieli przestrzeń obserwacji stanu obiektu na strefy wpływów poszczególnych neuronów konkurencyjnych (tzw. wielościany Voronoi). Każdy wielościan zawiera zatem obszar najbliższy (w sensie wybranej metryki) danemu neuronowi konkurencyjnemu. Neuronem zwycięzcą zostaje ten neuron, w którego strefie wpływów znajduje się prezentowany wektor obserwacji stanu obiektu. Przestrzeń obserwacji stanu obiektu jest więc podzielona jak mozaika Voronoia a dowolny wektor obserwacji jest reprezentowany przez określony wielościan (neuron zwycięzcę). Warstwa liniowa przypisuje (adresuje) poszczególne wielościany do określonych klas stanu obiektu.

Miarą poprawności działania sieci neuronowej, nazywaną także sprawnością sieci, jest procent poprawnie rozpoznanych stanów obiektu.

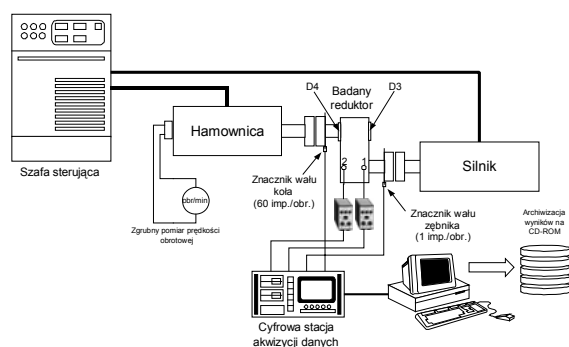
4. EKSPERYMENT

4.1. Stanowisko pomiarowe

Obiektem badań była przekładnia zębata jednostopniowa, redukująca z kołami walcowymi o zębach śrubowych (typoszereg 1N100) wyprodukowana przez Fabrykę Reduktorów i Motoreduktorów „Befared” S.A. w Bielsku Białej i charakteryzująca się następującymi parametrami konstrukcyjnymi: moduł nominalny $m_n=2$ mm, liczba zębów zębniaka $z_1=20$, liczba zębów koła $z_2=79$, kąt pochylenia linii śrubowej zęba $8^\circ 6' 34''$, kierunek pochylenia linii zębów koła prawy, szerokość wieńca 40 mm. Katalogowa moc reduktora wynosiła 8,9 kW przy 1000 obr/min.

W celu umożliwienia symulacji odchyłek wykonawczo – montażowych przekładnia została wyposażona w mimośrodowe osadzenie łożysk wału koła [7]. Ramię mimośrodków wynosiło 1 mm. Na obu mimośrodkach można było uzyskać po 24 położenia. Błędy ustawienia osi wału koła były traktowane jako uszkodzenia przekładni i stanowiły przedmiot diagnozy. Do ich określenia użyto następujących wielkości: kąt przekoszenia osi wału koła w płaszczyźnie poziomej (płaszczyźnie wałów) „p_h” oraz kąt przekoszenia osi wału koła w płaszczyźnie pionowej „p_v”. Klasy stanu przekładni zdefiniowano następująco: p_h=0 i p_v=0 (klasa stanu 1), p_h>0 i p_v>0 (klasa stanu 2), p_h>0 i p_v<0 (klasa stanu 3), p_h<0 i p_v<0 (klasa stanu 4), p_h<0 i p_v>0 (klasa stanu 5).

Badania wykonano na stanowisku badawczym zainstalowanym w Pracowni Wibroakustyki IPBM PW, którego schemat przedstawiono na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Schemat stanowiska badawczego

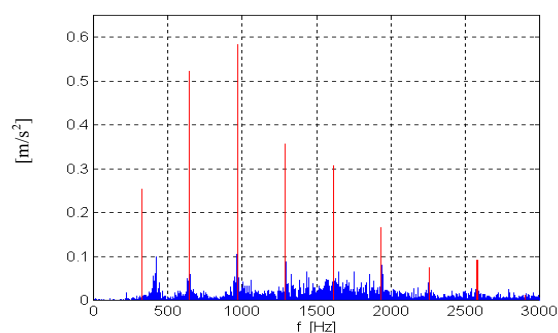
Badany reduktor napędzany oraz hamowany silnikami elektrycznymi prądu stałego. Wał zębniaka oraz wał koła zostały połączone z silnikiem oraz z hamownicą za pomocą podatnych sprzęgieł. W celu umożliwienia analizy synchronicznej drgań przekładni, do sprzęgła na wale zębniaka została przymocowana stalowa tarcza z pojedynczym nacięciem a do sprzęgła na wale koła tarcza z 60 nacięciami. Podczas pracy przekładni nacięcia te powodowały powstawanie impulsów napięciowych w optoelektrycznych czujnikach prędkości obrotowej. Impulsy te były następnie

wykorzystywane do dokładnego określania prędkości obrotowej oraz do synchronizacji przebiegów drganiowych podczas uśredniania w dziedzinie czasu [7]. Do pomiarów przyspieszeń drgań korpusu przekładni wykorzystano dwa tory pomiarowe składające się z przetworników piezoelektrycznych drgań oraz przedwzmacniaczy ładunkowych. Czujnik kanału pierwszego przykręcony był do korpusu reduktora nad łożyskiem zębniaka od strony silnika napędzającego, zaś czujnik kanału drugiego nad łożyskiem zębniaka od strony hamownicy. Do kanału trzeciego urządzenia rejestrującego podłączono napięciowy sygnał znacznika obrotów wału zębniaka, zaś do kanału czwartego napięciowy sygnał znacznika obrotów wału koła.

4.2. Przebieg badań

Dla wybranych dwunastu różnych ustawień mimośrodków wykonano 82 rejestracje przyspieszeń drgań korpusu przekładni przy siedmiu prędkościach obrotowych: 900, 950, 1000, 1050, 1100, 1150 i 1200 obr/min i obciążeniu koła 45 Nm. Rejestrowano przebiegi czasowe przyspieszeń w ciągu 6 sekund procesu ustalonego przy rozdzielczości czasowej około $2 \cdot 10^{-5}$ sekundy. W celu wyodrębnienia z zarejestrowanych sygnałów składników związanych przyczynowo z poszczególnymi wałami poddawano je procedurze uśredniania synchronicznego, przy czym podstawą uśredniania były odpowiednio obroty wału zębniaka i koła.

Przyjęto założenie, że stany przekładni będą odwzorowywać się w widmach przyspieszeń drgań jej korpusu. W związku z tym, wykonano widma amplitudowe uśrednionych synchronicznie sygnałów w zakresie częstotliwości od 0 do 3000 Hz. Przykładowe widmo przedstawiono na rysunku 4.2.



Rys. 4.2. Widmo amplitudowe przyspieszenia drgań korpusu mierzonych od strony silnika (uśrednianie obrotami wału koła)

Za podstawę opisu stanu przekładni przyjęto wartości amplitud przyspieszeń drgań korpusu przekładni kolejnych dziewięciu harmonicznych częstotliwości zazębienia. Wprowadzono

następujące symbole przyjętych cech stanu obiektu: cechy 1 ÷ 9 – amplitudy przyspieszeń drgań mierzonych od strony silnika i uśrednianych obrotami wału koła, cechy 10 ÷ 18 – amplitudy przyspieszeń drgań mierzonych od strony hamownicy i uśrednianych obrotami wału koła, cechy 19 ÷ 27 – amplitudy przyspieszeń drgań mierzonych od strony silnika i uśrednianych obrotami wału zębniaka, cechy 28 ÷ 36 – amplitudy przyspieszeń drgań mierzonych od strony hamownicy i uśrednianych obrotami wału zębniaka.

Następnie, przy pomocy dwóch kryteriów: zmodyfikowanego kryterium Sebestyena oraz kryterium liczby wzorców klas, dokonano wyboru podprzestrzeni obserwacji stanu obiektu. Ponieważ liczba wszystkich możliwych do utworzenia podprzestrzeni obserwacji stanu obiektu była zbyt duża, aby można było je wszystkie przeanalizować

$$\left(\sum_{i=1}^{36} \binom{36}{i} \right) = 2^{36} - 1 = 6871947673 \text{ 5) } \quad \text{przyjęto}$$

pewną strategię wyłaniania podprzestrzeni obserwacji przeznaczonych do analiz. W myśl tej strategii analizy rozpoczynano od jednowymiarowych podprzestrzeni obserwacji, następnie poddawano analizom podprzestrzenie dwu- i trójwymiarowe. Wyniki tych analiz pozwoliły postawić hipotezę o lepszej przydatności diagnostycznej pewnego podzbioru pierwotnego zestawu cech. Dalsze wielowymiarowe analizy były już prowadzone na bazie tego zredukowanego zbioru cech.

Cechy stanu obiektu wykorzystane do budowy wybranej podprzestrzeni obserwacji stanu obiektu były parametrami wejściowymi sieci neuronowej (wektor obserwacji stanu obiektu składał się z tych wyróżnionych cech stanu obiektu). Przyjęto założenie, że liczebność ciągów (zbiorów) uczących i testujących sieć neuronową musi być porównywalna. Chciano w ten sposób sprawdzić nie tylko zdolność sieci do zapamiętania danych uczących ale także jej zdolność uogólniania wiedzy na przypadki podobne do tych, które podawano w trakcie uczenia, ale w pewnym stopniu odmienne. Z tego też powodu w procesie uczenia wykorzystywano połowę (41) posiadanej liczby wektorów obserwacji stanu obiektu. Przy budowie ciągu uczącego posługiwano się wynikami uzyskanymi na etapie selekcji cech stanu - w jego skład wchodziły wszystkie wzorce klas wybranej podprzestrzeni obserwacji stanu obiektu wraz z losowo dobraną, dopełniającą ciąg grupą pozostałych obrazów stanu obiektu. Reszta obrazów stanu obiektu (41) przeznaczana była do testowania sieci neuronowej. Liczba prezentacji uczących wektorów obserwacji była 30 razy większa od liczby wektorów obserwacji stanu obiektu zgromadzonych w ciągu uczącym. Prezentowane wektory obserwacji były wybierane z ciągu uczącego w sposób losowy.

Reguły zmian współczynników uczenia poszczególnych warstw sieci neuronowej dobrano w ten sposób, że w początkowej fazie procesu uczenia intensywniej uczyła się warstwa konkurencyjna, a w końcowej fazie warstwa liniowa [2, 3]. Uczenie warstwy konkurencyjnej odbywało się z zastosowaniem funkcji sąsiedztwa. Używana funkcja sąsiedztwa jednakowo preferowała wszystkie neurony z sąsiedztwa neuronu zwycięzcy, które zmniejszało się w trakcie przebiegu procesu uczenia. Naukę sieci powtarzano 25 razy i wybierano najlepszy uzyskany wynik.

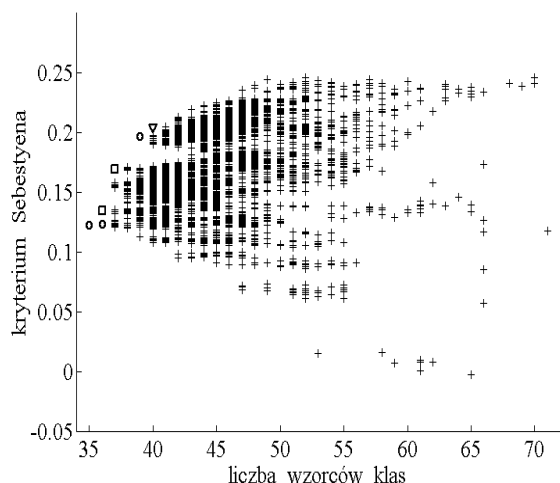
Zastosowano następującą procedurę budowy struktury sieci neuronowej:

- Liczba neuronów liniowych była równa liczbie rozpoznawanych klas stanu obiektu (5) a wszystkie ich wagi były na początku procesu uczenia równe zero.
- Początkowa liczba neuronów konkurencyjnych była 3 razy większa od liczby wektorów obserwacji stanu obiektu zgromadzonych w ciągu uczącym (3·41=123). Wszystkie neurony konkurencyjne miały na początku procesu uczenia jednakowe wagi.
- Po zakończeniu prezentacji uczących wektorów obserwacji wagi neuronów liniowych były zaokrąglane do najbliższej wartości całkowitej. Dzięki temu wektor rozpoznania stanu obiektu miał postać wektora zerojedynkowego, w którym położenie jedynki określało rozpoznaną klasę stanu obiektu.
- Z sieci wyeliminowane zostały te neurony konkurencyjne, które nie posiadały aktywnych (niezerowych) połączeń z którymkolwiek neuronem liniowym. W ten sposób ustalana była ostateczna liczba neuronów konkurencyjnych (około 50).

Zastosowanie takiej procedury skutkowało tym, że ostateczna struktura sieci CP była wynikiem procesu uczenia i różniła się dla poszczególnych treningów. Symulację sieci neuronowej CP wykonano posługując się środowiskiem programowania MATLAB z wykorzystaniem przyborka Neural Networks.

4.3. Wyniki badań

Analizy jedno-, dwu- i trójwymiarowych podprzestrzeni obserwacji pozwoliły wyłonić pewien podzbiór pierwotnego zestawu cech stanu, w którym znalazły się cechy o najbardziej obiecującej przydatności diagnostycznej (cechy 3, 4, 12, 13, 16, 21, 22, 25, 29, 30, 31, 35). Poddano zatem analizom wszystkie podprzestrzenie obserwacji (4095 podprzestrzeni), które można zbudować z tych cech stanu obiektu. Wyniki analiz poszczególnych podprzestrzeni obserwacji przedstawiono zbiorczo na rysunku 4.3.



Rys. 4.3. Wyniki analiz podprzestrzeni obserwacji

Każdy punkt reprezentuje pewną podprzestrzeń obserwacji. Za pomocą kółek, kwadratów i trójkątów (lewy górny róg) oznaczono najlepsze podprzestrzenie obserwacji (małe wartości L_w , duże wartości K_s).

Zestawy cech stanu odpowiadające podprzestrzeniom obserwacji oznaczonym kółkami (zestaw cech 13 21 22 25 29 35, zestaw cech 13 16 21 22 25 29 35, zestaw cech 3 12 13 16 21 22 25 31 35) umożliwiły tak skuteczne wytrenowanie sieci neuronowej, że uzyskano neuronowy klasyfikator bezbłędnie rozpoznający stan przekładni (sprawność sieci na ciągu testującym wynosiła 100%).

Zestawy cech stanu odpowiadające podprzestrzeniom obserwacji oznaczonym kwadratami (zestaw cech 3 12 13 21 22 29 30 31 35, zestaw cech 3 13 16 21 22 25 29 31 35) pozwalały osiągnąć sprawność sieci na ciągu testującym na poziomie 97,56%.

Zestaw cech stanu odpowiadający podprzestrzeni obserwacji oznaczonej trójkątem (zestaw cech 3 12 16 22 31) pozwalał osiągnąć sprawność sieci na ciągu testującym na poziomie 95,12%.

5. PODSUMOWANIE

Ocena stanu technicznego przekładni zębatej na podstawie analizy generowanego przez nią sygnału wibroakustycznego należy do trudniejszych zagadnień diagnostyki. Informacja diagnostyczna zawarta w sygnale drganiowo-hałasowym może mieć bowiem różnorodną postać. Wynika to z faktu, że zmiany stanu przekładni mogą wpływać w szerokim zakresie na wielkość i strukturę sygnału wibroakustycznego.

Przedstawiona w niniejszej pracy metodyka rozwiązania tego trudnego i ważnego aplikacyjnie zagadnienia zawiera nowatorską metodę selekcji cech stanu obiektu (wyboru podprzestrzeni obserwacji stanu obiektu) wykorzystującą

zmodyfikowane kryterium Sebestyena oraz kryterium liczby wzorców klas.

Zaprezentowana metoda selekcji cech jest metodą geometryczną, w której miarą podobieństwa między dwoma obrazami w przestrzeni obserwacji jest odległość między nimi. W związku z tym jest ona wrażliwa na przekształcenia, które zmieniają odległość. Tak więc, proste przeskalowanie cech może prowadzić do odmiennych wyników. Tę wrażliwość metody można wykorzystać do oceny zasadności wykonania takich przeskalowań (np. normalizacji cech).

Wadą przedstawionej metody jest to, że jest to metoda „ślepa” – znalezienie najlepszej podprzestrzeni obserwacji wymaga przeanalizowania wszystkich podprzestrzeni obserwacji. Ogólna liczba takich potencjalnych, możliwych do utworzenia podprzestrzeni obserwacji stanu obiektu może być niekiedy zbyt duża, aby można było je wszystkie przeanalizować. W takim wypadku należy przyjąć jakąś strategię wylaniania podprzestrzeni obserwacji przeznaczonych do analiz.

Zaletą przedstawionej metody jest to, że obliczenia dotyczące poszczególnych podprzestrzeni obserwacji są autonomiczne i mogą być wykonywane dla każdej podprzestrzeni oddzielnie. Daje to możliwość rozproszenia obliczeń na wiele jednostek obliczeniowych, co w znaczący sposób skraca czas przeznaczony na analizy. Warto również zwrócić uwagę na to, że przedstawiona metoda opiera się na wielowymiarowych analizach a ocenie podlegają poszczególne grupy cech stanu. Dzięki temu możliwe jest wykrycie ewolucji wzajemnych związków pomiędzy poszczególnymi cechami stanu, co bardzo często ma duże znaczenie diagnostyczne.

Pewną innowacją jest również zastosowanie sieci neuronowych CP. Sieci neuronowe bazujące na uczeniu konkurencyjnym są jak dotąd rzadko wykorzystywane do rozpoznawania stanu maszyn. Wydaje się jednak, że mogą być one ciekawym narzędziem diagnostycznym - wyniki uzyskane w eksperymencie wykazują, że możliwe stało się prawidłowe wykrywanie błędów montażowych reduktora zębatego na podstawie obserwacji drgań mechanicznych jego obudowy.

Przeprowadzony eksperyment diagnostyczny umożliwia sformułowanie kilku wniosków:

1. Skuteczne rozpoznawanie stanu przekładni wymagało jednoczesnego użycia cech pochodzących z obu punktów pomiarowych. Poszczególne punkty pomiarowe dostarczały zatem różnej, wzajemnie się uzupełniającej informacji diagnostycznej, co podkreśla wagę odpowiedniego usytuowania czujników zbierających informacje o obiekcie.
2. Bardziej użyteczne diagnostycznie okazywały się wyższe harmoniczne częstotliwości ząbienia. Zdefiniowane błędy montażu uwiadcniają się zatem wszystkim w wyższych harmonicznych częstotliwości

zazębienia w mniejszym stopniu wpływając na zmiany podstawowej harmonicznej.

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2004 - 2006 jako projekt badawczy nr 4 T07B 013 26.

6. LITERATURA

- [1] Batko W., Uhl T., Gibiec M.: Porównanie wyników klasyfikacji stanu maszyn wirnikowych uzyskanych metodami klasycznymi i z zastosowaniem sieci neuronowych. Materiały XXII Ogólnopolskiego Symposium Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka, zeszyt 2/95, 9–14, 1995.
- [2] Dybała J.: Wykrywanie uszkodzeń w przekładni zębatej na podstawie analizy sygnału wibroakustycznego z wykorzystaniem modeli symulacyjnych. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa, 1999.
- [3] Dybała J., Radkowski S.: Failure Diagnosis with the Use of Neural Classifier. Machine Dynamics Problems, Wydawnictwo MeT, Warszawa, Vol. 19, 29–44, 1998.
- [4] Hecht-Nielsen R.: Applications of counterpropagation networks. Neural Networks, vol. 1, 131–139, 1988.
- [5] Hertz J., Krogh A., Palmer R.: Wstęp do teorii obliczeń neuronowych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 267–306, 1993.
- [6] Korbicz J., Obuchowicz A., Uciński D.: Sztuczne Sieci Neuronowe. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa, 1994.
- [7] Mączak J.: Wykorzystanie zjawiska modulacji sygnału wibroakustycznego w diagnozowaniu przekładni o zębach śrubowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa, 1998.
- [8] Osowski S.: Sieci Neuronowe. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 203–211, 1994.
- [9] Sebestyen G. S.: Decision making processes in pattern recognition. Macmillan, New York, 1962.
- [10] Sobczak W., Malina W.: Metody selekcji informacji. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1978.
- [11] Tadeusiewicz R.: Sieci Neuronowe. Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa, 1993.
- [12] Tadeusiewicz R., Flasiński M.: Rozpoznawanie obrazów. PWN, Warszawa, 1991.
- [13] Wu X., Ghaboussi J., Garrett J. H.: Use of neural networks in detection of structural damage. Computers & Structures, Vol. 42, No. 4, 649–659, 1992.

Dr inż. **Jacek Dybała** adiunkt Instytutu Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Warszawskiej, członek Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej.



Prof. **Stanisław Radkowski** profesor Instytutu Podstaw Budowy Maszyn PW, kierownik zespołu Diagnostyki Technicznej i Analizy Ryzyka, Prezes Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej.



DIAGNOZOWANIE ZŁOŻONYCH PRZYPADKÓW USZKODZEŃ PRZEKŁADNI ZĘBATYCH W EKSPERYMENCIE CZYNNYM

Tomasz FIGLUS, Andrzej WILK

Katedra Budowy Pojazdów Samochodowych, Wydział Transportu, Politechnika Śląska
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, e-mail: figlus@polsl.katowice.pl, wilk@polsl.katowice.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono metodę diagnozowania sygnału drganiowego emitowanego przez przekładnię zębatą, w której podczas eksperymentu czynnego symulowano równoczesne uszkodzenie koła zębatego oraz łożysk tocznych.

W badaniach wykorzystano technikę laserowego pomiaru prędkości drgań wału. Zmierzone sygnały analizowano wykorzystując filtrację grzebieniową widma oraz transformatę Wignera-Ville'a, poszukując symptomów uszkodzeń przekładni.

Słowa kluczowe: diagnostyka, uszkodzenia kół zębatych, uszkodzenia łożysk tocznych, filtracja sygnału.

DIAGNOSIS OF COMPLEX CASES GEAR TRANSMISSION DAMAGE DURING THE ACTIVE EXPERIMENT

Summary

In the paper presents a method of detecting the vibro-acoustic signal emitted by a tooth gear, in which during the active experiment a local damage of tooth gear in the presence of rolling bearing damages were simulated.

The experiments took advantage of technique of laser measurement of vibration of transmission gear shaft. The received vibration signal was analysed by means of comb filtration and Wigner-Ville's analysis, and was searched a local damage of tooth gear.

Keywords: diagnostics, tooth gear damage, rolling bearing damage.

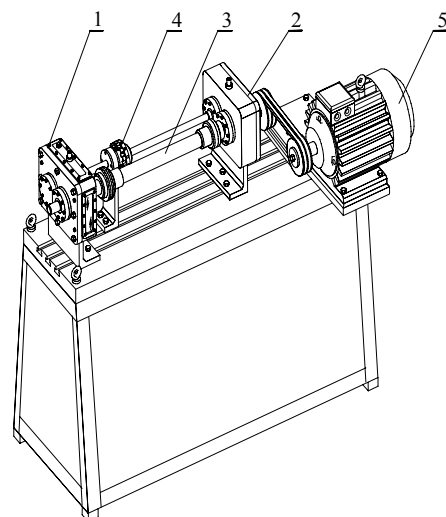
1. WSTĘP

Przedstawione w wielu publikacjach badania diagnostyczne przekładni zębatych [1-5] obejmowały swym zakresem osobną identyfikację lokalnych uszkodzeń kół zębatych oraz uszkodzeń łożysk tocznych. Wykrywanie tych uszkodzeń występujących jednocześnie, ze względu na złożoność problemu diagnozowania, nie zostało jeszcze rozwiązane.

W pracy przedstawiono analizę wyników pomiarów przekładni, w której na wale zamontowano uszkodzone łożysko toczne oraz koło zębate. Analizę przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym etapie zastosowano transformatę Wignera-Ville'a (WV), tak jak przy wykrywaniu uszkodzeń jednostkowych, a w drugim transformata (WV) poprzedzona została filtracją grzebieniową.

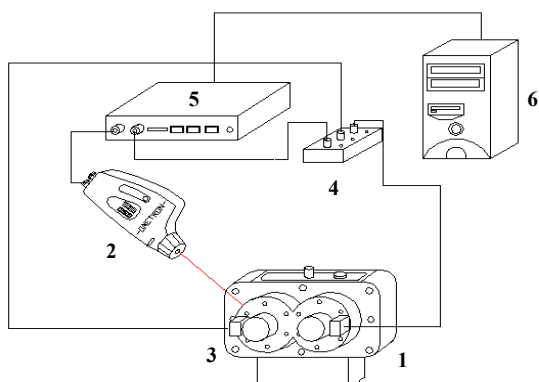
2. METODA POMIARÓW

Badania przeprowadzono na stanowisku mocy krążącej FZG (rys.1) przy prędkości obrotowej wału koła wynoszącej $f_{o2}=15$ i 30 Hz oraz przy obciążeniu jednostkowym zębów wynoszącym $Q=2$ i 3,85 MPa.



Rys.1. Stanowisko mocy krążącej FZG:
1-badana przekładnia, 2-przekładnia zamykająca, 3-wał skrotny, 4-sprzęgło napinające, 5-silnik napędzający

Pomiary prędkości drgań poprzecznych wałów wykonano wibrometrem laserowym. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys.2.

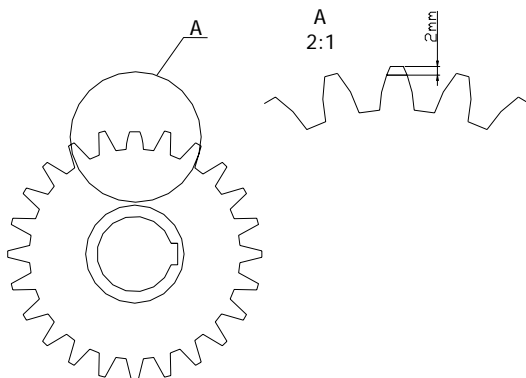


Rys. 2. Schemat układu pomiarowego:
 1-badana przekładnia, 2-wibrometr laserowy,
 3-czujniki położenia wałów, 4-układ logiczny, 5-analizator sygnałów DSPT SigLab, 6-komputer PC

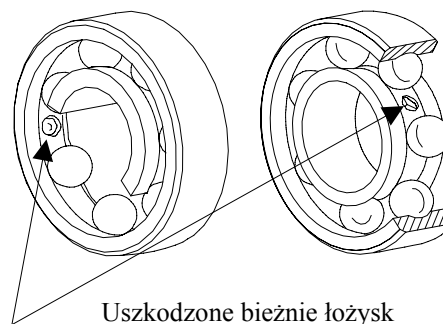
W badaniach założono uszkodzenie koła zębatego w postaci wykruszenia jednego zęba (rys.3.1) oraz dwóch różnych uszkodzeń łożysk tocznych – bieżni wewnętrznej i zewnętrznej (rys.3.2). Uszkodzone elementy pracowały na tym samym wale przekładni zębatej.

Koła zębate wykorzystane w badaniach miały następujące parametry: liczba zębów zębniaka 16, liczba zębów koła 24, moduł 4,5 mm, szerokość ząbienia 20 mm, współczynnik przesunięcia zarysu zębniaka $x_1=0,864$, współczynnik przesunięcia zarysu koła $x_2=-0,5$, odległość osi kół 91,5 mm.

Zadane uszkodzenie w postaci zmniejszenia wysokości głowy zęba o 2 mm (wykruszenia zęba) odpowiadało wskaźnikowi przyporu czołowego $\varepsilon_{\alpha}=0,93$. Częstotliwość pojawiania się tego uszkodzenia w sygnale WA wynosiła zależnie od prędkości obrotowej $f_{o2}=15$ oraz 30 Hz.



Rys.3.1. Wykruszenie zęba koła



Rys.3.2. Uszkodzenia bieżni łożysk

W badaniach wykorzystano łożyska kulkowe zwykle 6307, w których bieżnie wewnętrzne i zewnętrzne zostały uszkodzone w jednym miejscu na obwodzie. Charakterystyczne częstotliwości pojawiania się tych uszkodzeń w sygnale obliczone z zależności (1) i (2) przedstawiono w tabeli 1.

- uszkodzenie pierścienia wewnętrznego

$$f_{\text{wewn}} = \frac{z}{2} f_{o2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \quad (1)$$

- uszkodzenie pierścienia zewnętrznego

$$f_{\text{zewn}} = \frac{z}{2} f_{o2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \quad (2)$$

gdzie:

- z – liczba elementów tocznych,
- f_{o2} – częstotliwość obrotowa wału,
- d – średnica podziałowa łożyska [mm],
- D – średnica kulki [mm],
- α – kąt działania łożyska [$^{\circ}$].

Tabela 1. Częstotliwości charakterystyczne dla badanych uszkodzeń łożysk tocznych

Częstotliwość obrotu koła	f_{o2} [Hz]	15	30
Częstotliwość pojawiania się uszkodzenia pierścienia wewnętrznego łożyska	$f_{\text{wewn.}}$ [Hz]	65	130,1
Częstotliwość pojawiania się uszkodzenia pierścienia zewnętrznego łożyska	$f_{\text{zewn.}}$ [Hz]	45	90,1

3. ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW

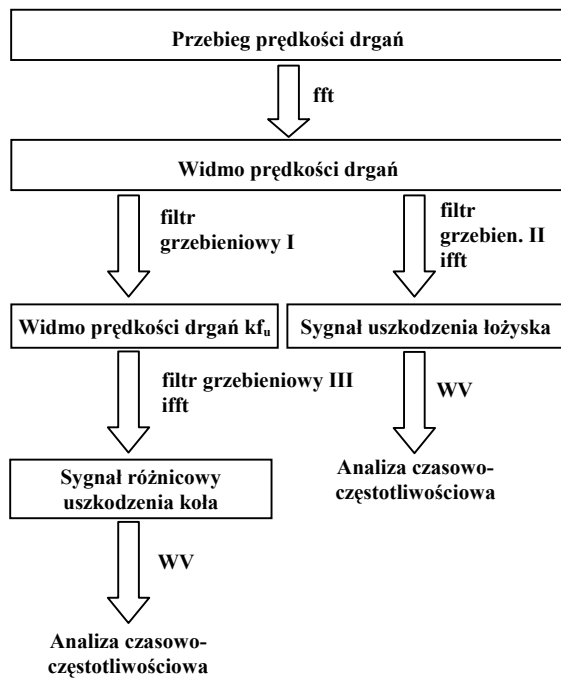
Do analizy wyników pomiarów wykorzystano transformatę Wignera-Ville'a, opisaną zależnością (3):

$$WV(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) w(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (3)$$

gdzie:

$x^*(t)$ – sygnał urojony sprzężony z $x(t)$,
 $w(t)$ – funkcja wagi.

Jak wynika, z przedstawionych poniżej analiz transformata ta, zastosowana do obliczeń złożonego sygnału drganiowego nie pozwalała odróżnić występujących uszkodzeń elementów przekładni. Dlatego też, do dalszych obliczeń zaproponowano metodę, której algorytm przedstawiono na rys.4.

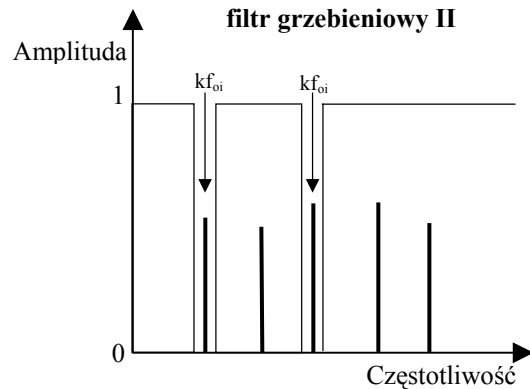
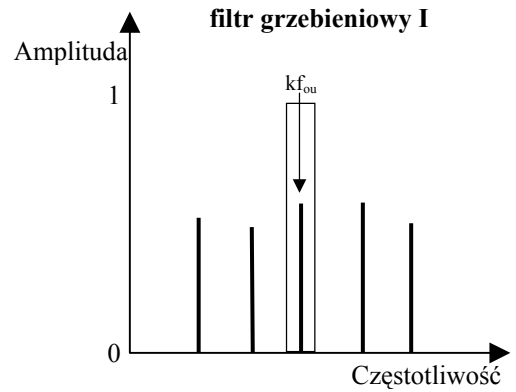


Rys.4. Analiza sygnału zorientowana na wykrywanie uszkodzenia koła zębatego i łożyska tocznego

W metodzie tej sygnał poddaje się filtracji grzebieniowej o różnej charakterystyce filtrów (rys.5 i 6) – zorientowanej na określony typ uszkodzenia.

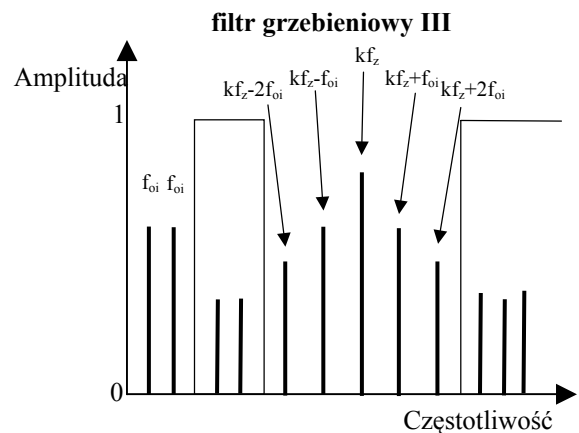
Sygnał różnicowy otrzymuje się przez usunięcie w widmie pasm zawierających: harmoniczne częstotliwości zazębienia, częstotliwości je modulujące (wstęgi boczne) oraz częstotliwości obrotowe kół.

Następnie otrzymane sygnały analizuje się przy zastosowaniu odpowiednich miar sygnału wibroakustycznego, między innymi transformaty WV.



Rys.5 Realizacja filtra grzebieniowego nr I i II:

- linią ciągłą oznaczono pasmo przenoszenia filtrów
- f_{ou} – częstotliwość pojawiania się uszkodzenia koła zębatego,
- f_{oi} – częstotliwości obrotowe kół,
- k – harmoniczna 1,2,3,...



Rys.6. Realizacja filtra grzebieniowego nr III:

- linią ciągłą oznaczono pasmo przenoszenia odpowiadające filtracji sygnału różnicowego
- f_{oi} – częstotliwości obrotowe kół,
- k – harmoniczna 1,2,3,...

Na rysunkach 7-12 przedstawiono rozkłady Wignera-Ville'a sygnałów prędkości drgań wału (pomiaru przy $f_{02}=30\text{Hz}$ i $Q=3,85\text{MPa}$) w przypadku następującej kombinacji uszkodzeń:

- koła zębatego i pierścienia wewnętrznego łożyska – KW,
- koła zębatego i pierścienia zewnętrznego łożyska – KZ.

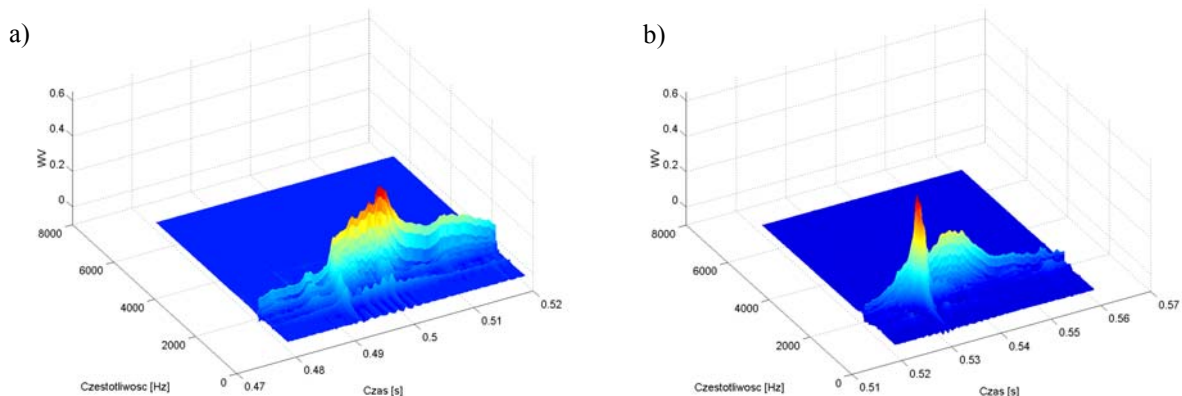
Wyniki transformacji Wignera-Ville'a przedstawione na rysunku 7 (KW) oraz 10 (KZ) dotyczą sygnałów drganiowych, które nie poddano poprzedniej obróbce z wykorzystaniem filtracji grzebieniowej. Analizy wykonane w dwóch następujących bezpośrednio po sobie chwilach czasu wykazały lokalne wzrosty amplitudy sygnałów (w skali WV). Identyfikacja ich lub powiązanie z częstotliwościami występowania uszkodzeń przekładni jest niemożliwe.

Kolejne analizy wykonano stosując metodę przedstawioną na rys.4. Zaprezentowane na rysunkach 9 oraz 10 transformaty WV sygnału różnicowego uszkodzonego koła zębatego oraz pierścienia wewnętrznego łożyska tocznego (KW) wskazują na znaczne wzrosty amplitud sygnałów drganiowych. W każdym przypadku wejście w przypór wykruszonego zęba powoduje

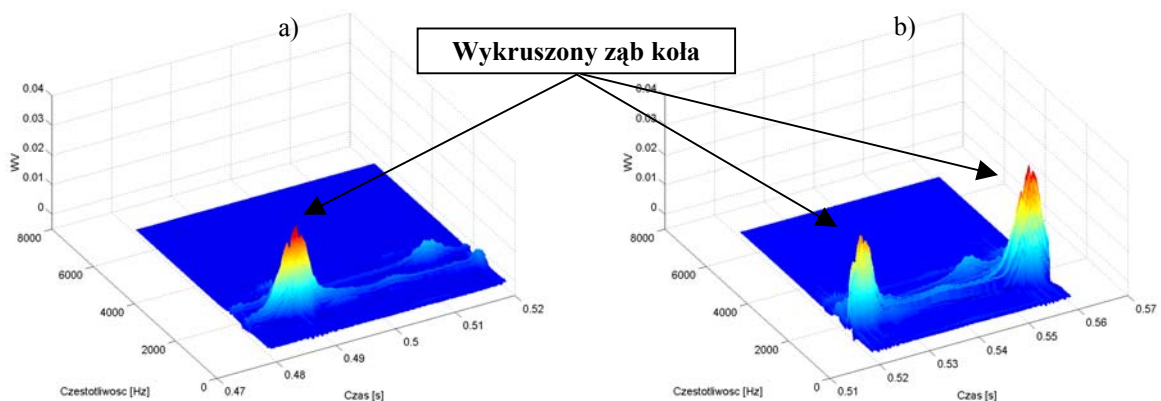
zwiększenie amplitudy sygnału powtarzające się z częstotliwością obrotu koła. W przypadku uszkodzenia pierścienia wewnętrznego amplituda przyjmuje różne wartości. Przyczyną tego jest zmiana położenia kontaktu kulek z miejscowym uszkodzeniem bieżni w stosunku do kierunku realizacji pomiaru.

Na rysunkach 11 i 12 przedstawiono analizy sygnału różnicowego uszkodzonego koła zębatego oraz pierścienia zewnętrznego łożyska (KZ). Wartość amplitudy sygnału uszkodzonego koła jest zbliżona do wartości występującej w poprzednim przypadku, a charakterystyki częstotliwościowe sygnałów w obu przypadkach są podobne. Kontakt kulek z uszkodzeniem bieżni zewnętrznej powoduje stały wzrost amplitudy sygnału, powtarzający się z częstotliwością występującego uszkodzenia. Jego wartość zmienia się jednak nieznacznie, co związane może być ze zmianą stanu dynamicznego przekładni zębatej.

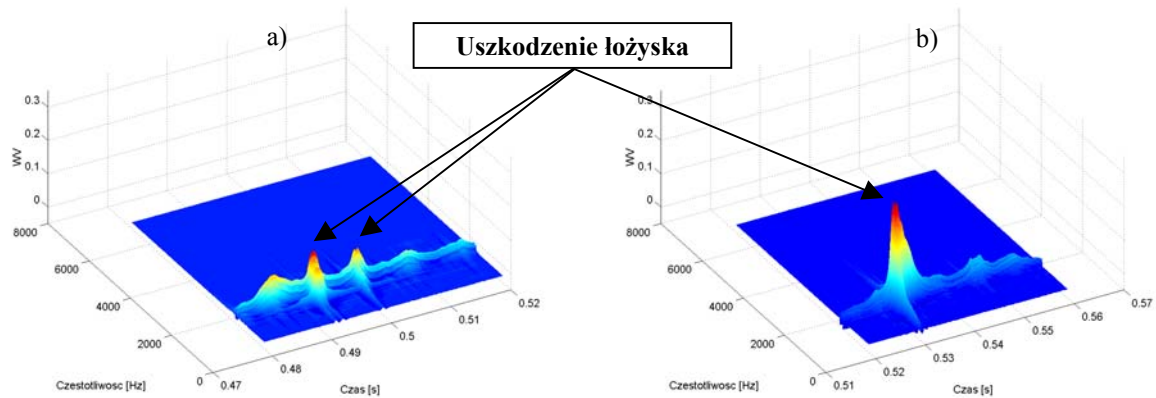
Tak więc, zaproponowana metoda dwustopniowej filtracji grzebieniowej oraz analiza Wignera-Ville'a otrzymanego sygnału pozwala na jednoznaczne wykrycie występującego wykruszenia zęba koła oraz uszkodzenia łożyska tocznego.



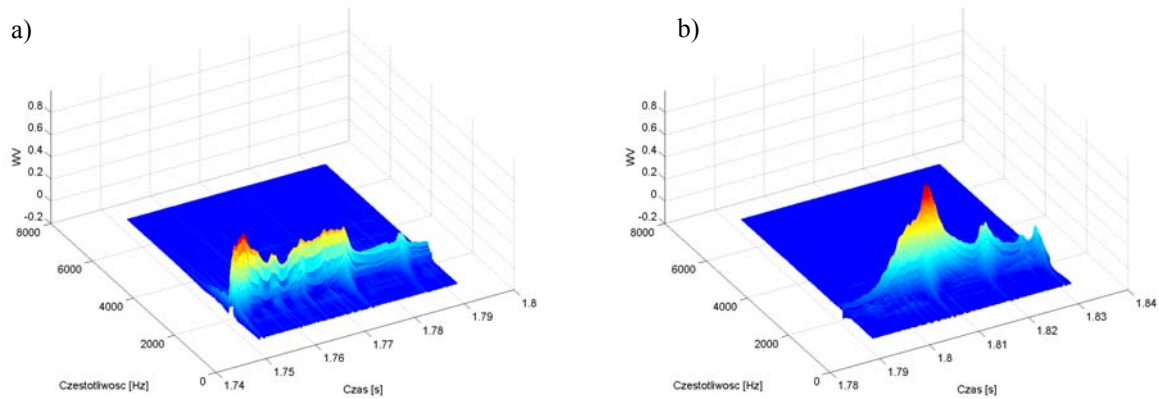
Rys.7 Czasowo-częstotliwościowa transformata WV prędkości drgań sygnału - wykruszony ząb-uszkodzony pierścień wewnętrzny łożyska (KW), dla: a) $t=0,479-0,518$ [s], b) $t=0,519-0,558$ [s]



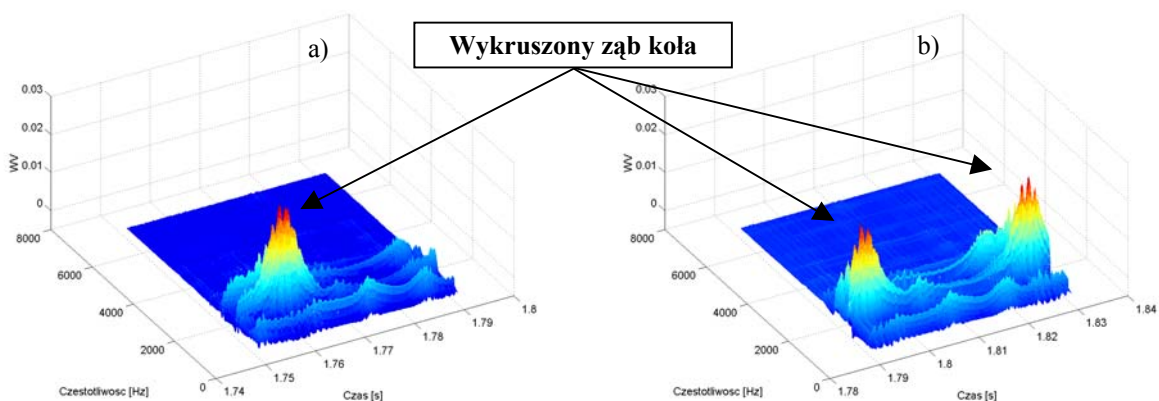
Rys.8 Czasowo-częstotliwościowa transformata WV prędkości drgań (KW po filtracji grzebieniowej I i III) sygnału różnicowego uszkodzonego koła, dla: a) $t=0,479-0,518$ [s], b) $t=0,519-0,558$ [s]



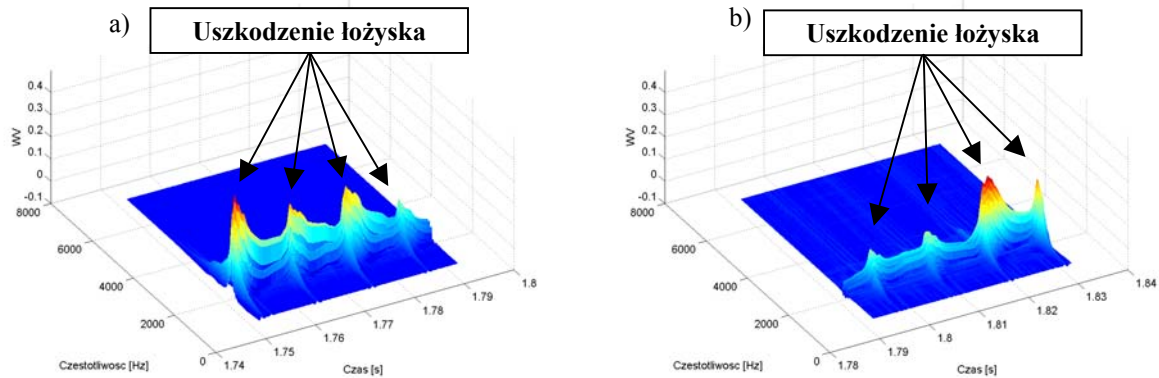
Rys.9 Czasowo-częstotliwościowa transformata WV prędkości drgań (KW po filtracji grzebieniowej II) sygnału uszkodzonego pierścienia wewnętrznego łożyska, dla: a) $t=0,479-0,518$ [s], b) $t=0,519-0,558$ [s]



Rys.10 Czasowo-częstotliwościowa transformata WV prędkości drgań sygnału - wykuszony ząb-uszkodzony pierścień zewnętrzny łożyska (KZ), dla: a) $t=1,749-1,788$ [s], b) $t=1,789-1,828$ [s]



Rys.11 Czasowo-częstotliwościowa transformata WV prędkości drgań (KZ po filtracji grzebieniowej I i III) sygnału różnicowego uszkodzonego koła, dla: a) $t=1,749-1,788$ [s], b) $t=1,789-1,828$ [s]



Rys.12. Czasowo-częstotliwościowa transformata WV prędkości drgań (KZ po filtracji grzebieniowej II) sygnału uszkodzonego pierścienia zewnętrznego łożyska, dla: a) $t=1,749-1,788$ [s], b) $t=1,789-1,828$ [s]

4. WNIOSKI

Metody analiz sygnałów wykorzystywane w diagnozowaniu stanu kół zębatych (rys.7 i 10) są niewystarczające przy wykrywaniu złożonych uszkodzeń przekładni zębatej.

W pracy zaproponowano metodę analizy sygnałów zorientowaną na wykrywanie występujących jednocześnie uszkodzeń kół zębatych i łożysk tocznych (rys.4). Wykorzystana w niej filtracja grzebieniowa umożliwiła separowanie częstotliwości związanych z występującymi uszkodzeniami, a zastosowana transformata Wignera-Ville'a – analizę otrzymanego sygnału w dziedzinie czasu i częstotliwości.

Obecnie prowadzone są dalsze badania nad wykorzystaniem przedstawionej w pracy metody.

LITERATURA:

- [1] Łazarz B., Wojnar G.: Diagnostowanie lokalnych uszkodzeń łożysk tocznych w przekładni zębatej. Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka 2003
- [2] Wilk A. Łazarz B. Madej H.: Diagnostyka wibroakustyczna przekładni zębatych, Konferencja DIAG'2003
- [3] Wilk A. Łazarz B. Madej H.: Wibroakustyczne symptomy uszkodzeń kół i łożysk tocznych przekładni zębatej. Biuletyn naukowo-techniczny. Szybkie Pojazdy Gąsienicowe. OBRUM nr 3. Gliwice 2003
- [4] Łazarz B., Wojnar G., Figlus T.: Wykrywanie uszkodzeń łożysk w przekładni zębatej, Zeszyty Naukowe Politechnik Śląskiej, seria: Transport nr 46, 2002
- [5] Wilk A. Łazarz B. Madej H.: Diagnostyka wczesnych stadiów rozwoju uszkodzeń kół zębatych. DIAGNOSTYKA vol.24. 2001
- [6] Figlus T., Wojnar G.: Zastosowanie metod wibroakustycznych do wykrywania wykruszenia zęba w obecności uszkodzeń łożysk tocznych przekładni. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Seria: Transport. Gliwice 2003



Mgr inż. Tomasz FIGLUS jest doktorantem w Katedrze Budowy Pojazdów Samochodowych Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej. Zajmuje się diagnozowaniem przekładni zębatych metodami wibroakustycznymi.



Prof. dr hab. inż. Andrzej WILK jest Kierownikiem Katedry Budowy Pojazdów Samochodowych Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej oraz Członkiem Zarządu Towarzystwa Diagnostyki Technicznej. Zajmuje się diagnozowaniem napędów zębatych metodami wibroakustycznymi oraz badaniami dynamicznymi układów napędowych z przekładniami zębatymi.

PROBLEMY OCENY TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ OKRĘTOWYCH, STALOWYCH STRUKTUR DWUPOWŁOKOWYCH TYPU SANDWICH

Janusz KOZAK

Politechnika Gdańska, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa, ul. Narutowicza 11/12,
80-952 Gdańsk, kozak@pg.gda.pl

Streszczenie

Przedstawiono ważniejsze problemy związane z realizacją cyklu badań mającego na celu określenie własności wytrzymałościowych stalowych dwupowłokowych paneli typu sandwich spawanych laserowo. Zaprezentowano założenia programu badawczego, pokazano wybrane problemy związane z realizacją tego programu, przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych konstrukcji.

Słowa kluczowe: spawanie laserowe, badania zmęczeniowe, konstrukcje dwupowłokowe.

FATIGUE DURABILITY ESTIMATION PROBLEMS OF ALL STEEL SANDWICH PANELS

Summary

Paper presents idea of the all steel SANDWICH panels as well as the laboratory fatigue tests results of such panels tested in natural scale.

Keywords: laser weld, fatigue tests, steel sandwich panels.

1. WPROWADZENIE

Gwałtowny rozwój technik wytwarzania obserwowany w ostatnich kilkudziesięciu latach nie ominął i konstrukcji statków. Pojawiły się nowe materiały, pojawiły się także nowe techniki i metody łączenia elementów konstrukcji. Wśród tych nowych metod coraz szersze zastosowanie w skali przemysłowej znajduje spawanie laserowe. Stosowanie tej techniki łączenia otwiera zupełnie nowe możliwości dla kształtowania konstrukcji metalowych ponieważ - między innymi - pozwala na wykonywanie połączeń w miejscach dotąd niedostępnych dla spawacza. Stąd można pokusić się o radykalną zmianę standardowego sposobu kształtowania konstrukcji kadłuba składającej się jak dotąd z systemu wiązań tworzących dwukierunkowy ruszt podpierający warstwę poszycia zapewniającą szczelność. Zamiast takiej struktury można proponować rozwiązania już stosowane w konstrukcjach z tworzyw sztucznych – dwie cienkie warstwy poszycia powiązane systemem wewnętrznych przewiązek umiejscowionych pomiędzy tymi powłokami. Tak wygląda idea konstrukcji typu SANDWICH. Ponieważ taka struktura odbiega dość mocno swymi własnościami od konstrukcji klasycznych – choćby z uwagi na anizotropię sztywności – toteż narzędzia analizy wytrzymałości sprawdzone dla używanych rozwiązań tu nie zawsze muszą dawać poprawne wyniki a zatem należy je zweryfikować i ewentualnie ulepszyć albo zaproponować nowe.

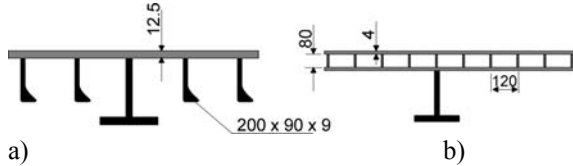
2. IDEA STRUKTURY TYPU SANDWICH

Idea zastąpienia klasycznej – ukształtowanej przez wieki – konstrukcji kadłuba statku nową cienką dwupowłokową strukturą z większością wiązań przebiegającą w jej wnętrzu pojawiła się na początku lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku i była rozwijana przez NASA – co zaowocowało szeregiem rozważań teoretycznych na temat metodologii określania wskaźników sztywności takiej struktury [1],[2],[3]. Poważne zainteresowanie tą ideą wykazała dopiero marynarka Stanów Zjednoczonych w końcu lat 80-tych wprowadzając panel typu LASCOR i stosując go do konstrukcji ścianek a przede wszystkim wysoko położonych platform. Najbardziej spektakularnym przykładem tej aplikacji było wykonanie platformy anteny na USS „Mt. Whitney” co pozwoliło zaoszczędzić 9 ton wagi wysoko położonej konstrukcji [4].

Kolejnym przykładem realizacji idei laserowo spawanych paneli są panele produkowane i oferowane przez stocznię Meyer Werft w Papenburgu. Panele te są już obecnie wytwarzane i stosowane na skalę przemysłową m.in. na pokłady unoszone statków do przewozu ładunków wtocznych (Ro-Ro), na wysoko położone pokłady morskich statków pasażerskich (sundecks), na wewnętrzne ścianki nadbudówek a także na duże fragmenty konstrukcji pokładów wycieczkowych statków rzecznych na Dunaj.

Zastosowana tu idea konstrukcji SANDWICH polega na stosowaniu stalowych bądź aluminiowych paneli wykonanych z dwóch płyt

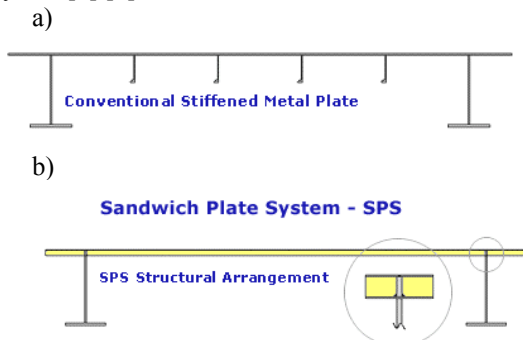
blach o grubości rzędu 1-4 mm każdy, oddalonych od siebie o 40-120 mm i połączonych pomiędzy sobą systemem jednokierunkowych wiązań wewnętrznych prowadzonych w odstępnie 40-120 mm – rys.1 – połączonych z poszyciem za pomocą spawania laserowego wykonywanego przez grubość poszycia.



Rys. 1. Konstrukcja pokładu statku typu Ro-Ro: klasyczna (a), wykonana z paneli Meyera (b).

Dla równoważnej wytrzymałościowo geometrii jak na rys.1 uzyskuje się około 34% redukcji ciężaru i 50% redukcji kosztów wykonania w stosunku do układu tradycyjnego [5].

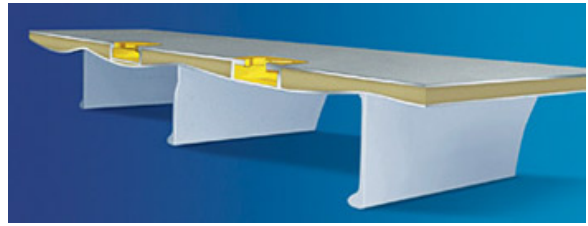
Innym sposobem realizacji stalowej struktury typu SANDWICH jest system SPS (sandwich plate system) wynaleziony w Uniwersytecie w Ontario przez prof. S.Kennedy. Idea panelu SPS polega na połączeniu dwóch powłok stalowych elastomerowym wypełniaczem (BASF Inoac) – rys. 2, [6],[7].



Rys. 2. Konstrukcja pokładu promy : klasyczna (a) oraz wykonana z paneli SPS (b) [8].

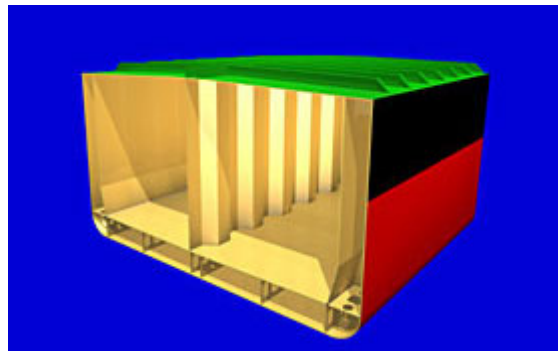
Oprócz korzyści wynikających z zastosowania tego typu rozwiązań w zupełnie nowych konstrukcjach, otwiera on też duże możliwości w technice remontu statków. System ten zastosowano między innymi do modernizacji pokładu promy „Pride of Cherbourg” – rys. 3.

Niezależnie od zastosowanej konstrukcji obszaru pomiędzy poszyciami panele mogą służyć jako podstawowe elementy konstrukcyjne pokładów, grodzi czy ścianek a stosowanie takiej struktury przynosi określone korzyści w postaci oszczędności ciężaru, prędkości czy wzrostu objętości pomieszczeń a także poprawienia bezpieczeństwa.



Rys. 3. Idea renowacji pokładu promy wykonana techniką SPS [8].

Na rys. 4 przedstawiono za [7] sposób uproszczenia konstrukcji tankowca poprzez zastosowanie struktury typu SPS i całkowitą eliminację niskich wiązań wzdłużnych.



Rys. 4. Przykład uproszczenia konstrukcji tankowca poprzez zastosowanie struktur panelowych [7]

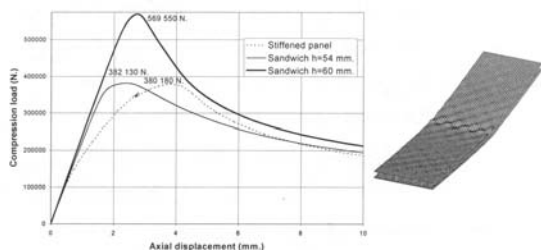
Szacuje się że zastosowanie takiego uproszczenia konstrukcji w obszarze 10.130 m³ przestrzeni ładunkowej producenta pozwoli wyeliminować 9000 m² płaskownika łebkowego i około 3700 detali konstrukcyjnych (źródeł pęknięć zmęczeniowych i korozji), co w efekcie przyniesie 40% redukcję objętości spoin na tym obszarze [7, 8].

Jednakże na to, aby nowe elementy konstrukcyjne mogły zostać zastosowane w strukturze kadłuba statku, należy posiadać informacje na temat ich odporności korozyjnej, ogniowej a przede wszystkim własności technologiczno-wytrzymałościowych w takim zakresie aby proponowane rozwiązania mogły uzyskać aprobatę Towarzystw Klasyfikacyjnych.

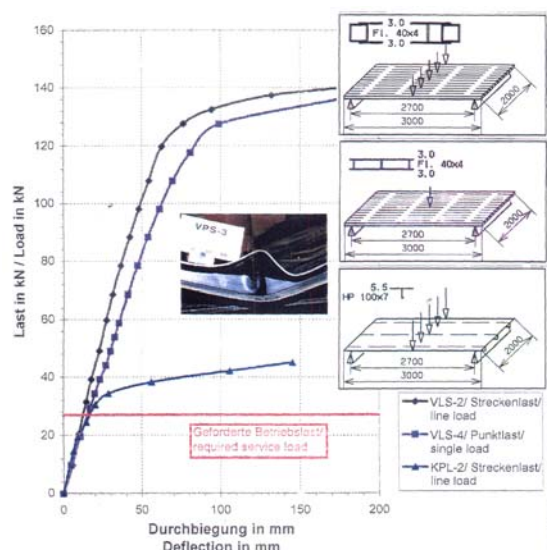
3. PRZYKŁADOWE WŁASNOŚCI PANELI TYPU SANDWICH

Stalowa struktura typu SANDWICH na skalę przemysłową w okrętownictwie zaczyna dopiero znajdować sobie miejsce, toteż nie ma systematycznych informacji na temat zachowania tych struktur w różnych warunkach eksploatacyjnych. Można jedynie znaleźć publikowane fragmentaryczne dane na temat wybranych własności takiej struktury. Na rys. 5 przedstawiono porównanie własności paneli SPS i klasycznej płyty usztywnionej ściskanych osiowo [4], zaś na rys. 6 przedstawiono za [5] wyniki badań statycznie zginanych paneli Meyera porównane z

wynikami badań panelu usztywnionego w sposób klasyczny



Rys. 5. Własności statecznościowe paneli stalowych typu SANDWICH pod obciążeniem osiowo - ściskającym w porównaniu do konstrukcji klasycznej [4].



Rys. 6. Sztywność modeli typu SANDWICH w trakcie zginania statycznego w porównaniu z konstrukcją klasyczną [5].

4. BADANIA WŁASNOŚCI STALOWYCH PANELI TYPU SANDWICH

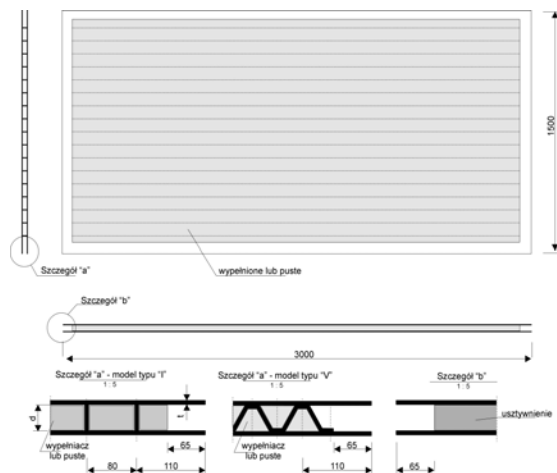
Na to, aby móc na skalę przemysłową stosować nowe rozwiązania konstrukcyjne potrzebne jest posiadanie narzędzi obliczeniowych - z jednej strony wystarczająco dokładnych, - z drugiej - na tyle mało skomplikowanych, aby można je było aplikować na poziomie przemysłowego biura projektowego. Takim narzędziem niewątpliwie jest metoda elementów skończonych (MES), jednakże typowe programy obliczeniowe MES stosowane w okrętownictwie z ich bibliotekami standardowych elementów nie nadają się do modelowania zachowania paneli typu SANDWICH spawanych laserowo, ponieważ nie pozwalają uwzględnić zjawisk typu kontaktowego, a takie pojawiają się w trakcie pracy paneli pod obciążeniem (w miejscu styku płyty poszycia z żebrami usztywniającymi) i mają znaczący wpływ na ich charakterystyki wytrzymałościowe.

Na to aby stosować do obliczeń projektowych formuły półempiryczne oparte o rozważania

teoretyczne albo poszerzać biblioteki elementów skończonych o nowe typy elementów oddających lepiej zachowanie struktur dwupowłokowych trzeba wcześniej dokonać ich weryfikacji na podstawie wyników badań konstrukcji rzeczywistej. Stąd podjęto realizację programu badawczego którego celem jest określenie zachowania pod obciążeniem stalowych, dwupowłokowych, wielkowymiarowych paneli spawanych laserowo. Ponieważ z oczywistych powodów nie ma żadnych wcześniejszych danych na temat własności takich struktur należało odpowiedzieć jednocześnie na szereg - nierzadko- wzajemnie powiązanych pytań. I tak należało dokonać pewnej optymalizacji geometrii elementów stalowych oraz dobrać odpowiedni rodzaj wypełniacza biorąc pod uwagę własności wytrzymałościowe, korozyjne, przeciwpożarowe i względy ekonomiczne. Dla tak wstępnie zawężonej geometrii należało dokonać weryfikacji podstawowych własności wytrzymałościowych w sensie jakościowym, dokonać weryfikacji odporności przeciwpożarowej i określenia charakterystyk tłumienia wibracji i w efekcie zawęzić ilość wariantów geometrii i rodzajów wypełniacza. Równocześnie należało prowadzić prace studialne związane z problematyką łączenia elementów typu „Sandwich” z typowymi „klasycznymi” elementami konstrukcyjnymi. I niejako na końcu procesu należało określić własności wytrzymałościowe - już w dużej mierze zoptymalizowanej geometrii - na podstawie badań paneli w skali naturalnej.

Tak sformułowany problem stał się przedmiotem programu badawczego „SANDWICH”, realizowanego w ramach V Programu Ramowego dofinansowanego z funduszy Unii Europejskiej w którym Wydział Budowy Okrętów Politechniki Gdańskiej jest jednym z uczestników, przeprowadzającym weryfikację własności wytrzymałościowych pełnowymiarowych paneli dwupowłokowych z realnymi układami usztywnień wewnętrznych i różnego typu wypełniaczami. Biorąc za punkt wyjścia geometrię rusztu typowego statku, możliwości wytwórcze największej przemysłowej linii spawania laserowego w Stoczni Meyer Werft w Papenburgu - wykonawcy modeli - oraz ograniczenia stanowiska badawczego w Laboratorium Technologii Okrętów i Obiektów Oceanotechnicznych Politechniki Gdańskiej jako obiekt do badań w skali naturalnej wybrano panel o wymiarach 3000 x 1500 mm w dwóch wariantach geometrii wnętrza - usztywnieniach prostokątnych do poszycia (I-core) oraz usztywnieniach skośnych do poszycia (V-core)

Trzy parametry wykonania modelu przyjęto jako zmienne niezależne: wysokość usztywnień, grubość poszycia oraz gęstość materiału wypełniającego - rys.7.



Rys. 7. Geometria modelu badawczego

Program badań obejmuje badania własności zarówno statycznych jak i zachowania zmęczeniowego. Aby maksymalnie wykorzystać przyjętą do badań liczbę modeli założono, że testowane one będą początkowo statycznie w sposób nieniszczący w różnych wariantach podparcia i obciążenia, a po zakończeniu takiego pełnego cyklu statycznego zostaną zniszczone statycznie bądź zmęczeniowo w wybranej konfiguracji warunków brzegowych i obciążenia.

Dla potrzeb weryfikacji rozwijanych wcześniej formuł obliczeniowych wybrano do programu badań kilka wariantów warunków brzegowych: swobodne podparcie dwóch brzegów (możliwość obrotu i przesunięcia podpory) z pozostawieniem pozostałych dwóch krawędzi swobodnych, podparcie obrotowe dwóch bądź wszystkich krawędzi modelu bez możliwości przesuwania oraz sztywno utwierdzenie wszystkich krawędzi. Do tego założono realizację kilku wariantów obciążenia: punktowe przyłożenie siły, obciążenie liniowe prostopadłe do osi modelu, obciążenie w postaci dwóch linii równoległych do osi wzdłużnej modelu, dyskretne obciążenie jednorodne w postaci ośmiopunktowej siły skupionej i wreszcie obciążenie równo rozłożone po całej powierzchni pochodzące od ciśnienia wody.

Przyjęcie w programie badań relatywnie dużej ilości wariantów obciążenia i podparcia stosunkowo dużego modelu a także zakładana liczba około pięćdziesięciu modeli w programie badawczym spowodowały konieczność poszukiwania takiego rozwiązania stanowiska badawczego, aby zmiana warunków brzegowych i sposobu obciążenia nie wymagała znaczących nakładów pracy i czasu. W efekcie poszukiwań zdecydowano się na budowę dwóch stanowisk: pierwszego do prowadzenia wariantu badań modelu z krawędziami sztywno utwierdzonymi obciążanego ciśnieniem hydrostatycznym, oraz drugiego – do realizacji pozostałych opcji programu badań.

5. WYNIKI BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH

Badania zmęczeniowe prowadzone były dla punktowego przyłożenia siły w środku modelu, przy wszystkich brzegach sztywno utwierdzonych. Model w trakcie badań pokazano na rys. 8.

Poziomo obciążenia dla badań zmęczeniowych dobierano na podstawie kalibracji kolejnymi statycznymi cyklami obciążenia w trakcie których rejestrowano wskazania czujników tensometrycznych umieszczonych na obu powłokach poszycia.

W trakcie badań modele były obciążane stałoamplitudowym cyklem obciążenia o częstotliwości około 4 Hz i współczynniku asymetrii cyklu R około 0,1.



Rys. 8. Model w trakcie badań zmęczeniowych

Pęknięcia zmęczeniowe pojawiały się w strefie przejścia lica spoiny w materiał rodzimy w blasze poszycia rozciąganego. Pęknięcia generalnie występowały pod środkowym zębem, jednakże w dwóch wypadkach pęknięcia o podobnym charakterze pojawiły się również pod zębem trzecim licząc od środka rozpiętości modelu. W każdym wypadku ich przyczyną była obecność naprężeń rozciągających w płycie poszycia, działających w kierunku prostopadłym do przebiegu spoiny. Na rys. 9 pokazano rejon występowania pęknięć a na rys. 10 sposób niszczenia modelu.



Rys. 9. Pęknięcia zmęczeniowe na modelu



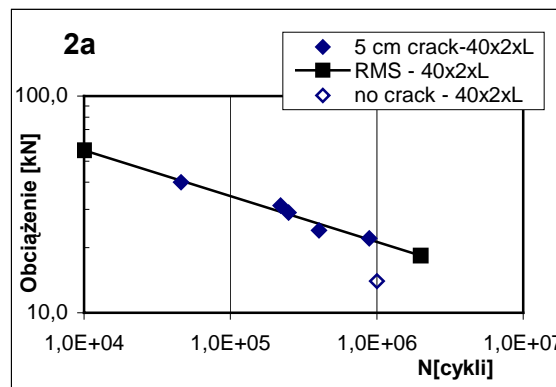
Rys. 10. Sposób niszczenia modelu

Analiza makrofraktograficzna wykazała obecność łańcucha drobnych ognisk zmęczeniowych na powierzchni pęknięcia. Dowodzi to jednorodnego charakteru struktury i braku zdecydowanie słabego miejsca typu wada spawalnicza. Na rys. 11 pokazano fragment powierzchni pęknięcia.



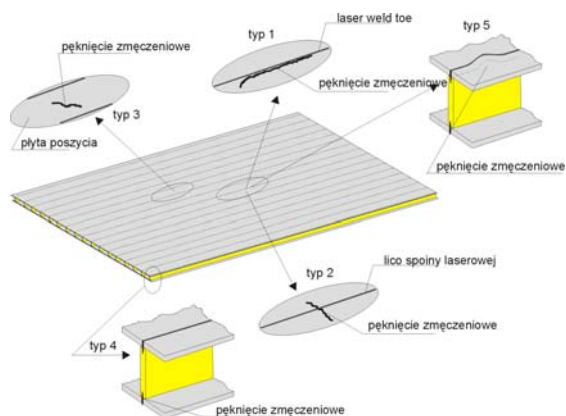
Rys. 11. Powierzchnia pęknięcia zmęczeniowego

Na rys. 12 przedstawiono wyniki trwałości modeli zestawione w układzie porównawczym „P - obciążenie – N - liczba cykli dla pęknięcia o długości 50 mm przyjmowanej w okrętownictwie jako długość wykrywalna w trakcie standardowej inspekcji statku – i definiowanego jako ‘visible crack’. Na wykresie dodatkowo naniesiono liniową aproksymację wyników badań, wykonaną metodą najmniejszych kwadratów.



Rys. 12. Trwałości modeli dla fazy „visible crack”

Współczynnik nachylenia krzywej aproksymującej wynosi około 4,25. Jeżeli przywołać tu wymagania Przepisów Klasyfikacyjnych Germanischer Lloyd [9] które zalecają dla klasycznych rozwiązań konstrukcyjnych stosowanie krzywych projektowych - dla połączeń spawanych – gdzie współczynnik nachylenia $m=3$, zaś dla wolnych krawędzi blach ciętych płomieniowo $m=5$ to widać iż własności zmęczeniowe spoiny laserowej obciążonej zmiennie obciążeniem prostopadłym do osi spoiny nie odbiegają od pęknięć rejestrowanych w warunkach rzeczywistych dla klasycznej konstrukcji okrętowej. Biorąc pod uwagę wyniki badań innych geometrii można powiedzieć ogólniej, że w konstrukcji dwupowłokowej spawanej laserowo może wystąpić jeden z pięciu modeli pęknięcia, w zależności od geometrii konstrukcji, przyjętego modelu obciążenia i podparcia. Pokazano to na rys. 13.



Rys. 13. Modele niszczenia stalowej konstrukcji „SANDWICH”

Na podstawie przedstawionych możliwych modeli niszczenia tego typu konstrukcji można pokusić się o wstępne sformułowanie zarysu metodyki projektowania wytrzymałości zmęczeniowej laserowo spawanych struktur dwupowłokowych typu SANDWICH: należy w pierwszej kolejności stworzyć populację projektowych krzywych zmęczeniowych dla każdego prezentowanych modeli niszczenia.

Wyników takich systematycznych badań jak dotąd nie opublikowano. Być może po przeprowadzeniu systematycznych badań elementarnych własności zmęczeniowych połączeń blach spawanych laserowo w konfiguracjach obciążenia wynikających z zaobserwowanych modeli pęknięcia - Rys.9 – okaże się że zachowanie części z tych modeli da się opisać krzywymi projektowymi dla konstrukcji spawanej w sposób klasyczny – wymaga to udowodnienia.

W dalszej części procedura weryfikacji trwałości zmęczeniowej powinna polegać na określeniu pola rozkładu odkształceń i naprężeń a na podstawie tych danych na wyborze spodziewanego modelu niszczenia. Pozwoli to na zastosowanie właściwej krzywej projektowej w celu określenia trwałości zmęczeniowej.

6. WNIOSKI

- Dokonano przeglądu stanu wiedzy na temat własności wytrzymałościowych stalowych struktur wielopowłokowych. Stalowe panele wielopowłokowe wnoszą duży potencjał możliwości dla konstrukcji cienkościennych jakimi są konstrukcje statków z uwagi na korzystne wskaźniki objętościowo-ciężarowe.
- Własności zmęczeniowe paneli wielopowłokowych na poziomie wytrzymałości strefowej mogą odbiegać od własności klasycznej konstrukcji w podobnych warunkach obciążenia i utwierdzenia gdyż wielkości naprężeń rzeczywistych mogą tu znacznie odbiegać od obliczanych teoretycznie z uwagi na bardziej złożony mechanizm pracy złącza spawanego laserowo.
- Dodatkowo oprócz problemów wynikających z poprzedniego wniosku, panele z racji obecności w ich konstrukcji cienkich powłok są znacznie bardziej wrażliwe na niedoskonałość wykonania. Obecność nawet nieznacznych deformacji montażowych w poszyciu znacząco zmienia rzeczywiste rozkłady naprężeń a stąd może utrudniać proces obliczeń trwałości zmęczeniowej.
- Projekt SANDWICH realizowany w ramach V-go Programu Ramowego Unii Europejskiej znacząco poszerzył wiedzę na temat podstawowych własności stalowych struktur dwupowłokowych.

- [1] Tat-Ching Fung, Shear Stiffness for C-core Sandwich Panels, *Journal of Structural Engineering*, August 1996, pp.958-966
- [2] T.S.Lok, Q.H.Cheng, Elastic Stiffness Properties and Behaviour of Truss-core Sandwich Panels, *Journal of Structural Engineering*, May 2000, pp.552-559
- [3] T.S.Lok, Q.H.Cheng, Elastic deflection of Thin-Walled Sandwich Panel, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, October 1999, pp.279-298.
- [4] Tanguy Quesnel, Preliminary Study on Steel Composite Sandwich Panels: Shipbuilding Application, IRCN papers, Nantes, France.
- [5] Roland F., Metschkow B., Laser Welded Sandwich Panels for Shipbuilding and Structural Steel Engineering, materials from Meyer Werft.
- [6] A tasty steel-polymer sandwich, *Fairplay Solution*, October 2000, pp. 20-21
- [7] *Marine Bulletin*, Lloyds Register, September 2000.
- [8] www.ie-sps.com
- [9] Germanischer Lloyd Rules.



Dr inż. Janusz Kozak jest adiunktem w Katedrze Technologii Okrętów, Systemów Jakości i Materiałoznawstwa Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej. W pracy zawodowej zajmuje się problemami

wytrzymałości zmęczeniowej konstrukcji okrętowych.

7. LITERATURA

WYKORZYSTANIE SIECI NEURONOWYCH DO IDENTYFIKACJI PĘKNIĘCIA STOPY ZĘBA

Bogusław ŁAZARZ, Piotr CZECH

Katedra Budowy Pojazdów Samochodowych, Wydział Transportu, Politechnika Śląska
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, e-mail: łazarz@polsl.katowice.pl, pczech@polsl.katowice.pl

Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono wyniki eksperymentu mającego na celu próbę zastosowania sztucznej sieci neuronowej jako klasyfikatora stopnia podcięcia zęba w przekładni zębatej. Klasyfikator neuronowy oparto na sztucznej sieci neuronowej typu SVM z jądrem radialnym. Dane wejściowe do klasyfikatora stanowiła macierz złożona z miar statystycznych. Zidentyfikowany model przekładni zębatej stanowiska FZG posłużył do generacji zbioru uczącego i testującego zastosowanego w eksperymencie.

Słowa kluczowe: diagnostyka, przekładnie zębate, sztuczne sieci neuronowe.

AN IDENTIFICATION OF THE DEGREE OF THE TOOTH ROOT CRACKING USING THE ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

Summary

The work presents results of an experiment that employs the artificial neuronal network in the task of identification of the degree of tooth root cracking. Neural Networks were based on the Support Vector Machine and the radial basis function kernel has been chosen in the experiments. Statistical measures that describe the emergence and degree of tooth gear diagnostic served as input data for the artificial neural networks. The measures employed in the experiment were obtained from signals through the application of a variety of processing methods.

Keywords: diagnostics, gear faults, neural network.

1. WSTĘP

Szybki i wielokierunkowy rozwój metodologii diagnostycznej w ostatnich latach spowodował powstanie nowych metod stosowanych w systemach lokalizacji uszkodzeń oraz rozpoznawania stanu obiektów [12,29,33]. Zaczęto interesować się zastosowaniem sztucznej inteligencji w diagnozowaniu stanu urządzeń [1,2,11,4]. Jedną z metod należącą do tej grupy są sztuczne sieci neuronowe, które znajdują zastosowanie

w coraz to nowych obszarach wiedzy. Sieci neuronowe należą do wyrafinowanych technik modelowania, zdolnych do odwzorowania nadzwyczaj złożonych funkcji z dużą liczbą zmiennych niezależnych [25,31].

Zasada działania sztucznych sieci neuronowych oparta jest na egzekwowaniu wiedzy, w którą została ona zaopatrzona w procesie uczenia [25,31]. W procesie tym zostają pokazane kolejno dane, które sieć w procesie uczenia uogólnia. Nauczona sztuczna sieć neuronowa korzysta ze swojej wiedzy na zasadzie asocjacji, podobnie jak dzieje się to w mózgu człowieka [24].

Sztuczna sieć neuronowa składa się z połączonych ze sobą elementów, zwanych neuronami. Aby doszło do uczenia każdemu z neuronów muszą zostać pokazane dane uczące, od których jakości zależą późniejsze efekty otrzymane w wyniku działania sieci neuronowych.

W literaturze można spotkać się z wieloma typami sztucznych sieci neuronowych [24,25,31]. Struktury sieci neuronowe można podzielić ze względu na typ problemu do jakiego zostały one użyte. Należą do nich następujące zadania [31]:

- klasyfikacji → podział na kategorie według kryteriów,
- klasteryzacji → klasyfikacja bezwzorcowa,
- aproksymacji → zadania regresyjne,
- prognozowania → przewidywanie zjawisk w przyszłości na podstawie danych retrospekcyjnych.

Ze względu na sposób uczenia sztuczne sieci neuronowe dzielą się na samoorganizujące (uczone bez nauczyciela) oraz na uczone z nauczycielem. Zasada nauki z nauczycielem opiera się na fakcie, że w trakcie procesu uczenia, sieci oprócz danych wejściowych (symptomów) zostaje pokazany stan jej wyjść. Proces uczenia opiera się w tym przypadku na minimalizacji błędu między uzyskaną z sieci neuronowej wartością na wyjściu, a jej wartością oczekiwaną [25,31].

Zgodnie ze sposobem przepływu danych w sieciach neuronowych można je podzielić na sieci jednokierunkowe i sieci ze sprzężeniem zwrotnym (rekurencyjne) [25,31]. W sieciach jednokierunkowych informacja przebiega od wejść sieci do jej wyjść, natomiast w sieciach ze sprzężeniem zwrotnym stan wyjść neuronów może być źródłem danych wejściowych podawanych na wcześniejsze warstwy sieci.

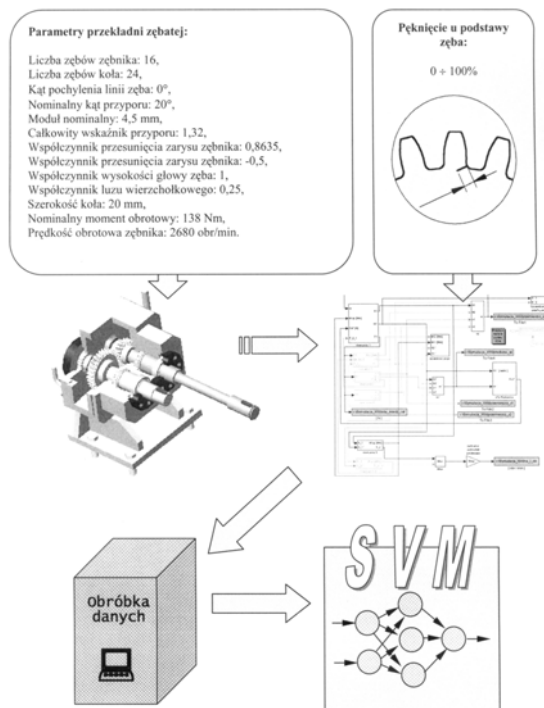
W przeprowadzonym eksperymencie postanowiono sprawdzić, czy miary statystyczne pozwolą dobrze określić związki między sygnałami dignostycznymi (symptomami) a stanem maszyny roboczej [3,11,29,33,34] oraz czy można je z powodzeniem stosować w zadaniach klasyfikacji i regresji w sieciach neuronowych.

2. OBIEKT BADAŃ

Celem eksperymentu była próba zastosowania klasyfikatora neuronowego, dla którego miary statystyczne stanowiły dane wejściowe.

W badaniach posłużono się zidentyfikowanym modelem przekładni zębatej pracującej w układzie mocy krążącej [15]. Model ten posłużył do generacji sygnałów będących podstawą otrzymania danych wejściowych dla klasyfikatora neuronowego.

Schemat przeprowadzonego eksperymentu przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Metodologia przeprowadzania eksperymentu

Parametry badanej przekładni:

- koła zębate o zębach prostych,
- liczba zębów zębniaka: $z_1 = 16$,

- liczba zębów koła: $z_2 = 24$,
- współczynnik przesunięcia zarysu zębniaka: $x_1 = 0,8635$,
- współczynnik przesunięcia zarysu koła: $x_2 = -0,5$,
- nominalny kąt przyporu: $\alpha = 20^\circ$,
- moduł nominalny: $m_n = 4,5$ mm,
- całkowity wskaźnik przyporu: $\varepsilon_\alpha = 1,32$,
- współczynnik wysokości głowy zęba: $h_{a0} = 1$,
- współczynnik luzu wierzchołkowego: $c_0 = 0,25$,
- szerokość koła: $b = 20$ mm,
- nominalny moment obrotowy: $M = 138$ Nm,
- prędkość obrotowa zębniaka: $n = 2680$ obr/min.

Zidentyfikowany model przekładni posłużył do symulacji przyspieszeń poprzecznych drgań wału zębniaka przy różnym stopniu rozwoju pęknięcia u podstawy zęba [16]. Symulowanie pęknięcia zęba u podstawy polegało na obniżeniu jego sztywności o ustaloną wartość w stosunku do sztywności zęba nieuszkodzonego.

Symulacje zostały podzielone na trzy serie:

1) seria pierwsza:

- odchyłka cykliczna dla zębniaka: $0 \mu\text{m}$ /długość podziałki,
- odchyłka cykliczna dla koła: $0 \mu\text{m}$ /długość podziałki,
- odchyłka losowa \rightarrow maksymalny błąd wykonania zębniaka: $0 \mu\text{m}$,
- odchyłka losowa \rightarrow maksymalny błąd wykonania koła: $0 \mu\text{m}$,

2) seria druga:

- odchyłka cykliczna dla zębniaka: $-7 \mu\text{m}$ /długość podziałki,
- odchyłka cykliczna dla koła: $5 \mu\text{m}$ /długość podziałki,
- odchyłka losowa \rightarrow maksymalny błąd wykonania zębniaka: $\pm 4,5 \mu\text{m}$,
- odchyłka losowa \rightarrow maksymalny błąd wykonania koła: $\pm 4,5 \mu\text{m}$,

3) seria trzecia:

- odchyłka cykliczna dla zębniaka: $-14 \mu\text{m}$ /długość podziałki,
- odchyłka cykliczna dla koła: $10 \mu\text{m}$ /długość podziałki,
- odchyłka losowa \rightarrow maksymalny błąd wykonania zębniaka: $\pm 9 \mu\text{m}$,
- odchyłka losowa \rightarrow maksymalny błąd wykonania koła: $\pm 9 \mu\text{m}$.

W pierwszej serii pomiarowej zasymulowano pracę bezbłędną przekładni zębatej. Seria druga i trzecia to wyniki dla przekładni wykonanej dokładnie oraz przekładni z kołami zębatymi z podwyższoną wartością błędów wykonania.

W celu sprawdzenia powtarzalności wyników serię drugą i trzecią powtórzono pięciokrotnie przy różnych błędach losowych.

Każdą symulację przeprowadzono dla uszkodzenia zęba w postaci podcięcia jego podstawy w zakresie od 0 do 100%. W sumie otrzymano 1111 symulacji.

3. MIARY DIAGNOSTYCZNE

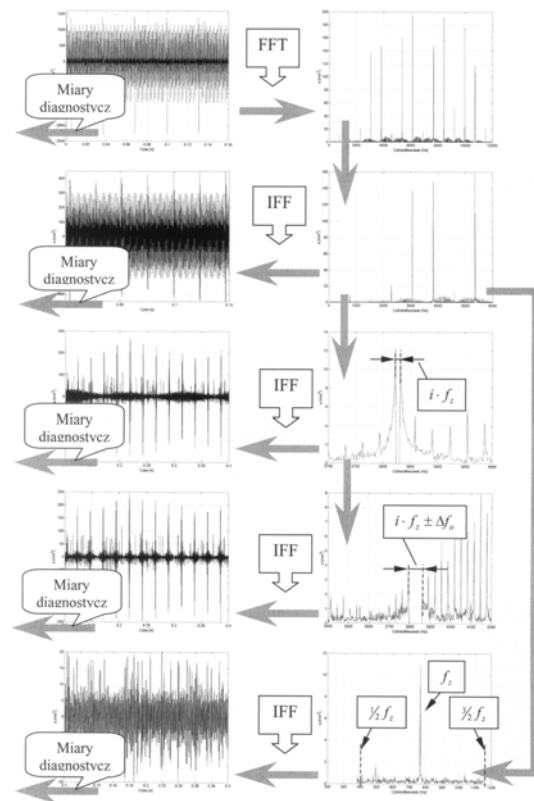
Diagnostyka wibroakustyczna wykorzystuje jako źródło informacji o stanie badanego obiektu parametry dynamiczne generowane w trakcie powstania i propagacji uszkodzenia [3,29,32,33,34].

W eksperymencie za źródło informacji przyjęto sygnał czasowy przyspieszeń poprzecznych drgań wału zębniaka [17].

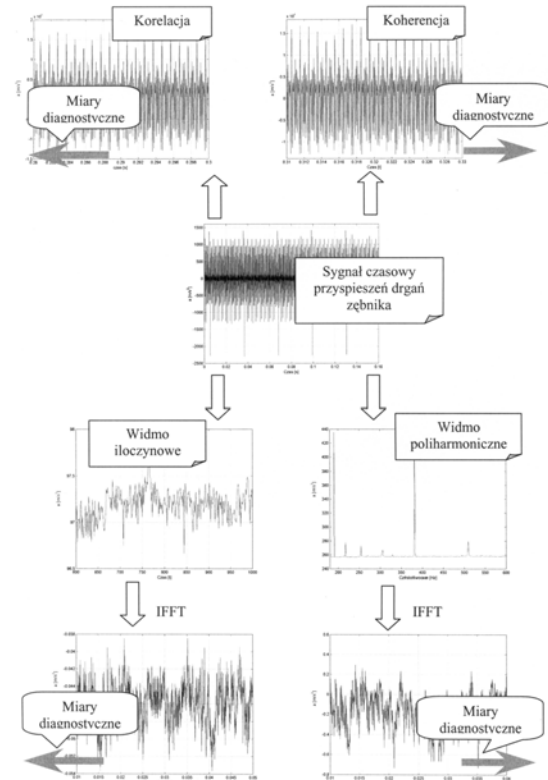
Za miary określające wystąpienie i stopień uszkodzenia przyjęto miary statystyczne (miary położenia, miary zróżnicowania, miary asymetrii i kurtozy) [5,6,7,9,14,18,21,22,23,28,32,34,36]. Użyte miary należą zarówno do estymat prostych (miar punktowych) oraz estymat specjalnych (dyskryminant) [3].

W badaniach wyznaczono następujące miary:

- wartość skuteczną (RMS),
- wartość szczytową (peak),
- maksimum,
- minimum,
- średnią arytmetyczną (moment centralny rzędu pierwszego),
- średnią geometryczną,
- średnią harmoniczną,
- odchylenie standardowe (obciążone, nieobciążone),
- wariacje obciążoną (moment centralny rzędu drugiego),
- wariacje nieobciążoną (moment centralny rzędu drugiego),
- kwartył pierwszy,
- kwartył drugi (mediana),
- kwartył trzeci,
- odchylenie ćwiartkowe,
- pozycyjny współczynnik zmienności,
- odchylenie przeciętne,
- współczynnik zmienności (obciążony, nieobciążony),
- momenty centralne rzędu 3 ÷ 10,
- współczynnik skupienia (kurtozę, kurtozę standaryzowaną),
- współczynnik asymetrii (standaryzowany),
- współczynnik kształtu,
- współczynnik impulsowości,
- współczynnik luzu,
- współczynnik szczytu,
- dyskryminantę X0 (FM0),
- dyskryminantę X4 (FM4, NA4, NB4),
- dyskryminantę X6 (M6A),
- dyskryminantę X8 (M8A),
- dyskryminantę X10 (M10A),
- energię sygnału,
- bilans energetyczny.



Rys. 2. Metodologia wyznaczania miar diagnostycznych (I)



Rys. 3. Metodologia wyznaczania miar diagnostycznych (II)

Poszczególne miary były wyznaczone dla sygnałów czasowych przyspieszeń poprzecznych drgań wału zębniaka (rys. 2 i 3) [17].

Uzyskane z symulacji sygnały poddano dalszej obróbce uzyskując sygnały czasowe [7,18,21,22,23,32,36]:

- z widma przyspieszeń drgań w całym zakresie częstotliwości (nr porz. 1),
- z widma przyspieszeń drgań w zakresie od 0 do 6 kHz (nr porz. 2),
- z widma przyspieszeń drgań w zakresie od 0 do 6 kHz sygnału różnicowego (nr porz. 3),
- z widma przyspieszeń drgań w zakresie od 0 do 6 kHz z sygnału resztkowego (nr porz. 4),
- z widma przyspieszeń drgań w zakresie od $\frac{1}{2}f_z$ do $\frac{3}{2}f_z$ (nr porz. 5),
- z widma obwiedni przyspieszeń drgań w całym zakresie częstotliwości (nr porz. 6),
- z widma obwiedni przyspieszeń drgań w zakresie od 0 do 6 kHz (nr porz. 7),
- z widma obwiedni przyspieszeń drgań w zakresie od 0 do 6 kHz sygnału różnicowego (nr porz. 8),
- z widma obwiedni przyspieszeń drgań w zakresie od 0 do 6 kHz z sygnału resztkowego (nr porz. 9),
- z widma obwiedni przyspieszeń drgań w zakresie od $\frac{1}{2}f_z$ do $\frac{3}{2}f_z$ (nr porz. 10),
- z widma poliharmonicznego przyspieszeń drgań w zakresie od 0 do 6 kHz (nr porz. 11),
- z widma poliharmonicznego przyspieszeń drgań w zakresie od 0 do 6 kHz sygnału różnicowego (nr porz. 12),
- z widma poliharmonicznego przyspieszeń drgań w zakresie od 0 do 6 kHz z sygnału resztkowego (nr porz. 13),
- z widma iloczynowego przyspieszeń drgań w zakresie od 0 do 6 kHz (nr porz. 14),
- z widma iloczynowego przyspieszeń drgań w zakresie od 0 do 6 kHz sygnału różnicowego (nr porz. 15),
- z widma iloczynowego przyspieszeń drgań w zakresie od 0 do 6 kHz z sygnału resztkowego (nr porz. 16),
- korelacji sygnału czasowego uzyskanego z widma przyspieszeń drgań w zakresie od 0 do 6 kHz (nr porz. 17),
- korelacji sygnału czasowego uzyskanego z widma przyspieszeń drgań w zakresie od 0 do 6 kHz sygnału różnicowego (nr porz. 18),
- korelacji sygnału czasowego uzyskanego z widma przyspieszeń drgań w zakresie od

0 do 6 kHz z sygnału resztkowego (nr porz. 19),

- kowariancji sygnału czasowego uzyskanego z widma przyspieszeń drgań w zakresie od 0 do 6 kHz (nr porz. 20),
- kowariancji sygnału czasowego uzyskanego z widma przyspieszeń drgań w zakresie od 0 do 6 kHz sygnału różnicowego (nr porz. 21),
- kowariancji sygnału czasowego uzyskanego z widma przyspieszeń drgań w zakresie od 0 do 6 kHz z sygnału resztkowego (nr porz. 22).

Sygnał resztkowy otrzymano usuwając z jego widma pasma zawierające składowe obrotowe wałów kół oraz składowe częstotliwości zazębienia i jej harmonicznych.

Sygnał różnicowy otrzymano poprzez dodatkowe usunięcie z widma wokół częstotliwości zazębienia wstęg bocznych związanych z częstotliwościami obrotowymi kół zębatych [18,22,23].

4. DOBÓR DANYCH WEJŚCIOWYCH, TYPU I ARCHITEKTURY SZTUCZNEJ SIECI NEURONOWEJ UŻYTEJ W EKSPERYMENCIE

W przeprowadzonym eksperymencie postanowiono sprawdzić przydatność wykorzystania metody sztucznej inteligencji w diagnozowaniu stopnia podcięcia zęba w przekładni zębatych.

W literaturze można spotkać udane eksperymenty mające na celu wykorzystanie metod sztucznej inteligencji w diagnostyce stanu maszyn [1,2,4,8,10,11,13,28,35,36].

Podstawowym problemem w przypadku zastosowania sztucznych sieci neuronowych jest dobór danych wejściowych, w których będą zapisane niezbędne dane umożliwiające sieci prawidłową klasyfikację obiektów.

W eksperymencie za dane wejściowe do sieci neuronowej zostały wybrane miary statystyczne uzyskane z przebiegów przyspieszeń poprzecznych drgań wału zębniaka.

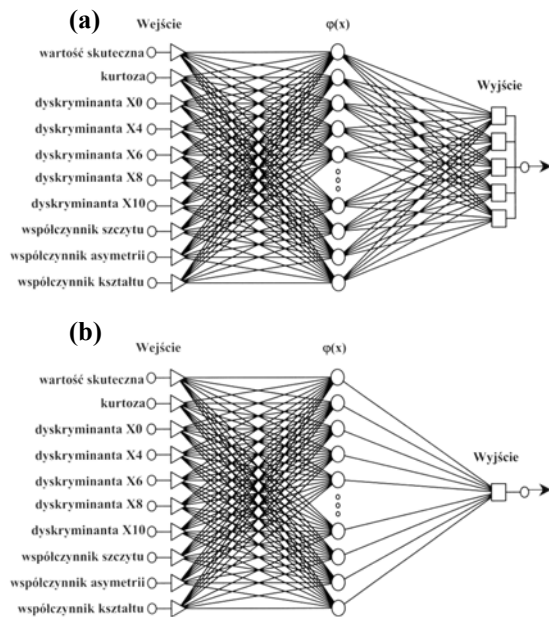
Korzystając z tych miar podjęto próbę utworzenia zbioru parametrów diagnostycznych, które mogłyby być wykorzystane do klasyfikacji stopnia podcięcia zęba [29].

Przestrzeń klasyfikacyjna reprezentowana była przez macierz utworzoną z wyznaczonych miar, które charakteryzowały się największą wrażliwością:

- wartość skuteczną,
- kurtozę,
- dyskryminantę X0,
- dyskryminantę X4,
- dyskryminantę X6,
- dyskryminantę X8,

- dyskryminantę X10,
- współczynnik szczytu,
- współczynnik asymetrii,
- współczynnik kształtu.

W badaniach wykorzystano sztuczną sieć neuronową typu SVM (Support Vector Machine) [19,26,27]. Sieć ta należy do sieci jednokierunkowych. Sieci te mają najczęściej budowę dwuwarstwową i posiadają warstwę ukrytą i wyjściową (rys. 4).



Rys. 4. Struktura sztucznej sieci neuronowej typu SVM w zadaniu: (a) klasyfikacji, (b) regresji

Za funkcję aktywacji $\phi(x)$ w tym typie sieci można przyjąć:

- funkcję liniową,
- funkcję wielomianową,
- funkcję radialną,
- funkcję sigmoidalną.

W eksperymencie badawczym jako funkcję aktywacji przyjęto funkcję radialną.

Sieci neuronowe typu SVM wymagają uczenia z nauczycielem [25,31]. Do algorytmów uczenia tego typu sieci neuronowych należą strategie „jeden przeciw wszystkim”, „jeden przeciw jednemu” oraz ich kombinacje [26,27].

Problem klasyfikacji wzorców nie separalnych liniowo sprowadza się do określenia takiej optymalnej hiperpłaszczyzny, która zminimalizuje prawdopodobieństwo wystąpienia błędu klasyfikacji na zbiorze uczącym z możliwie najszerszym marginesem separacji.

W celu zmniejszenia błędu zmieniało następujące współczynniki sieci SVM:

- szerokości marginesu błędu uczenia i testowania sieci (ϵ),
- kosztu (C),

- wartości gamma.

Szerokość marginesu błędu określa dopuszczalną odchyłkę, dla której wyniki o mniejszej odchyłce nie są traktowane jako błąd.

Parametr kosztu jest parametrem sterującym złożonością sieci SVM. Określa on wagę z jaką traktujemy błędy testowania sieci w stosunku do ustalonego marginesu separacji.

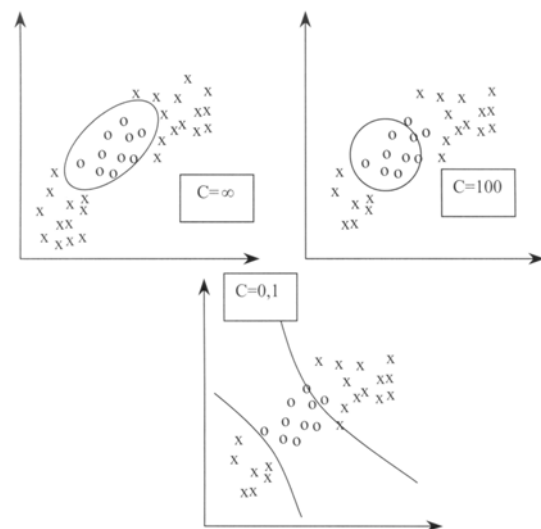
Parametr gamma określony jest dla radialnej funkcji jądra z zależności: $\gamma = \frac{1}{\sigma^2}$.

Optymalizację sieci SVM można przeprowadzać następujący sposób:

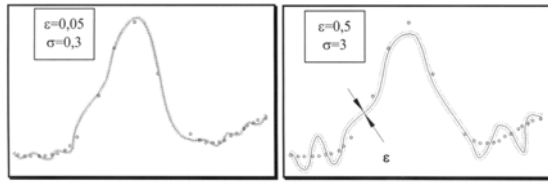
- optymalizując za każdym razem wszystkie parametry sieci (ϵ , C, γ),
- zakładając współczynnik tolerancji błędów na stałym poziomie optymalizując pozostałe parametry sieci (C, γ),
- zakładając współczynnik C i γ optymalizując współczynnik tolerancji.

W pracy wybrano optymalizację współczynników C i γ przy założonym współczynniku tolerancji błędów ϵ . Optymalizowano parametry sieci SVM poszukując najmniejszej wartości błędu dla stałej wartości współczynników ϵ i γ zmieniając wartość współczynnika C. Następnie dla sieci charakteryzującej się najmniejszym błędem dla ustalonego współczynnika C, poszukiwano wartość współczynnika γ , dla której sieć popeliła najmniej błędów.

Wpływ wielkości współczynnika kosztu w sieciach SVM został zilustrowany na rysunku 5. Natomiast wpływ wielkości szerokości marginesu błędu uczenia i testowania dla sieci SVM oraz wpływ współczynnika σ na rozwiązywanie problemów regresyjnych przedstawia rysunek 6.



Rys. 5. Wpływ współczynnika kosztu na proces klasyfikacji wzorców



Rys. 6. Wpływ wielkości szerokości marginesu błęd oraz wpływ współczynnika σ na rozwiązywanie problemów regresyjnych

W eksperymencie postanowiono sprawdzić działanie sieci typu SVM jako klasyfikatora oraz w zadaniu regresyjnym.

W zadaniu klasyfikacji podzielono zakres stopnia pęknięcia podstawy zęba na pięć klas:

- 0 ÷ 20 %,
- 21 ÷ 40 %,
- 41 ÷ 60 %,
- 61 ÷ 80 %,
- 81 ÷ 100 %,

do których nauczona sztuczna sieć neuronowa miała klasyfikować przypadki z uszkodzeniami kół zębatych.

W zadaniu aproksymacji postanowiono sprawdzić działanie sztucznej sieci neuronowej w rozpoznawaniu konkretnych wartości stopnia pęknięcia podstawy zęba.

5. WYNIKI EKSPERYMENTU

Użycie sztucznej sieci neuronowej jako klasyfikatora wymaga stosowania takich miar na wejście, w których będą zapisane niezbędne dane umożliwiające sieci prawidłową klasyfikację obiektów [29]. Eksperyment miał dostarczyć informacji dotyczących możliwości zastosowania miar statystycznych do nauki klasyfikatora neuronowego. Dane takie muszą charakteryzować w sposób kompletny, pełny i jednoznaczny badane zjawisko. Chcąc określić stopień podcięcia zęba, klasyfikator musi posiadać wystarczającą wiedzę, która pozwoli mu odróżnić poszczególne poziomy uszkodzeń.

Najlepszą miarą lub zespołem miar byłyby estymaty, których wartości zmieniałyby się w całym zakresie poziomu uszkodzenia. Sieć nauczona na takich danych wejściowych, wykorzystując swoje możliwości uogólniania wiedzy potrafiłaby określić dokładnie stopień uszkodzenia zębów przekładni pracujących w zmiennych warunkach pracy (obciążenie, prędkość obrotowa) oraz dla różnych klas dokładności wykonania przekładni.

Przeprowadzone analizy wybranych miar pokazują, że żadna z nich nie jest wrażliwa w całym zakresie zmian uszkodzenia i nie może

być użyta samodzielnie jako miara określająca dokładnie stopień podcięcia zęba.

Badania wykazały, że miary przekładni bezbłędnie wykonanej (seria 1) wykazują wrażliwość w szerszym zakresie uszkodzenia w postaci wielkości podcięcia zęba. Przykładowo dla przekładni bezbłędnie wykonanej kurtoza z sygnału resztkowego wykazuje wrażliwość od 20% uszkodzenia, gdy natomiast dla przekładni z błędami cyklicznymi i losowymi wrażliwość tej estymaty obniża się do 50% i 75% uszkodzenia dla przyspieszeń drgań zębniaka uzyskanych odpowiednio w serii 2 i 3 (rys. 7). Innym przykładem jest bilans energetyczny, którego wrażliwość na propagację podcięcia zęba dla przekładni bezbłędnie wykonanej obejmuje cały przedział stopnia uszkodzenia, natomiast jest praktycznie niewrażliwy dla przekładni wykonanych z błędami cyklicznymi i losowymi (rys. 8).

Z przeprowadzonego eksperymentu wynika konieczność dalszych badań mających na celu znalezienie miar, które dostarczyłyby informacji diagnostycznej o powstałym uszkodzeniu w stopniu umożliwiającym zastosowanie ich jako danych wejściowych dla sztucznych sieci neuronowych.

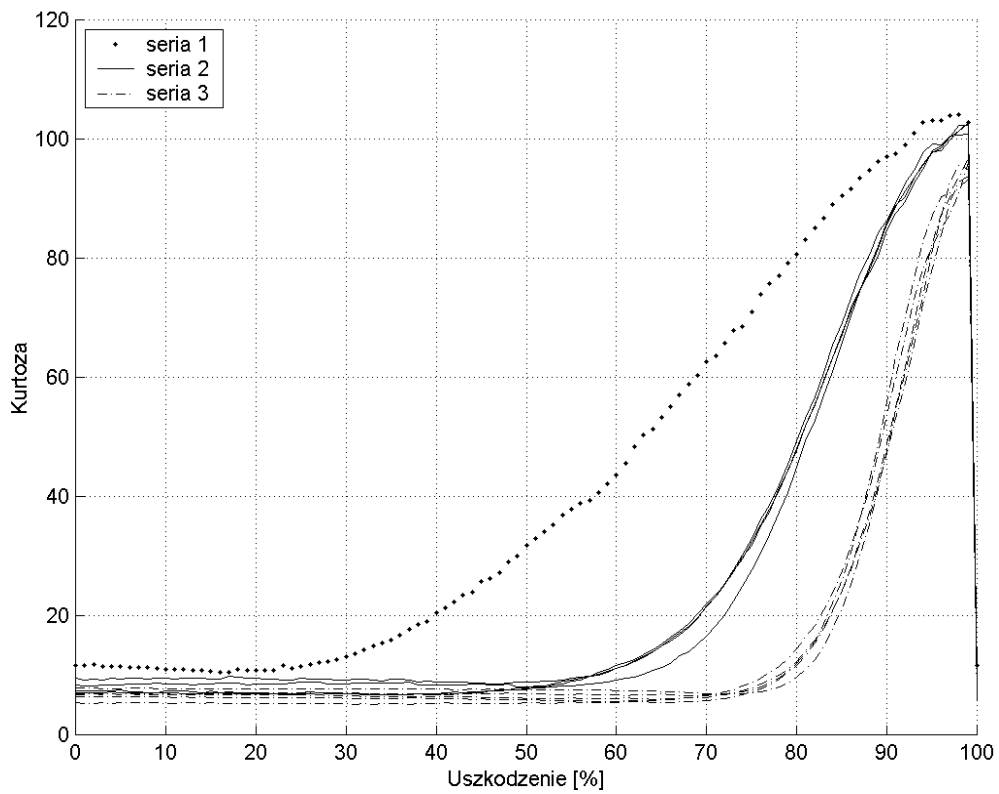
Kolejne badania mające na celu znalezienie miar odpowiednich jako dane wejściowe dla sztucznych sieci neuronowych powinny objąć poszukiwanie odpowiednich miar sygnałów na podstawie analizy cepstrum, bispectrum, transformaty falkowej lub Wignera-Ville'a itp.

Wyniki eksperymentu użycia sztucznej sieci neuronowej typu SVM w zadaniu klasyfikacji przedstawiono w tabeli 1.

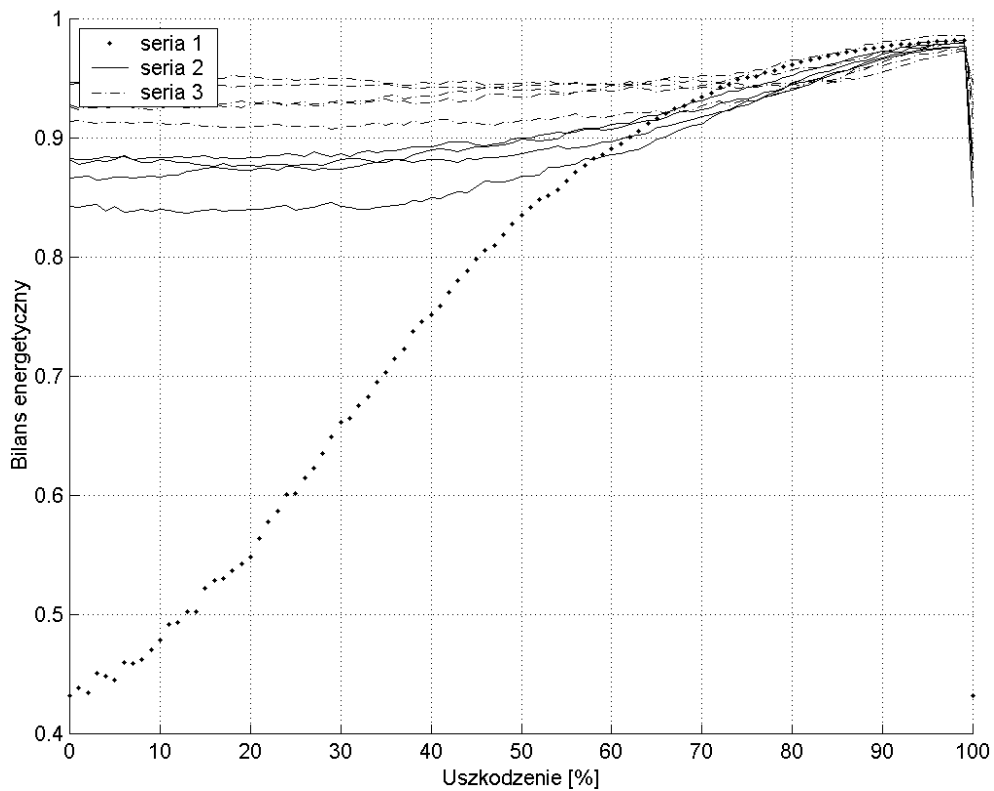
Tabela składa się z dziewięciu kolumn, w których kolejno przedstawiono numer porządkowy obróbki sygnału przyspieszeń drgań, wartości współczynników ϵ , γ , C , złożoność sieci (SV), ilość błędów w czasie procesu uczenia sieci i jej procentową wartość, ilość błędów w czasie procesu testowania sieci i jej procentową wartość.

Na podstawie wyników można zauważyć zależność pomiędzy złożonością sieci neuronowej, czyli ilością wektorów podtrzymujących (SV), a ilością popełnianych przez sieć błędów w czasie testowania. Jest to zależność odwrotnie proporcjonalna.

Najmniejszy procent błędów testowania uzyskano dla wybranych miar statystycznych otrzymanych z kowariancji sygnału różnicowego (czasowego) uzyskanego z widma przyspieszeń drgań w zakresie od 0 do 6 kHz (nr porz. 21) wynoszący 7,2072 % otrzymano dla sieci o 227 wektorach podtrzymujących. Równocześnie sieć ta uzyskała wartość błędów uczenia na poziomie 4,1367 %.



Rys. 7. Zależność kurtozy sygnału reszkowego od stopnia podcięcia zęba



Rys. 8. Wpływ stopnia podcięcia zęba na bilans energetyczny

Z badań wynika również iż wielkość błędu uczenia maleje, gdy błąd testowania zaczyna już rosnać. Wynika to z faktu, że sieć zaczyna się uczyć na pamięć (przeuczenia sieci). Stąd też wynika fakt uzyskania znacznie lepszych wyników dla procesu uczenia niż późniejszej weryfikacji w procesie testowania sieci.

Wyniki eksperymentu z użyciem sieci typu SVM w zadaniach regresyjnych okazały się

niewystarczające do tego typu zadania. Sztuczna sieć neuronowa uczona na podstawie wybranych miar uzyskiwała błąd testowania na poziomie 50%, który można przyjąć za wynik losowy.

Dalsze eksperymenty z użyciem sztucznych sieci neuronowych w tego typu zadaniach powinny objąć poszukiwanie innych danych wejściowych i/lub próbę zastosowania innego typu sieci neuronowej.

Tabela 1. Wyniki eksperymentu

Nr porz.	ϵ	γ	C	SV	Błąd uczenia		Błąd testowania	
					Ilość	%	Ilość	%
1	0,1	20	52000	313	64	11,5108	84	15,1351
2	0,1	10	66000	313	89	16,0072	105	18,9189
3	0,1	20	77000	308	24	4,3165	76	13,6937
4	0,1	3	90000	306	85	15,2878	109	19,6396
5	0,1	10	20000	391	13	2,3381	216	38,9189
6	0,1	70	30000	356	57	10,2518	98	17,6577
7	0,1	100	2000	436	89	16,0072	112	20,1802
8	0,1	20	30000	262	26	4,6763	52	9,3694
9	0,1	30	6000	302	34	6,1151	61	10,991
10	0,1	10	3000	364	63	11,3309	177	31,8919
11	0,1	40	30000	261	60	10,7914	71	12,7928
12	0,1	80	30000	225	40	7,3741	61	10,991
13	0,1	100	18000	233	35	6,295	70	12,6125
14	0,1	50	30	552	6	1,8791	409	73,6937
15	0,1	50	3	552	7	1,259	414	74,5946
16	0,1	0,01	3	546	197	35,4317	385	69,3694
17	0,1	30000	600	292	9	1,6187	47	8,4685
18	0,1	5000	300	282	18	3,2374	46	8,2883
19	0,1	100	15000	247	40	7,1942	74	13,3337
20	0,1	3000	300	360	30	5,3957	77	14,2342
21	0,1	1000	30000	227	23	4,1367	40	7,2072
22	0,1	100	30000	301	43	7,7338	101	18,1982

LITERATURA

- [1] Adameczyk J., Krzyworzeka P., Łopacz H.: Systemy synchronicznego przetwarzania sygnałów diagnostycznych. Collegium Columbinum, Kraków 1999.
- [2] Bartelmus W., Zimroz R., Batra H.: Gearbox vibration signal pre-processing and input values choice for neural network training. AI-METH 2003 – Artificial Intelligence Methods. 5÷7.11.2003 r.
- [3] Cempel C.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1989.
- [4] Chen D., Wang W. J.: Classification of wavelet map patterns using multi-layer neural networks for gear fault detection. Mechanical Systems and Signal Processing (2002) 16 (4).
- [5] Decker H. J.: Gear Crack Detection Using Tooth Analysis. NASA/ TM-2002-211491. 2002.
- [6] Dempsey P. J., Zakrajsek J. J.: Minimization load effects on NA4 gear vibration diagnostic parameter. NASA/TM-2001-210671, 2001.
- [7] Donovan M., Krishnappa G.: Some examples of signal analysis techniques to diagnose faults in machines. 6th International Congress on Sound and Vibration. Denmark 1999.
- [8] Giurgiutiu V., Cuc A., Goodman P.: Review of vibration-based helicopters health and usage monitoring methods. 55th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology. Virginia Beach 2001.
- [9] Han T., An J., Yang B.: Feature extraction of vibration signal for machinery condition monitoring. 3rd Asia Pacific Conference on System Integrity and Maintenance. 2002.
- [10] James C., Limmer J. D.: Model-based condition index for tracking gear wear and fatigue damage. Wear 241 (2000). USA 2000.
- [11] Korbowicz J., Kościelny J., Kowalczyk Z., Cholewa W.: Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji.

- Zastosowania, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
- [12] Kościelny J.: Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
- [13] Kwak J., Ha M., Chung J., Park H., Chang H.: Grinding Fault Diagnosis Based on Neural Network. 3rd Asia Pacific Conference on System Integrity and Maintenance. 2002.
- [14] Luszniwicz A., Słaby T.: Statystyka. Teoria i zastosowania, Wydawnictwo C.H.Beck, Warszawa 2003.
- [15] Łazarz B.: Zidentyfikowany model dynamiczny przekładni zębatej jako podstawa projektowania. Biblioteka Problemów Eksploatacji, Katowice-Radom 2001.
- [16] Łazarz B.: Modelowanie lokalnych uszkodzeń kół zębatych do celów diagnostycznych. Diagnostyka vol. 26, 2002.
- [17] Łazarz B., Wojnar G.: Modelowanie lokalnych uszkodzeń łożysk tocznych w przekładni zębatej do celów diagnostycznych. V Krajowa Konferencja Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów DIAG' 2003.
- [18] Madej H., Czech P., Konieczny Ł.: Wykorzystanie dyskryminant bezwymiarowych w diagnostyce przekładni zębatych, Diagnostyka nr 28, 2003.
- [19] Mangasarian O. L.: Lagrangian Support Vector Machines, Journal of Machine Learning Research, 2001.
- [20] Martin H. R.: Statistical Moment Analysis as a Means of Surface Damage Detection. Proceedings of the 7th International Modal Analysis Conference, Society of Experimental Mechanics, Schenectady, NY 1989.
- [21] McClintic, Lebold M., Maynard K., Byington C., Campbell R.: Residual and difference feature analysis with transitional gearbox data. 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology. Virginia Beach 2000.
- [22] McClintic, Lebold M., Maynard K., Byington C., Campbell R.: Review of vibration analysis methods for gearbox diagnostics and prognostics. 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology. Virginia Beach 2000.
- [23] Mosher M., Pryor A. H., Huff E. M.: Evaluation of standard gear metrics in helicopter flight operation. 56th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology. Virginia Beach 2002.
- [24] Nałęcz M., Duch W., Korbowicz J., Rutkowski L., Tadeusiewicz R.: Sieci neuronowe. Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna 2000, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2000.
- [25] Osowski S.: Sieci neuronowe do przetwarzania informacji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
- [26] Osowski S.: Sieci neuronowe SVM w zastosowaniu do problemów regresji, Przegląd Elektrotechniczny nr 86, 2002.
- [27] Osowski S.: Zastosowanie sieci SVM do klasyfikacji wzorców, Przegląd Elektrotechniczny nr 78, 2002.
- [28] Padovese L. R.: Using acoustical noise for fault classification in gearbox. 15th Brazilian Congress of Mechanical Engineering. Sao Paulo, 1999.
- [29] Radkowski S.: Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych, Biblioteka Problemów Eksploatacyjnych, Warszawa-Radom 2002.
- [30] Stewart R. M.: Some Useful Data Analysis Techniques for Gearbox Diagnostics. Report MHM/R/10/77, Machine Health Monitoring Group, Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton 1977.
- [31] Tadeusiewicz R.: Sieci neuronowe, Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1993.
- [32] Wang W.: Early detection of gear tooth cracking using the resonance demodulation technique. Mechanical Systems and Signal Processing (2001) 15 (5). 2001.
- [33] Wilk A., Łazarz B., Madej H.: Vibration Processing Techniques for Fault Detection in Gearboxes, Proceedings of DETC'2003 ASME 2003 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference Chicago, Illinois, USA, 2003.
- [34] Wilk A., Łazarz B., Madej H.: Diagnostyka wibroakustyczna przekładni zębatych. V Krajowa Konferencja Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów. Diag 2003. Ustroń 2003.
- [35] Yang H., Mathew J., Ma L.: Intelligent diagnosis of rotating machinery faults - a review. 3rd Asia Pacific Conference on System Integrity and Maintenance. 2002.
- [36] Zakrajsek J. J., Townsend D. P., Lewicki D., G. Decker H. J., Handschuh R. F.: Transmission diagnostic research at NASA Lewis Research Center. Report Documentation Page NASA TM-106901, 1995.



Dr hab. inż. Bogusław ŁAZARZ jest adiunktem w Katedrze Budowy Pojazdów Samochodowych Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej. Specjalizuje się w zakresie diagnostyki wibroakustycznej przekładni zębatych, modelowania i wspomaganego komputerowo projektowania układów przeniesienia napędu z przekładnią zębatą oraz metod przetwarzania sygnałów. Członek Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej i Sekcji Podstaw Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn



Mgr inż. Piotr CZECH jest doktorantem w Katedrze Budowy Pojazdów Samochodowych Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej. Zajmuje się wykorzystaniem sieci neuronowych w diagnostyce przekładni zębatych.

Publikacja powstała w wyniku realizacji pracy 5T07B 02425

BADANIE WPLYWU STANU NAPRĘŻEŃ NA PROCES PROPAGACJI FALI NAPRĘŻENIOWEJ W STRUKTURACH SPRĘŻONYCH

Stanisław RADKOWSKI, Krzysztof SZCZUROWSKI

Instytut Podstaw Budowy Maszyn PW
Ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, ras@simr.pw.edu.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono badanie zjawiska rozchodzenia się fali akustycznej w materiałach sprężonych, a szczególnie wpływ stanu naprężenia w przekroju poprzecznym elementu obciążonego. W dalszej części pracy przedstawiono próbę budowy płaszczyzny klasyfikacji która umożliwiłaby jednoznaczne zakwalifikowanie poszczególnych pomiarów do odpowiednich grup opisujących stan naprężeń. W kolejnym kroku przedstawiono budowę modeli MES opisujących rozchodzenie się fali naprężeniowej w materiałach o różnym stanie naprężeń w przekroju poprzecznym.

Słowa kluczowe: Diagnostyka wibroakustyczna, diagnostyka materiałów sprężonych.

STRESS DISTRIBUTION IMPACT ON THE WAVE PROPAGATION IN PRESTRESSED STRUCTURES.

Summary

The paper presents the results of wave propagation investigation in prestressed structure and particularly an impact of stress distribution in cross-section on wave propagation process. The second part of the paper presents the attempt design classification plane and results of classification process of the different stress distribution groups. In the final part are presented two FEM models of the wave propagation process in solids with the different cross-section stress distribution.

Keywords: vibroacoustic diagnostic, diagnostic prestressed structure.

1. WPROWADZENIE

Przyjmując założenie, że wczesnym fazom makrouszkodzeń struktury sprężonej będzie towarzyszyć zmiana rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym, celem studium jest opracowanie bezinwazyjnej metody wykrywania zmian rozkładu na podstawie informacji zawartej w sygnale wibroakustycznym, generowanym podczas badań testowych.

Odnosząc się do obecnego stanu wiedzy warto zaznaczyć, że w badaniach struktur sprężonych główna uwaga jest i była skupiona na wykrywaniu występowania, wad i uszkodzeń materiałów. Podobnie podejmowane są próby wykorzystania odpowiedzi dynamicznej struktury, których głównym problemem jest wykrywanie, lokalizacja i określania stopnia rozwoju uszkodzeń. Definiując strukturalne uszkodzenie jako swego rodzaju dewiacje geometrycznych, materiałowych właściwości, można oczekiwać zmian w dynamicznej odpowiedzi układu na ustalone obciążenie.

W ciągu ostatnich lat wiele zadań badawczych było bezpośrednio lub pośrednio związanych z problematyką detekcji uszkodzeń na podstawie

analizy dynamicznej odpowiedzi struktury. Między innymi można wskazać na zastosowanie technik identyfikacji [1, 2], metod analizy transmitancji systemu, FRF (Frequency Response Function) [3], intensywnie rozwijanej techniki estymacji losowego dekrementu tłumienia [4] oraz technik diagnostycznych wykorzystujących informację o zmianach parametrów modalnych [5]. Istotą tych wszystkich metod jest wykorzystanie względnej zmiany częstotliwości drgań własnych struktury w związku z powstawaniem pęknięć, korbów lub innych uszkodzeń mających wpływ na dynamiczne właściwości struktury [6, 7].

Pomimo wielu przeprowadzonych badań między innymi analizy wielkości charakteryzujących zmiany kształtu funkcji własnej struktury [8] i uzyskania wielu interesujących rezultatów (vibration – based damage detection), do tej pory nie udało się uzyskać w pełni satysfakcjonujących rezultatów szczególnie w sytuacji, gdy nie dysponujemy wzorcowym sygnałem wibroakustycznym dla układu nieuszkodzonego. Trudności narastają wraz z niepewnością odnośnie modelowania, pomiaru i analizy otrzymanego sygnału i wraz z podejmowaniem prób identyfikacji wczesnych

fazach rozwoju uszkodzeń. W proponowanym, w ramach projektu sposobie diagnozowania, w odróżnieniu od dotychczasowych ujęć przewiduje się analizowanie związków pomiędzy rozkładem naprężeń w przekroju poprzecznym, a zmianami parametrów sygnału wibroakustycznego.

2. ZAŁOŻENIA MODELU

Podstawą tego sposobu diagnozowania jest wykorzystanie zjawiska zależności parametrów propagacji fali dźwiękowej od stanu naprężeń panujących w badanym obiekcie. Objawia się to zmodulowaniem parametrów sygnału wibroakustycznego, wynikającym ze zmienności prędkości propagacji fali dźwiękowej w materiale będącej funkcją rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym konstrukcji sprężonej. Wychodząc z założenia, że występujące uszkodzenia mogą prowadzić do spadku naprężeń ściskających można oczekiwać na tyle mierzalnej zmiany rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym, że możliwym będzie wykrycie zmodulowania odpowiednich parametrów sygnału wibroakustycznego.

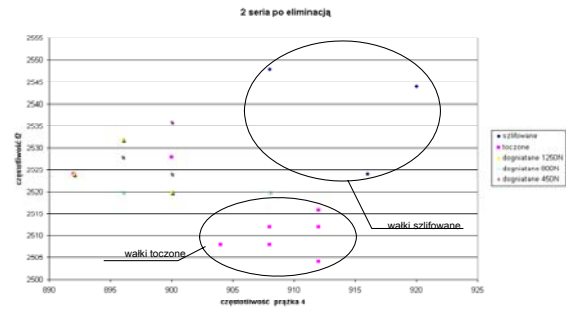
Z dotychczas prowadzonych w Pracowni Wibroakustyki PW szczególnie, badań nad zmianami naprężeń w warstwie wierzchniej wynika, że zmiany struktury naprężeń można wykrywać i identyfikować metodami demodulacji sygnału wibroakustycznego.

Wystąpieniu w warstwie wierzchniej naprężeń rozciągających towarzyszy jakościowa zmiana rozkładu amplitud w paśmie zmodulowanym wokół odpowiedniej częstotliwości nośnej. Wykorzystując otrzymane rezultaty, w proponowanym projekcie istotnym zadaniem będzie określenie sposobu i kryteriów doboru zmodulowanych pasm diagnostycznie istotnych częstotliwości nośnych [9, 10].

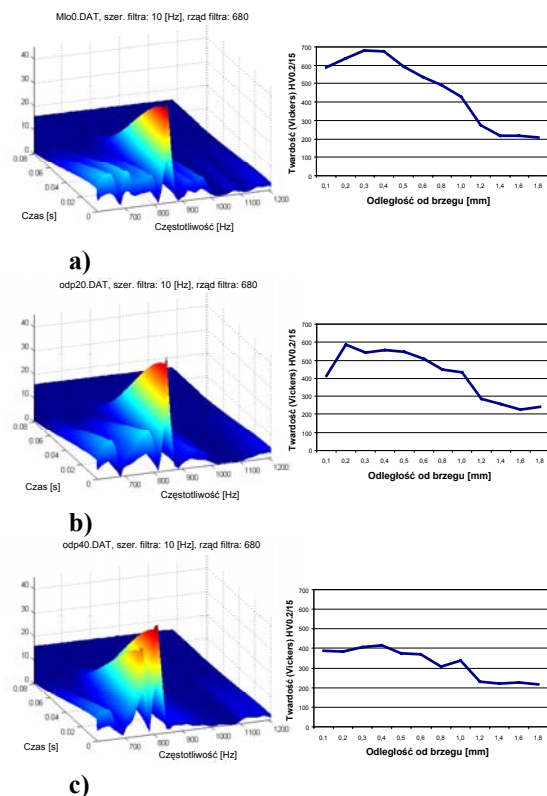
Wyniki przeprowadzonego eksperymentu pokazują, iż wybranie przestrzeni klasyfikacyjnej dla próbek o różnym stanie warstwy wierzchniej nie jest łatwe (rys. 1).

Badany sygnał wibroakustyczny zawiera bowiem nie tylko informacje o stanie warstwy wierzchniej, ale także dodatkowe zaburzenia związane z niejednorodnością materiału próbek czy zróżnicowaniem pozornie tych samych procesów obróbkowych.

Porównując wykresy przedstawione na rys. 2 możemy zauważyć różne wartości zmodulowania częstotliwości nośnej, wyrażające się deformacją listków bocznych. Efekt ten był zauważalny dla każdej próbki badanych elementów. Stanowi to potwierdzenie tezy, że zmiana struktury warstwy wierzchniej, wyrażona w tym przypadku przez różną twardość warstwy prowadzi do mierzalnych zmian parametrów sygnału wibroakustycznego.



Rys. 1. Płaszczyzna klasyfikacji serii pomiarów wałów w zależności od sposobu obróbki technologicznej [9]



Rys. 2. Wyniki analizy dla wałka hartowanego na głębokość 0,5mm a następnie odpuszczanego w różnej temperaturze [10]:

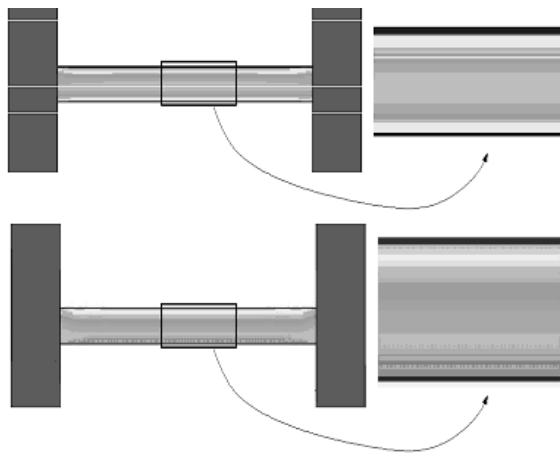
- zmodulowane pasmo częstotliwości dla wałka hartowanego na gł. 0,5 mm oraz rozkład mikrotwardości w warstwie wierzchniej;
- zmodulowane pasmo częstotliwości dla wałka hartowanego na gł. 0,5 mm a następnie odpuszczanego w temp. 200°C oraz rozkład mikrotwardości w warstwie wierzchniej;
- zmodulowane pasmo częstotliwości dla wałka hartowanego na gł. 0,5 mm a następnie odpuszczanego w temp. 400°C oraz rozkład mikrotwardości w warstwie wierzchniej.

Proponowana metoda jest dalszym rozszerzeniem metody diagnozowania zastosowanej do badań struktury naprężeń panujących w warstwie wierzchniej elementu. Tym razem głównym zadaniem jest wykrycie zmian

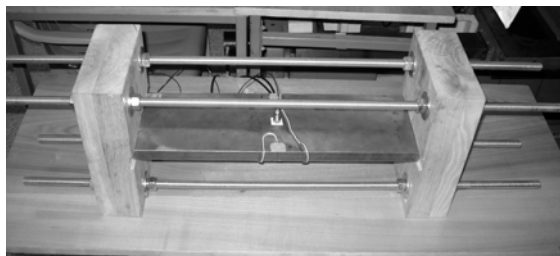
w rozkładzie naprężeń w całym przekroju poprzecznym. Szczególnie interesującym jest wykrycie jakościowej zmiany w warstwach zewnętrznych przekroju z naprężeń ściskających na naprężenia rozciągające.

3. SYMULACJE

W ramach prac przygotowawczych na wstępie za pomocą metody elementów skończonych w programie ANSYS zbudowano model (rys. 3), i na jego podstawie dobrano wymiary elementów jak również zbadano zakres występujących sił. Korzystając z wyników uzyskanych z modelu zbudowano stanowisko przedstawione na rys. 4. Stanowisko to, zgodnie z założeniami umożliwia wywołanie różnej struktury naprężeń w przekroju poprzecznym badanej płyty. Naprężenia mogą być zadawane przez kombinację obciążeń ściskających, zginających i skręcających płyty (rys. 4). Odczytywanie naprężenia odbywa się z czterech mostków tensometrycznych naklejonych w połowie długości belki, na górnej i dolnej powierzchni środka.



Rys. 3. Modelowanie stanu naprężeń środka za pomocą MES

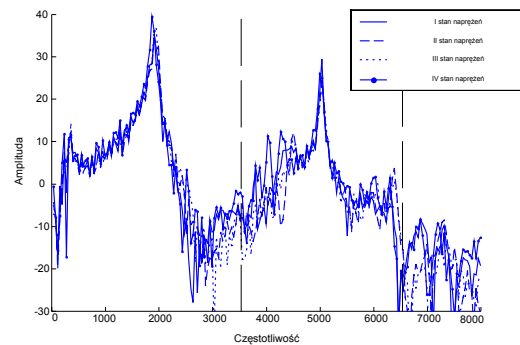


Rys. 4. Stanowisko do badań wpływu naprężeń na strukturę odpowiedzi drganiowej

Tak skonstruowane stanowisko umożliwia prowadzenie obserwacji zmian struktury częstotliwościowej sygnału wibroakustycznego wywołanych zmieniającymi się naprężeniami w przekroju poprzecznym. Zadając różne wartości momentów gnących wymuszono w płycie zmianę stanu naprężeń.

Dla każdego stanu pobudzano impulsowo płytę, i zarejestrowano odpowiedź drganiową. Wymuszenie impulsowe wywoływano za pomocą młotka z czujnikiem siły typu 8202 firmy B&K. Zarejestrowaną za pomocą odpowiedź analizowano w środowisku Matlab.

Otrzymane dla różnych struktur naprężeń widma przyspieszeń (rys. 5) porównano ze sobą. Za najlepiej charakteryzujący poszczególne struktury naprężeń uznano pasmo wokół częstotliwości 5 kHz.

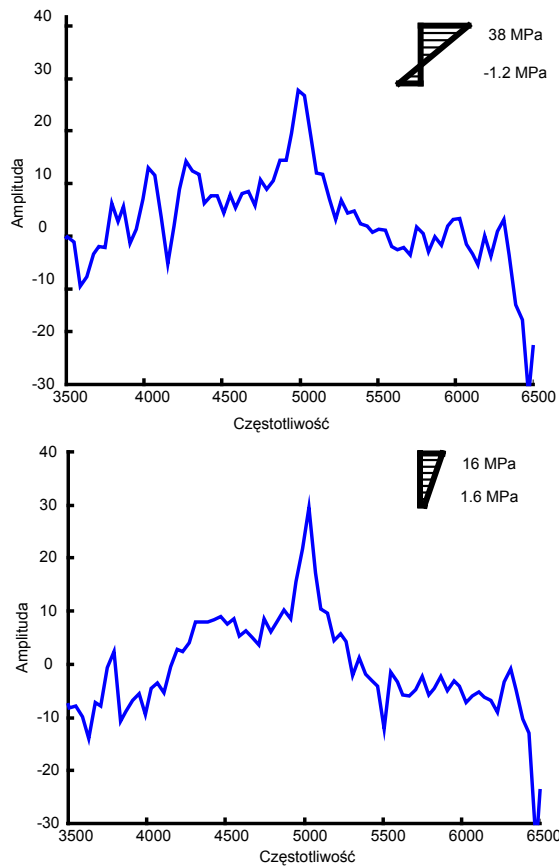


Rys. 5. Porównanie odpowiedzi drganiowej płyty dla różnych stanów naprężeń

W wybranym paśmie odpowiedzi wyraźnie różniły się, i były rozpoznawalne w zależności od rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym. Przykładowe widma z zaznaczonym pasmem wokół częstotliwości 5 kHz przedstawiony jest na rys. 6.

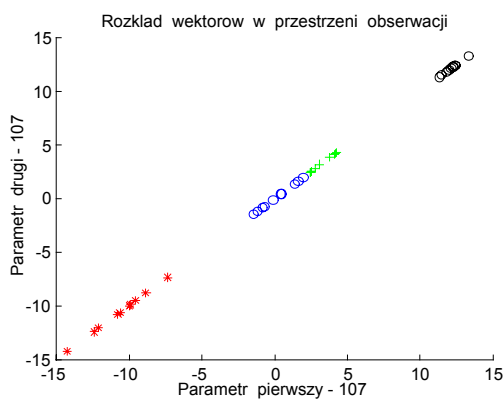
Klasyfikację różnych klas rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym dokonano za pomocą sieci neuronowych wykorzystując oryginalną metodę selekcji informacji bazującą na dwóch kryteriach: kryterium będącego pewną kombinacją miar rozproszeń wektorów cech w przestrzeni obserwacji sformułowanych przez Sebestyena oraz kryterium liczby istotnych (z punktu widzenia zadania) wektorów cech [11].

Metoda ta preferuje takie przestrzenie obserwacji, w których występują duże względne odległości między obszarami poszczególnych klas przy jednoczesnym dużym względnym skupieniu wewnętrznym każdego z tych obszarów i w których „powierzchnie styku” obszarów poszczególnych klas są mało skomplikowane. Do opisu brzegów obszaru potrzebna jest mała liczba wektorów reprezentujących cechy. Jako przykład przedstawiono dwuwymiarowe przestrzenie obserwacji. Badanie wykazało istnienie szeregu dwuwymiarowych przestrzeni obserwacji użytecznych do przeprowadzenia klasyfikacji zadanych rozkładów naprężeń, co potwierdza możliwość skutecznej klasyfikacji za pomocą dwuwymiarowych obrazów (wektor cech tworzących pojedynczy obraz zawiera 2 pozycje).

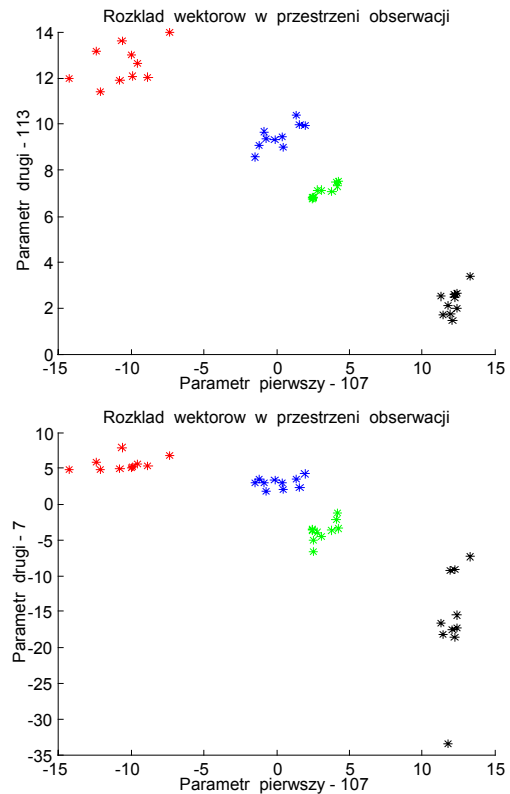


Rys.6. Porównanie widm odpowiedzi drganiowej dla dwóch przykładowych stanów naprężeń

W wyniku opisanej wyżej procedury otrzymano grupę kilku parametrów najlepiej opisujących stan elementu a w jednym przypadku praktycznie bezbłędnie. Wyniki przedstawiają rysunki 7 i 8.



Rys. 7. Płaszczyzna klasyfikacji dla parametru nr 107

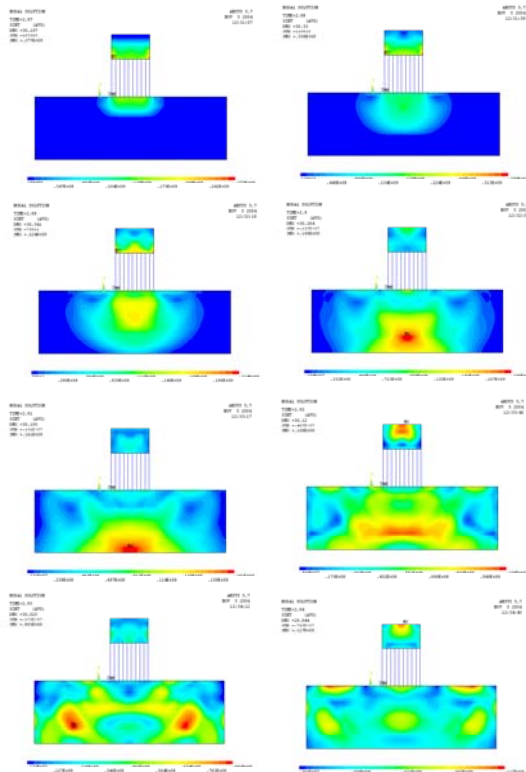


Rys. 8. Płaszczyzny klasyfikacji z wykorzystaniem dwóch parametrów

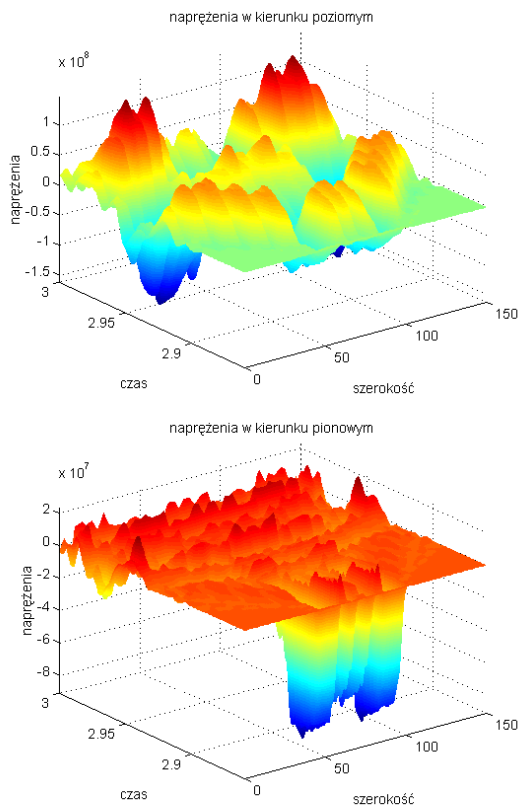
Przeprowadzone badania potwierdzają możliwość stosowania proponowanej metody we wnioskowaniu o stanie naprężeń w przekroju elementu na podstawie analizy parametrów sygnału wibroakustycznego.

Należy podkreślić, że badania przeprowadzone zostały dla materiału jednorodnego jakim jest stal. Istotnym zadaniem badawczym jest rozszerzenie aplikacji na badanie stanu technicznego konstrukcji wykonanych z materiałów o bardziej złożonych właściwościach.

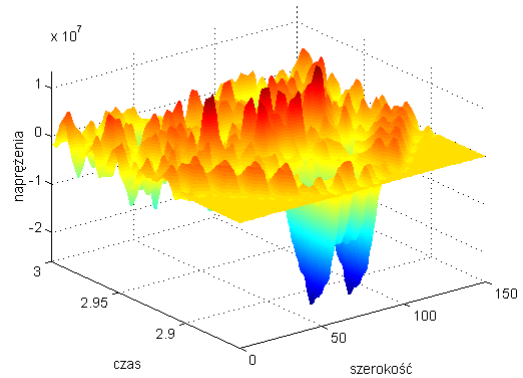
Jednym z elementów tego etapu jest budowa z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) modeli rozchodzenia się fali naprężeniowej w materiale. Chodzi tu zarówno o płaskie modele (rys. 9) i obserwowane zmiany w sposobie propagacji fali naprężeniowej w zależności od przyłożonych obciążeń, jak również zmiany wielkości naprężeń na powierzchni, co przedstawia rys. 10.



Rys. 9. Kroki przedstawiające rozchodzenie się fali naprężeniowej w model płaskim



Rys. 10. Naprężenia na powierzchni płyty w modelu płaskim kierunkach poziomym i pionowym



Rys. 11. Przebieg naprężeń na powierzchni według płaskiego modelu

4. WNIOSKI

Proponowana metoda oceny zmian rozkładu naprężeń umożliwia: po pierwsze zlokalizowanie uszkodzenia i estymacja jego rozległości, stanowi podstawę do przeprowadzenia bardziej szczegółowej oceny znaczenia uszkodzenia. Po drugie dokonanie oceny uszkodzenia we właściwym czasie, pozwala zmniejszyć ciężkość strat a szczególnie uniknąć ofiar śmiertelnych, zmniejszyć cierpienia ludzi, którzy mogą być dotknięci hipotetyczną katastrofą, zminimalizować straty materialne, zwiększyć niezawodność systemu, zwiększyć efektywność wykonywania zadań funkcjonalnych oraz zredukować koszty obsługi i napraw. Kolejnymi cechami są: zastosowanie separacji częstotliwościowej, co umożliwia uzyskanie efektywnej odporności metody na nieciągłości badanej struktury, oraz wykonywanie badań również w czasie normalnej eksploatacji, co czyni metodę podatną na zastosowanie on-line, i stwarza możliwość opracowania inteligentnych systemów nadzoru.

Pilna potrzeba podjęcia proponowanych w ramach projektu zagadnień, wynika z konieczności zwiększenia efektywności eksploatacji coraz bardziej skomplikowanych konstrukcji sprężonych poprzez poszukiwanie sposobów zapewnienia ich bezpieczniejszej eksploatacji i zwiększenia ich niezawodności i trwałości.

LITERATURA

- [1]. Masri S. F., Miller R. K., Saud A. F., Caughey T. K.: (1987) Identification of nonlinear vibrating structures: Part I – formulation. *Journal of Applied Mechanics*, 54, 923-929.
- [2]. Natke H. G., Yao J. T. P.: (1990) System identification methods for fault detection and diagnosis. *International Conference on*

- Structural Safety and Reliability, American Society of Civil Engineers, New York, 1387-1393.
- [3]. Flesch R. G., Kernichler K.: (1988) Bridge inspection by dynamic tests and calculations dynamic investigations of Lavent bridge. Workshop on Structural Safety Evaluation Based on System Identification Approaches (H. G. Natke and J. T. P. Yao, editors), 433-459, Lambrecht/ Pfalz, Germany, Vieweg & Sons.
- [4]. Yang J. C. S., Chen J., Dagalakis N. G.: (1984) Damage detection in offshore structures by the random decrement technique. Journal of Energy Resources Technology. American Society of Mechanical Engineers, 106, 38-42.
- [5]. Kurowski P.: (2001) Identyfikacja modeli modalnych konstrukcji mechanicznych na podstawie pomiarów eksploatacyjnych. Praca Doktorska. Akademia Górniczo-Hutnicza. Kraków.
- [6]. Gudmunson P.: (1983) The dynamic behavior of slender structures with cross-sectional cracks. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 31, 329-345.
- [7]. Cristides S., Barrs A. D. S.: (1984) One-dimensional theory of cracked Bernoulli-Euler beams. International Journal of Mechanical Science, 26, 639-648.
- [8]. Chen J., Garba J. A.: (1988) On-orbit damage assessment for large space structures. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 26, 1119-1126.
- [9]. Radkowski S., Szczurowski K., Zduniak A.: „Zależność struktury częstotliwościowej SWA od rodzaju obróbki technologicznej elementu.” VIII Polsko-Francuskie Seminarium Naukowe Mechaniki, Warszawa Grudzień 2001,
- [10]. Radkowski S.: „Wibroakustyczna Diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych.” Instytut Technologii Eksploatacji Warszawa-Radom 2002,
- [11]. Dybała J.: „Wykrywanie uszkodzeń w przekładni zębatej na podstawie analizy sygnału wibroakustycznego z wykorzystaniem modeli symulacyjnych”. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa, 1999



Prof. **Stanisław Radkowski**
 profesor Instytutu Podstaw Budowy Maszyn PW kierownik zespołu Diagnostyki Technicznej i Analizy Ryzyka. Prezes Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej.



Mgr inż. **Krzysztof Szczurowski**
 doktorant wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej.

PROGNOZOWANIE I OCENA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ KONSTRUKCJI KADŁUBA OKRĘTOWEGO

Krzysztof ROSOCHOWICZ

Politechnika Gdańska, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa, ul. Narutowicza 11/12,
80-952 Gdańsk, sek2oce@pg.gda.pl

Streszczenie

Omówiono aktualny stan wiedzy w zakresie przyczyn uszkodzeń kadłubów statków w eksploatacji. Wskazano na złożoność konstrukcji kadłuba. Podano zasady stopniowej dekompozycji analitycznej i badawczej konstrukcji do rozważań na różnych poziomach szczegółowości. Uwypuklono zasady tworzenia baz danych dotyczących pęknięcia konstrukcji kadłubów statków. Przedstawiono generalne zasady realizacji eksperymentów laboratoryjnych wielkogabarytowych modeli konstrukcji kadłubów. Scharakteryzowano założenia upraszczające metodykę i algorytm postępowania przy obliczeniowym prognozowaniu trwałości zmęczeniowej węzłów konstrukcji kadłuba statku.

Słowa kluczowe: kadłuby statków, zmęczenie, metody badań, metody obliczeń, prognozowanie trwałości.

LIVE PREDICTION AND ESTIMATION OF FATIGUE DURABILITY OF SHIP HULL STRUCTURE

Summary

The paper presents current state of know how in the area of ships hull damages in operation. Complex character of hull structures is taken into account. Principles of decomposition of ship hull structure for analytical and test purposes for fatigue analysis, creation of data base of typical structural crack and fatigue experimental investigations are briefly characterized. Assumptions, and simplifications related of analytical fatigue life prediction methodology for ship hull structures are presented.

Keywords: ship hull, fatigue, experimental research and calculation methods, life prediction.

1. WPROWADZENIE

Do początków lat 70-tych XX wieku mimo znaczącego rozwoju techniki okrętowej problemy eksploatacyjnych uszkodzeń kadłubów statków skutkiem zmęczenia były w zasadzie marginalizowane. Prowadzono nawet badania laboratoryjne [1] celem udowodnienia, że w trakcie zawyżonej w stosunku do praktyki 30-to letniej eksploatacji statku nie może zaistnieć sytuacja, w której w zasięgu krzywej kumulacyjnej obciążeń eksploatacyjnych znajdują się wöhlerowskie charakterystyki zmęczeniowe stali kadłubowych z uwzględnieniem wpływu bogatego asortymentu karbów mechanicznych, czy zjawisk korozyjnych. Bagatelizowano przy tym zupełnie wpływ czynników technologicznych oraz efekt skali konstrukcji i przebiegu zjawisk, traktując je, zresztą słusznie, w zasadzie jako zjawiska o charakterze ściśle lokalnym. Sytuacja taka była źródłem wieloletnich zażartych sporów środowisk okrętowych, znajdujących odbicie w problematyce kolejnych kongresów International Ship Structures Congress odbywających się regularnie w odstępach

4-letnich. Brak akceptacji zjawisk zmęczeniowych w konstrukcjach kadłubów statków wynikał z [1]:

- nieznajomości wielu komponentów złożonego obciążenia kadłuba statku w eksploatacji,
- zdominowania procesów pęknięcia kadłubów stalowych przez często katastroficzne zjawiska pęknięcia kruchej wywołanego głównie słabym opanowaniem technik spawalniczych i towarzyszących im skutków (naprężenia własne, struktura, wady wykonawcze) oraz brakiem wiedzy w zakresie kształtowania składu i struktury stali w stanie wyjściowym,
- wystąpieniem problemu destrukcji statecznościowych w kadłubach statków,
- nieznajomości charakteru i mechanizmów narastania uszkodzeń zmęczeniowych w kadłubach statków, które mimo ściśle lokalnego charakteru rozwijały się wielopunktowo w określonych węzłach konstrukcji lub szczególnie niekorzystnie ukształtowanych i wykonanych rejonach tych węzłów,

- specyfiki rozwiązań konstrukcyjnych kadłubów statków, które składały się z niezliczonej ilości połączeń i węzłów elementarnych niedostępnych ówczesnym technikom obliczeniowym.

Rozwój kadłubów statków zmierzał w kierunku kreowania nowych typów struktur funkcjonalnych (np.: drobnicowce, kontenerowce, statki typu ro-ro dla ładunków wtocznych oraz transportu pojazdów czy też bogatej rodziny statków do przewozu stałych i płynnych ładunków masowych oraz różnych ich kombinacji uniwersalnych). Zwiększała się znacząco ilość statków, ich szybkość eksploatacyjna oraz moc napędów głównych. Jednocześnie coraz lepsze opanowywanie metodyki wymiarowania konstrukcji kadłuba statku niestety wyłącznie w oparciu o znajomość obciążeń statycznych, w tym od stanu załadowania na wodzie spokojnej oraz wprowadzanie kolejnych generacji stali kadłubowej zaowocowało znaczącym zmniejszeniem lokalnych i globalnych wskaźników przekroju. Kiedy z początkiem lat siedemdziesiątych praktycznie wyeliminowano pęknięcia kruche i zniszczenia odkształceniowe, pęknięcia zmęczeniowe stały się głównym czynnikiem determinującym uszkodzenia eksploatacyjne kadłubów statków [1].

Ze względu na złożoność i charakter konstrukcji kadłuba i warunki środowiskowe w okrętownictwie nie stosuje się w zasadzie technicznych metod diagnozowania stanu konstrukcji w trakcie eksploatacji. Jednakże w Przepisach Towarzystw Klasyfikacyjnych obok ustaleń konstrukcyjnych, materiałowych, spawalniczych i dotyczących wymagań stawianych urządzeniom i systemom okrętowym oraz remontom znajdują się regulacje dotyczące przeglądów konstrukcji kadłuba odbywających się w regularnych, obecnie 5-letnich odstępach czasu. Wyniki tych przeglądów są m.in. od lat katalogowane w kategoriach typów, grup i wielkości statków, tworząc odpowiednią bazę udokumentowanych, także fotograficznie danych o pęknięciach i innych uszkodzeniach kadłubów, dostępną aktualnie we współczesnych okrętowych konstrukcyjnych programach komputerowych [np.13]. Od początku lat 90-tych w programach tych znajdują się także uproszczone, lecz ciągle rozbudowywane procedury prognozowania trwałości zmęczeniowej węzłów konstrukcji kadłuba statku [8]. Program taki posiada również Polski Rejestr Statków [11]. Dla kadłubów statków szczególnie narażonych na pękanie (np. roporudomasowców „OBO”) prasa okrętowa postuluje prowadzenie systematycznej wizualnej kontroli obszarów szczególnie narażonych na pękanie [9]. Szereg instytucji okrętowych, w tym także zrzeszenie 10-ciu największych instytucji klasyfikacyjnych: International Association of Classification Societies (IACS), próbuje unifikować i ujednoczyć przepisy instytucji narodowych oraz publikuje m.in. specjalne katalogi uszkodzeń

zmęczeniowych wraz z zalecanymi procedurami napraw tych uszkodzeń [6, 7]. Główne procedury zmęczeniowe Towarzystw Klasyfikacyjnych oparte są na tzw. projektowych krzywych Wöhlera i uproszczonych formułach określających naprężenia i szeroko rozumiane współczynniki koncentracji naprężenia w określonych metodami elementów skończonych obszarach o szczególnie wysokim zagrożeniu pękaniem (HOT SPOT). Trwałość w wybranych obliczeniowo tzw. punktach referencyjnych określana jest z uproszczonych reguł w latach, a zmodyfikowane prawo Palmgren-Minera służy do wskaźnikowego określania niebezpieczeństwa wystąpienia uszkodzenia zmęczeniowego. Pozostałe podobnego typu punkty konstrukcji objęte są uproszczoną procedurą, wykorzystując odpowiednie przeliczniki. Ważną rolę w kształtowaniu zmęczeniowej trwałości węzłów konstrukcyjnych kadłuba statku odgrywają optymalizacyjne badania laboratoryjne [1]. Są one prowadzone na zróżnicowanych jakościowo modelach badawczych, od tzw. małych prostych próbek, przez próbki złożone, fragmenty rozwiązań konstrukcyjnych, wielkogabarytowe modele konstrukcji kadłubowych aż do niezmiernie kosztownych modeli badawczych wykonywanych w skali naturalnej. Badania takie dostarczają informacji o trwałości zmęczeniowej poszczególnych rozwiązań, wytrzymałości zmęczeniowej, szybkości propagacji pęknięć, ich lokalizacji i złożonego sposobu rozwoju zniszczeń, pozwalają na optymalizację rozwiązań konstrukcyjnych. Generalnie można więc stwierdzić, że celem procedur zmęczeniowych rozwijanych w okrętownictwie w 3-ch kierunkach:

- inwentaryzacji uszkodzeń w katalogach,
- badań laboratoryjnych trwałości zmęczeniowej,
- uproszczonych procedur obliczeniowych,

jest podejmowanie próby zabezpieczenia „a priori” w procesie projektowania, możliwie wysokich właściwości zmęczeniowych konstrukcji [2, 3, 4, 5, 11]. Diagnozowanie bieżące jest natomiast prowadzone wzrokowo i ma na celu głównie sprawowanie kontroli nad rozwojem pęknięć w rejonach, gdzie jest to dopuszczalne oraz dobór odpowiednich metod ograniczających rozwój zniszczeń bądź ich naprawę.

2. TENDENCJE ROZWOJU ZNISZCZEŃ W KONSTRUKCJACH WSPÓŁCZESNYCH STATKÓW MORSKICH

Aktualnie uszkodzenia konstrukcji kadłubów statków skutkiem działania normalnych warunków eksploatacyjnych można opisać w następujących kategoriach:

- uszkodzenia odkształceniowe,
- uszkodzenia korozyjne,

- uszkodzenia przez pęknięcia, obecnie głównie zmęczeniowe,
- uszkodzenia skutkiem okresowego nakładania się wymienionych wyżej mechanizmów oraz pęknięcia kruche.

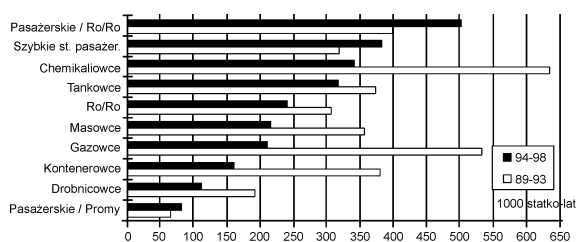
Wg [10] uszkodzenia odkształceniowe (głównie lokalna utrata stateczności) wynoszą mniej niż 10% ogólnej liczby uszkodzeń konstrukcji kadłubów statków stalowych. Natomiast uszkodzenia korozyjne utrzymują się w granicach 45%, a uszkodzenia przez pęknięcie 40% ogólnej liczby notowanych uszkodzeń.

Kategorie występujących uszkodzeń oraz czasokres od wejścia statku do eksploatacji do ich wykrycia zależą od wielkości, rodzaju i przeznaczenia statku oraz rejonu jego żeglugi [1]. W konstrukcjach kadłubów statków do przewozów ładunków masowych (zbiornikowce, masowce, ropo-rudo-masowce oraz statków ro-ro i pasażerskich) znaczące ilości pęknięć notuje się już po 5-ciu latach eksploatacji a po ok. 8-miu latach dołączają tu wtórne uszkodzenia korozyjne. Największe ilości nowych pęknięć notuje się w tych typach statków pomiędzy 8-mym a 12-tym rokiem eksploatacji. Generalnie można stwierdzić, że dla tej grupy statków wypukła się aktualnie tendencja wzrostu uszkodzeń przez pęknięcie do 50% ogólnej liczby notowanych uszkodzeń.

W konstrukcjach tradycyjnych statków drobnicowych pierwszą falę pęknięć obserwuje się po ok. 3 latach eksploatacji, przy czym przez ok. 20 lat utrzymuje się ona średnio na podobnym poziomie. Po ok. 14 latach eksploatacji wzrasta natomiast lawinowo zakres uszkodzeń korozyjnych. Na rys. 1 i 2 przykładowo pokazano za [10] ogólną ilość uszkodzeń konstrukcji kadłubów różnych typów statków oraz uszkodzeń wywołanych pęknięciem dla statków klasyfikowanych przez DNV w latach 1989-98.

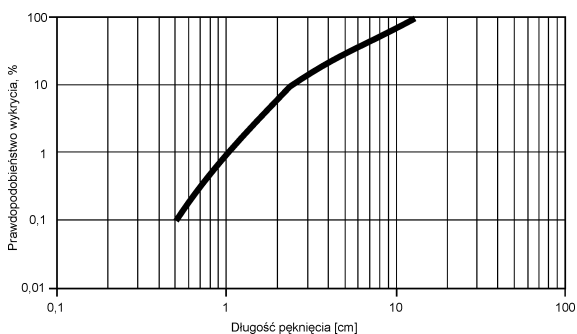
Z wykresów wynika, że prace podjęte nad stworzeniem i implantacją procedur zmęczeniowych przyniosły wyraźny efekt w stosunku do chemikaliowców, tankowców, masowców, statków do przewozu skroplonych gazów. Natomiast w przypadku statków pasażerskich, promów oraz ro-ro procedury okazały się niewystarczająco skuteczne dla zabezpieczenia przed generowaniem zwiększonej ilości uszkodzeń poprzez pęknięcia.

Rys. 1. Ogólna ilość uszkodzeń różnych typów konstrukcji kadłubów statków klasyfikowanych przez DNV w latach 1989-93 oraz 1994-98 wg [10]

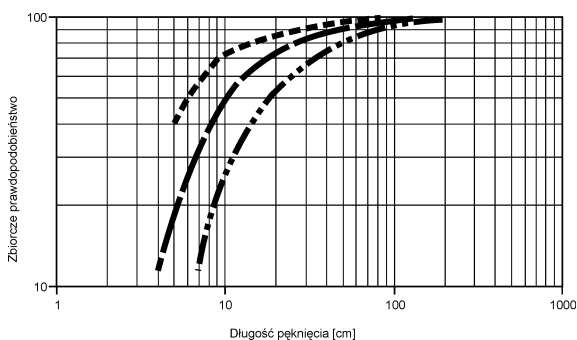


Rys. 2. Ogólna ilość uszkodzeń przez pęknięcia dla statków klasyfikowanych przez DNV w latach 1989-93 oraz 1994-98 wg [10]

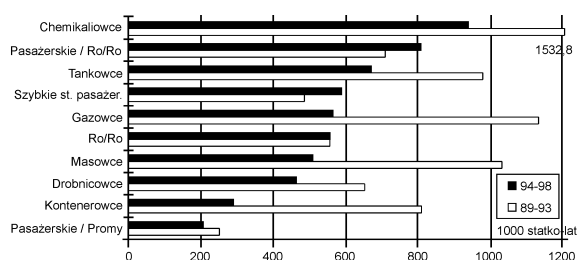
Problem uszkodzeń przez pęknięcie jest szczególnie trudny z uwagi na ograniczoną wykrywalność pęknięć w całej złożoności konstrukcji kadłuba (rys. 3, 4 i 5).



Rys. 3. Średnie prawdopodobieństwo wizualnego wykrycia pęknięcia w konstrukcji kadłuba statku [10]

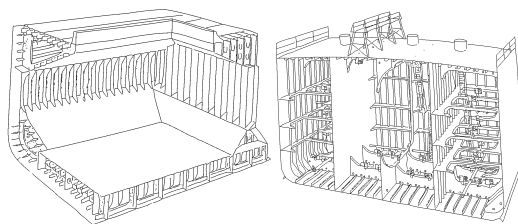


Rys. 4. Dystrybucja pęknięć wg długości wg raportów inspektorów DNV [10]



a)

b)



Rys. 5. Uproszczony przykład konstrukcji kadłuba dla a) masowca uniwersalnego (OBO) oraz b) zbiornikowca [10]

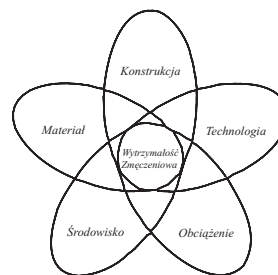
Uszkodzenia przez pęknięcia stwarzają rosnące zagrożenie ekologiczne i dla bezpieczeństwa statku, łączą się bowiem z powiększonym ryzykiem polucji ładunku a także utraty funkcji eksploatacyjnych przez statek a nawet katastroficznego jego zniszczenia (np. mt. ERICA zniszczona przez rozłamanie kadłuba).

Pęknięcia zmęczeniowe w zładach wiązań kadłubów statków w zdecydowanej większości przypadków należą do pęknięć relatywnie krótkich. Prawdopodobieństwo ich wykrywalności w górnym obszarze 10÷20 cm długości wynosi średnio 50÷80%. Znacząca ilość pęknięć mieści się jednak w zakresie kilkucentymetrowych długości a ich wykrywalność jest niewielka. Pęknięcia poszycia osiągają często także ponad metrowe długości, rzadko są jednak bezpośrednią przyczyną katastroficznego zniszczenia konstrukcji. Jeżeli dochodzi do większych awarii, to długie pęknięcia są najczęściej przyczyną utraty funkcji eksploatacyjnej konstrukcji np. szczelności zbiorników czy ładowni, a to może już grozić złożoną awarią innego typu niż dalszy rozwój długiego pęknięcia do kilkumetrowej długości krytycznej (w skali kadłuba statku).

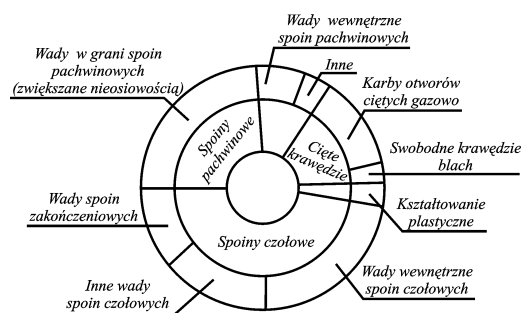
3. PRZYZCZYNY I CHARAKTERYSTYKA INICJACJI PĘKNIĘĆ ZMĘCZENIOWYCH KONSTRUKCJI KADŁUBÓW STATKÓW

Trwałość i wytrzymałość zmęczeniowa konstrukcji kadłuba statku jest wynikiem współdziaływania wielu czynników (rys. 6).

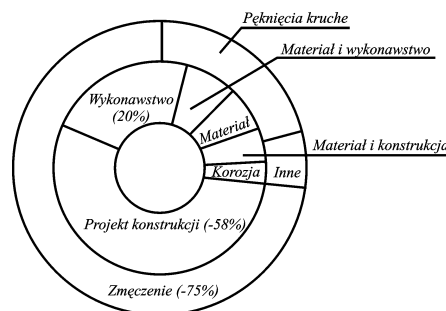
Złożoność tych czynników i ich często nieustalone, bardzo skomplikowane wzajemne relacje nie pozwalają jak dotąd na opracowanie jednolitej metodyki analizy i prognozowania własności zmęczeniowych konstrukcji. Dlatego też, mimo poznania i sklasyfikowania przyczyn typowych lokalnych pęknięć (rys. 7 i 8) przy prognozowaniu trwałości zmęczeniowej przyjęto stosować różne, często znaczące uproszczenia w rozumowaniu.



Rys. 6. Czynniki wpływające na trwałość zmęczeniową konstrukcji [1]



Rys. 7. Klasyfikacja i przyczyny pęknięć zmęczeniowych kadłubów statków [1]



Rys. 8. Klasyfikacja i jakościowy podział pęknięć zmęczeniowych wywołanych procesami wytwarzania konstrukcji [1]

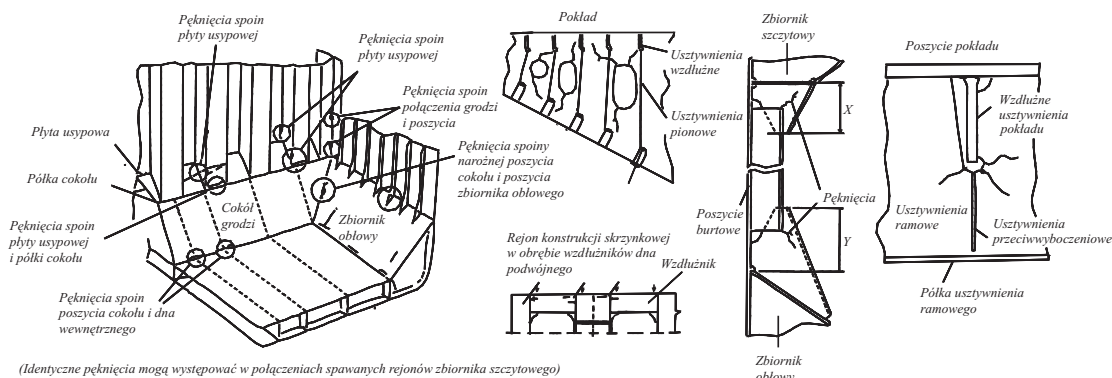
Generalnie należy stwierdzić, że przyczyną inicjacji pęknięć zmęczeniowych w konstrukcjach kadłubów statków jest nakładanie się działania karbów różnego rodzaju i pochodzenia, bardzo zróżnicowanych składowych obciążenia oraz złożonych mechanizmów rozwoju zniszczeń. Cechą charakterystyczną tych pęknięć na etapie propagacji jest niestabilny ich rozwój, w którym okresy rozrostu pęknięcia przerywane są okresami całkowitego zatrzymania rozwoju. Cechą charakterystyczną niszczenia zmęczeniowego kadłuba statku jest również to, że punkt chwilowej intensywności rozwoju pęknięć przemieszcza się w sposób niestabilny w obrębie określonego obszaru węzła konstrukcyjnego lub strefy konstrukcji.

4. TYPOWE RODZAJE PĘKNIĘĆ ZMĘCZENIOWYCH W KONSTRUKCJACH KADŁUBÓW STATKÓW

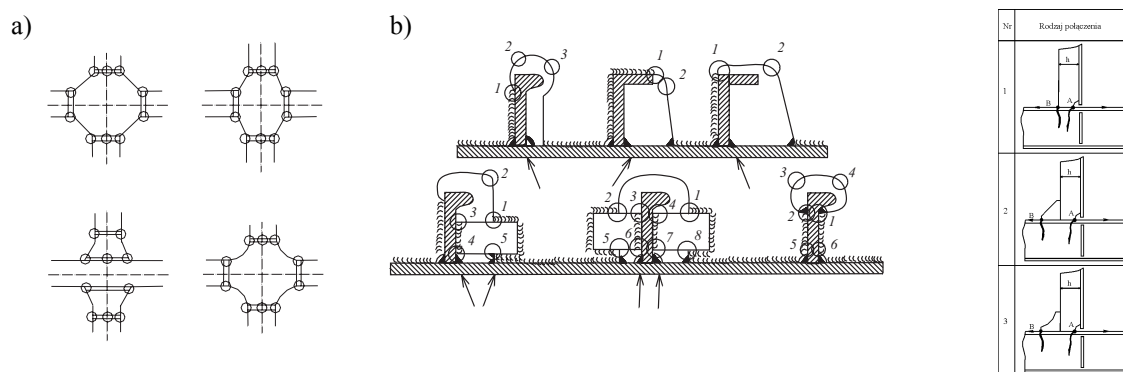
Generalnie każdy typ funkcjonalny statku posiada własne charakterystyczne miejsca inicjacji pęknięć zmęczeniowych (rys.9).

Wynikają one generalnie ze sposobu ukształtowania poprzecznego i podłużnego zładu konstrukcji, rodzaju i rozmieszczenia ładunku i

balastów oraz charakterystyki eksploatacyjnej. Istnieją jednak dla wszystkich rodzajów statków charakterystyczne wspólne rodzaje pęknięć, zlokalizowane z reguły w zładach wiązań kadłuba a szczególnie w miejscach wzajemnego krzyżowania się wiązań różnych typów (rys.10) oraz obszarów połączenia wzajemnie prostopadłych zespołów konstrukcyjnych (np. burta-gródź, gródź-dno, burta-dno itp. węzłówki)



Rys. 9. Charakterystyczne obszary pęknięć zmęczeniowych w kadłubie masowca oraz wybrane przykłady pęknięć [1]



Rys. 10. Charakterystyczne punkty inicjacji pęknięć w zładach wiązań okrętowych [1] a) skrzyżowanie wiązarów, b) skrzyżowanie usztywnień o zróżnicowanej wysokości – kontur wycięcia i połączenie lokalnego usztywnienia przeciw wyboczeniowego z niskim usztywnieniem wzdłużnym

5. METODY PROGNOZOWANIA RODZAJÓW I LOKALIZACJI PĘKNIĘĆ W KONSTRUKCJI KADŁUBÓW STATKÓW

5.1. Opcje postępowania

Istnieją trzy kierunki działania w tym zakresie:

- a) systematyczne dokumentowanie pęknięć konstrukcji rzeczywistych (kierunek chronologicznie najstarszy),
- b) badania laboratoryjne modeli badawczych od próbek materiałowych poprzez próbki ze złączami i wielkogabarytowe próbki poszczególnych elementów konstrukcyjnych aż do wielkogabarytowych, często wykonanych w skali 1:1 kosztownych modeli złożonych

węzłów konstrukcyjnych a nawet określonych sekcji strefowych kadłuba (w skrajnych wypadkach wykonanych jako dublety konstrukcji montowanych w stoczni w kadłub statku),

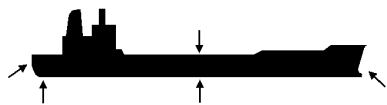
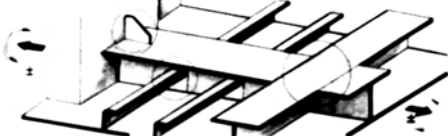



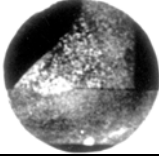

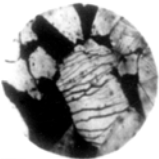
- c) postępowanie analityczno-obliczeniowe, wykonywane na ogół w ramach rozbudowanych globalnych programów obliczeniowych posiadających wydzielone bloki „zmęczeniowej kontroli konstrukcji”.

Ad.a. Budową bazy danych rzeczywistych pęknięć zmęczeniowych kadłubów statków zajmują się praktycznie wszystkie Towarzystwa Klasyfikacyjne, a także szereg znaczących instytucji międzynarodowych (np. International Institute of

Welding czy International Association of Classification Societies) oraz narodowych (np. brytyjski Department of Health and Security Executive czy wcześniej Department of Energy). W większości wypadków bogato udokumentowane przypadki pęknięć dostępne są w specjalnych katalogach [12] lub blokach zmęczeniowych specjalistycznych okrętowych programów konstrukcyjnych [13]. Podawany jest szkic pęknięć i ich lokalizacja, dokumentacja fotograficzna, prawdopodobne przyczyny inicjacji oraz

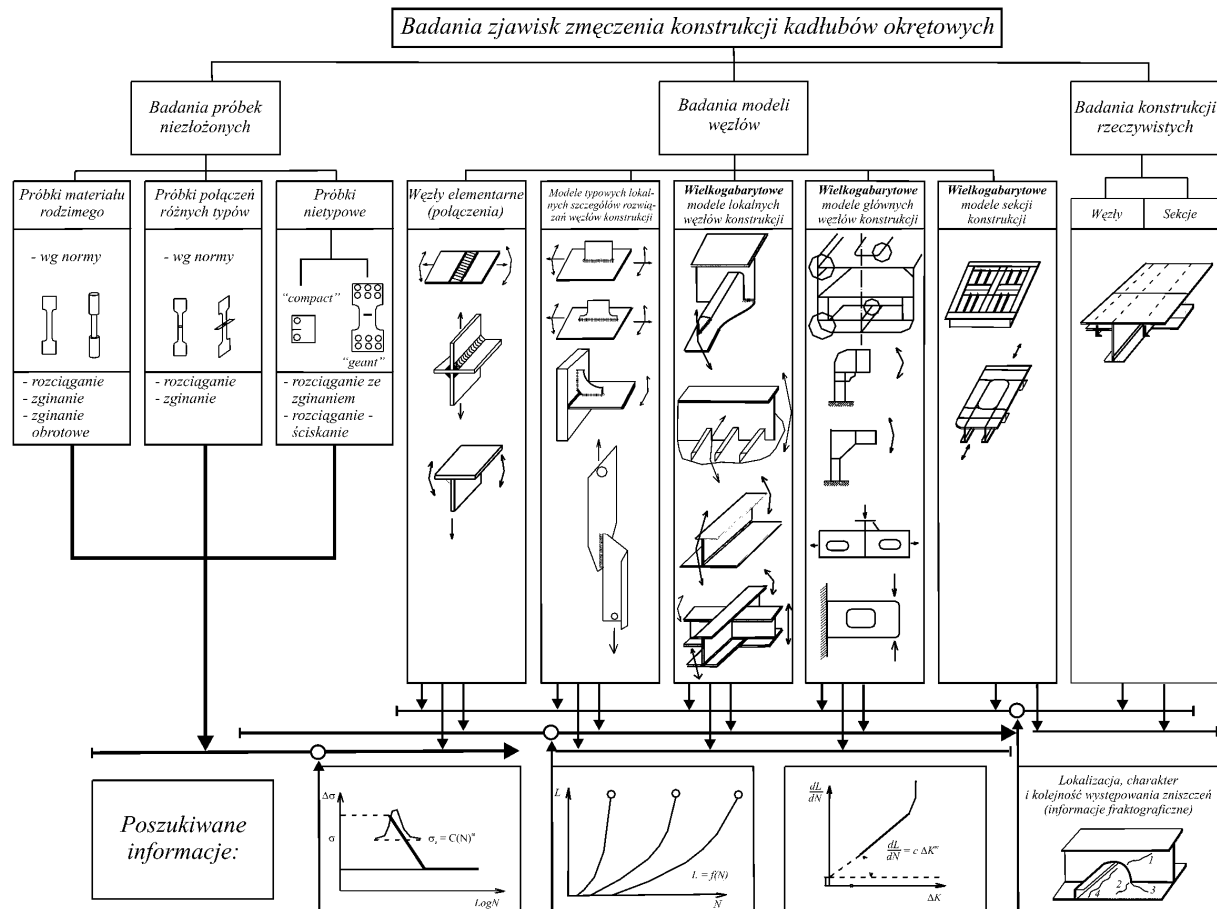
proponowane opcje naprawy uszkodzeń.

Ad.b. Badania laboratoryjne procesów inicjacji i propagacji pęknięć zmęczeniowych są problemem bardzo złożonym. Wynika to głównie z tego, że wynik uzyskany z badań jest zawsze odpowiedzią badanego podmiotu na warunki stworzone przez próbę. Biorąc pod uwagę charakter konstrukcji kadłuba badania są prowadzone dla różnych poziomów dekompozycji konstrukcji kadłuba (rys. 11).

Skala obserwacji	Poszukiwane informacje	Rozpatrywane czynniki
Kadłub okrętu	1. Najbardziej obciążone obszary kadłuba. 	- obciążenia zewnętrzne - obszary oddziaływania maksymalnych obciążeń - wymiary wiązań konstrukcyjnych - obszary nieciągłości
Część konstrukcji	2. Najbardziej obciążone elementy konstrukcyjne. 	- charakter obciążenia siłami zewnętrznymi - rozkład naprężeń w wiązaniach i poszyciu - miejsca spiętrzenia naprężeń
Wzł konstrukcji	3. Miejsca spiętrzenia naprężeń. 	- karby konstrukcyjne - przebieg linii sił w obszarze karbów konstrukcyjnych - osłabienia przekroju
Szczegóły konstrukcji węzła	4. Miejsca prawdopodobnych uszkodzeń zmęczeniowych. 	- usytuowanie spoin - zakończenia spoin - geometria szczegółów konstrukcyjnych - rozkład naprężeń - miejsca spiętrzenia naprężeń
Szczegóły wykonania węzła	5. Miejsca zapoczątkowania zmęczeń. 	- wady wykonawcze powiększające spiętrzenie naprężeń - jakość powierzchni w miejscach spiętrzenia naprężeń
Makro-struktura	6. Miejsca początkowych zmian strukturalnych. 	- zróżnicowanie strukturalne powodujące zróżnicowanie właściwości wytrzymałościowych i dodatkowe naprężenia
Mikro-struktura	7. Najslabsze elementy struktury. 	- jakość struktury - wielkość ziarna - granice ziaren - składniki stopowe - zanieczyszczenia i segregacje
Elementy mikro-struktury	8. Procesy zmian w granicach ziaren. 	- budowa granicy ziarna - stan odkształcenia ziarna - struktura wewnątrz ziarna - wakanse, dyslokacje, wtrącenia

Rys. 11. Poziomy dekompozycji problemu pęknięcia zmęczeniowego konstrukcji kadłuba statku oraz materiałów konstrukcyjnych [1]

Poziomom tym odpowiadają odpowiednie próbki i modele badawcze (rys. 12).



Rys. 12. Klasyfikacja próbek i modeli badawczych oraz poszukiwanych w badaniach informacji [1]

Generalnie poszukuje się rodziny krzywych Wöhlera dla określonych rozwiązań konstrukcyjnych, krzywych korelacyjnych na warunki korozyjne próby oraz jakość wykonawstwa, krzywych propagacji pęknięć $l = f(N)$ i pochodnych charakterystyk propagacji $\frac{dL}{dN} = C(\Delta K)^m$ a także charakterystycznych lokalizacji pęknięć i informacji o przebiegu procesów niszczenia w różnych warunkach środowiska i technologii wykonawczych oraz sztywności konstrukcji.

Uzyskiwane wyniki mogą w kolejnych krokach optymalizacyjnych doprowadzić do doboru prawidłowego rozwiązania konstrukcyjnego i procesu jego wytwarzania. Jest to działanie długotrwałe i bardzo kosztowne – stąd obecnie rzadko wybierane. Wyniki te mogą też tworzyć bazy danych do wypracowania założeń dla analitycznych obliczeń symulacyjnych oraz znajdować zastosowanie do wycinkowej kontroli prawidłowości wyliczeń, co staje się obecnie standardem.

Metody badawcze wymagają szeregu działań upraszczających, szczególnie w zakresie:

- wyboru reprezentatywnego rozwiązania konstrukcyjnego,
- wyboru i schematyzacji widma i sposobu przykładania obciążenia,
- wyboru odpowiednich warunków brzegowych podparcia i zamocowania modeli badawczych.

Do realizacji tego typu badań niezbędne są kompleksowe laboratoria specjalistyczne. Do wiodących w Europie należą: Ship Structures Laboratory – Delft, DNV Laboratory – Høvik, Ship Structures Laboratory – Hamburg oraz Laboratorium Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej.

Ad.c. Mimo obszernej bazy danych charakterystyk propagacji dla materiałów w stanie wyjściowym oraz ich połączeń, a także modeli fragmentów czy też całych węzłów konstrukcyjnych w zmęczeniowych analizach konstrukcji okrętowych instytucjonalnie nie wykorzystuje się dotąd filozofii projektowania dla warunków bezpiecznego pęknięcia (FAIL SAFE). Działania analityczne ujęte w procedurach Towarzystw Klasyfikacyjnych prowadzone są w obszarze ograniczonej trwałości zmęczeniowej (SAFE LIFE) w oparciu o rodzinę

tw. projektowych krzywych Wöhlera (S-N) odwzorowujących formułę $\sigma^m \cdot N = C$ w układzie logarytmicznym. Krzywe te (w zależności od instytucji firmującej procedurę) zawierają się w granicach od 4 do 8 a nawet 14. Każda z krzywych odpowiada określonej grupie wzorcowych elementów konstrukcyjnych. Dane są też zunifikowane dla wszystkich rozwiązań geometrii elementu krzywe ujmujące wpływ środowiska korozyjnego oraz standardu wykonania konstrukcji. Krzywe określane są doświadczalnie w laboratoriach, dlatego przy ich stosowaniu do obliczeń zmęczeniowych konstrukcji niezbędne jest wprowadzenie różnych poprawek. Do oceny parametrów wytrzymałości zmęczeniowej przy użyciu krzywych projektowych przyjmuje się trzy opcje naprężeń kalkulacyjnych dla obciążenia rozciągania i zginania:

- naprężenia nominalne,
- tzw. naprężenia geometryczne, wyznaczone przez graficzną liniową interpolację geometryczną w punkcie potencjalnego zagrożenia pęknięciem zmęczeniowym (tzw. HOT SPOT),
- naprężenia rzeczywiste, określane dla potencjalnego punktu inicjacji, ze znajomości naprężeń nominalnych oraz stabelaryzowanych współczynników koncentracji naprężeń K uzyskanych z obliczeń MES lub badań laboratoryjnych.

5.2. Procedury prognozowania trwałości zmęczeniowej konstrukcji kadłuba statku

Stosowane są dwie podstawowe procedury:

- ✓ bezpośrednia, oparta na znajomości widma wymuszeń falowaniem morza właściwym dla określonych, zdefiniowanych akwenów morskich,
 - ✓ deterministyczna (uproszczona),
- Dla procedury pierwszego rodzaju, określającej długoterminowe widmo rozkładu naprężeń konieczna jest znajomość funkcji falowania morza w różnych warunkach eksploatacji oraz tzw. funkcja przeniesienia, opisująca widmo naprężeń w konstrukcji wywołane falowaniem morza. Funkcje przeniesienia określa się dla każdego „hot spotu” dla różnych opcji załadowania, prędkości statku, jego kursu do fali oraz znajomości warunków falowania na trasie podróży. Znając długookresowy rozkład naprężeń w postaci widma skumulowanego i wykorzystując krzywe projektowe S-N oraz prawo Palmgrana-Minera kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych dla cyklu eksploatacji statku określić można w długotrwałym, pracochłonnym cyklu obliczeń prognozę trwałości zmęczeniowej analizowanych węzłów konstrukcji.

Procedura uproszczona, dająca wyniki mniej dokładne, również opiera się na krzywych S-N oraz prawie Palmgrana-Minera. Inaczej określa się

jednak długoterminowe rozkłady naprężeń. Podstawą jest oszacowanie funkcji gęstości prawdopodobieństwa tego rozkładu na podstawie dwuparametralnego rozkładu Weibulla.

Postępowanie prowadzi się w następujących krokach:

- określenie obciążeń,
- dobór i korekta krzywej S-N,
- dobór opcji naprężenia kalkulacyjnego,
- obliczenie uszkodzenia zmęczeniowego.

5.3. Identyfikacja stanów obciążenia

Na obciążenie kadłuba składają się:

1. Ciężar statku i jego rozłożenie (statycznie).
2. Ciężar ładunku oraz balastu i jego rozłożenie (statycznie).
3. Siły wyporu i ich rozłożenie (statycznie).
4. Obciążenie od falowania:
 - a) zmiany ciśnienia hydrostatycznego (nurzenie i kołysanie),
 - b) parcie od dynamicznych ruchów ładunku,
 - c) udary fali (slamming) (dziób, rufa).
5. Obciążenia od pracy systemów napędowych i pomocniczych (śruba, wał, silnik, napędy, przekładnie, różne agregaty itp.).
6. Obciążenie od działania wiatrów i prądów morskich.
7. Obciążenia od krótko i długo okresowych zmian temperatury.
8. Statyczne i udarowe obciążenia od działania lodów.
9. Naprężenia technologiczne (statyczne).

W procedurze uproszczonej uwzględniane są wyłącznie składowe 1, 2, 3 oraz 4a i 4b.

5.4. Pewniki i założenia upraszczające dla procedur prognozowania trwałości zmęczeniowej

- trwałość zmęczeniowa materiału w stanie dostarczenia rośnie praktycznie liniowo wraz ze wzrostem R_m i dla okrętowych stali normalnej wytrzymałości (NW) jest niższa niż dla stali podwyższonej wytrzymałości (PW),
- trwałość zmęczeniowa połączeń spawanych dla wszystkich rodzajów stali okrętowych jest niższa niż dla materiału rodzimego i nie zależy od właściwości statycznych materiału,
- zjawiska korozyjne generalnie obniżają trwałość zmęczeniową o ok. 50% w stosunku do uzyskanej dla warunków „bezkorozyjnych”,
- w przypadku korozji wodnej wytrzymałość zmęczeniowa dla wszystkich rodzajów stali okrętowych nie jest zależna od właściwości statycznych,
- trwałość zmęczeniowa jest znacząco zależna od szczegółowego zaprojektowania elementów węzła konstrukcji, należytego ich wykonania w procesie produkcyjnym oraz oddziaływania środowiska,
- staranne pokrywanie konstrukcji powłokami

- ochronnymi zwiększa trwałość zmęczeniową,
- o trwałość zmęczeniowa w warunkach lokalnego zginania jest niższa niż dla rozciągania,
- o lokalne asymetryczne zginanie elementów konstrukcji obniża dodatkowo trwałość zmęczeniową,
- o trwałość zmęczeniowa konstrukcji statków eksploatowanych na trasach północnoatlantyckich jest niższa do 50% w stosunku do innych światowych morskich tras żeglugowych,
- o obliczenia zmęczeniowe należy prowadzić dla wszystkich znaczących stanów załadowania oraz stanów balastowych,
- o punkty potencjalnej inicjacji pęknięć zmęczeniowych (HOT SPOT) należy określać drogą obliczeń MES,
- o określenie uszkodzenia zmęczeniowego D_i dla określonego i-tego stanu załadowania należy określać ze zmodyfikowanej reguły Palmgren-Minera o postaci:

$$D_i = \frac{\alpha_i N_L}{C} \frac{S_R^m}{(L_n N_R)^{m/k}} \eta \Gamma \left(1 + \frac{m}{k} \right)$$

gdzie:

N_L – szacunkowa liczba cykli w czasie eksploatacji statku,

M – współczynniki pochylenia krzywej projektowej S-N

Γ – funkcja gamma Eulera,

α_i – część czasu eksploatacji statku przy analizowanym stanie załadowania (np. balast, pełny ładunek itp.),

S_R – skrajny zakres naprężeń w czasie N_R cykli (parametr rozkładu Weibulla),

N_R – ilość cykli odpowiadająca prawdopodobieństwu przekroczenia zakresu $10^{-8} \leq 1/N_R \leq 10^{-2}$ przy wartości parametru „Weibulla” $0,7 \leq k \leq 1,3$,

m i C – stałe.

- o sumaryczne uszkodzenie zmęczeniowe określonego węzła konstrukcji wyraża się formułą:

$$D = \sum_i D_i$$

- o trwałość zmęczeniową węzła konstrukcji określa formuła:

$$N_F = \frac{\text{Trwalosc projektowa}}{D}$$

- o trwałość (w latach) określana jest wzorem:

$$N \cong C_s \left(\frac{1}{\sigma \cdot K} \right)^3$$

σ – naprężenie nominalne,

K – zintegrowany umowny współczynnik koncentracji naprężeń,

C_s – stała ujmująca wpływ środowiska.

- o zintegrowany współczynnik koncentracji naprężenia opisuje formuła:

$$K = K_g \cdot K_w \cdot K_o \cdot K_{te} \cdot K_{ta} \cdot K_n$$

gdzie:

K_g – współczynnik geometrycznej koncentracji naprężeń,

K_w – współczynnik geometrii spoiny (ok.1,5),

K_e – współczynnik jakości zakończenia spoiny,

K_{te} – współczynnik koncentracji dla tolerancji „przekoszenia” krawędzi przy spawaniu doczołowym,

K_{ta} – współczynnik koncentracji wywołany kątowym odkształceniem spoin doczołowych,

K_n – współczynnik koncentracji dla profili asymetrycznych,

- o naprężenie rzeczywiste w punkcie potencjalnej inicjacji pęknięcia (HOT SPOT):

$$S = K \cdot \Delta \sigma_{nom}$$

- o trwałość zmęczeniową wyznacza się dla wybranych z analizy statycznej MES tzw. punktów referencyjnych,

- o dla pozostałych punktów trwałość oznacza się przez określenie przeliczeniowej wartości naprężeń lokalnych σ_i w stosunku do naprężeń punktu referencyjnego σ_{ref}

$$\sigma_i = \sigma_{ref} \cdot C_x$$

gdzie:

C_x – iloczynowy współczynnik ujmujący wpływ stabelaryzowanych współczynników jednostkowych określających wpływ:

- kształtu spoiny,
- lokalnych ciśnień dynamicznych,
- sił ściskających we wiązarach,
- rodzaju połączenia przenikających się systemów wiązań
- otworów konstrukcyjnych,
- węzłówek.

Następnie powtarza się dla σ_i procedurę obliczeniową.

5.5. Komputerowe systemy obliczeniowe dla konstrukcji kadłubów okrętowych

Rozwój techniki komputerowej stworzył możliwości trójwymiarowego modelowania konstrukcji kadłuba (koncept model). Model ten stworzył możliwości wprowadzenia procedur zmęczeniowych dla analizy konstrukcji. Aktualnie możliwości takie oferują następujące systemy: Nauticus Hull (DNV), Safe Hull (ABS), Ship Rights (Lloyd), Posejdon (GL), VeriStar (BV) a także procedury PRS.

6. PODSUMOWANIE

1. W okrętownictwie nie istnieje pojęcie technicznego diagnozowania stanu konstrukcji kadłuba statku w eksploatacji.
2. Przeglądy okresowe stanu konstrukcji nie są w stanie zidentyfikować większości tzw. małych pęknięć.
3. Procedura zabezpieczania pożądanej trwałości

zmęczeniowej sprowadza się do wieloopcyjnych obliczeń zmęczeniowych opartych na znacząco uproszczonych formułach oraz doświadczeniu.

4. W wymienionych działaniach osiągnięto znaczący postęp a nieustannie doskonalone procedury i algorytmy postępowania wpisano w przepisy klasyfikacyjne.
5. Problemu projektowego kształtowania trwałości zmęczeniowej rozwiązań konstrukcyjnych kadłubów statków nie można uznać jeszcze za opanowany.
6. Znaczące zmiany charakterystyk nowych typów statków (rosnące wymiary kadłuba – statki typu VLCC, duże szybkości eksploatacyjne – statki typu HSLC, wzrost mocy siłowni, podwójne kadłuby oraz nowa generacja spawanych laserowo, sandwich'owych konstrukcji stalowych czy wprowadzanie m.in. kompozytów nie metalowych) są przyczyną, dla której prowadzi się w dalszym ciągu zaawansowane prace badawcze nad doskonaleniem możliwości prognozowania trwałości zmęczeniowej konstrukcji statków.

7. LITERATURA

- [1] K. Rosochowicz: Problemy pękania zmęczeniowego kadłubów statków. Monografia. Wyd. Okrętownictwo i Żegluga, Gdańsk 2000.
- [2] Fatigue Strength of Welded Ship Structures, BV-Rules, 1999.
- [3] Rules for Classification and Construction, Section 20. Fatigue Strength – GL Rules, 1999.
- [4] Fatigue Assessment of Ship Structures. DNV Classification Note Nr 307, 1998 and Procedures: CSA-2, Plus-1, Plus-2.
- [5] Fatigue Design Assessment Procedure – LRS 1998.
- [6] Report on the Development of a Unified Procedure for Fatigue Design of Ship Structures. IACS Report 1996.
- [7] Fatigue Assessment of the Ship Structures. IACS 1999.
- [8] B.Bлагоjewic, Z.Domazet, K.Zima: Procedural, Operational and Theoretical Sensitivites of Fatigue Damage Assessment in Shipbuilding. Jour.of Ship Prod. Nr IX/2002.
- [9] J.M.Fergusson: Bulk carriers the need to know. Lloyds List 30.X.1997.
- [10] W.Magelssen: Fatigue the Challenge for Modern Ship Design. DNV Paper Nr 2000-P004 (Febr.2000).
- [11] Fatigue Strength Analysis of Steel Ship Hull Structures. Publ. PRS Nr45/P/1998
- [12] Bulk Carriers: Guide Lines for Surveys Assessment and Repair of Hull Structure. IACS 1994.
- [13] Nauticus Hull – DNV Information Bulletin 2000.



Prof. dr hab. inż. Krzysztof Rosochowicz (1938) (dr nt 1962, dr hab. 1986, prof. P.G. 1993, prof. tyt. 2002) od roku 1992 do chwili obecnej kierownik Katedry Technologii Okrętu, Systemów Jakości i Materiałoznawstwa. W latach 1996-2002 Dziekan Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej. Specjalizuje się w zagadnieniach optymalizacji technik wytwarzania oraz wytrzymałości eksploatacyjnej konstrukcji, ze szczególnym uwzględnieniem problemów zniszczenia zmęczeniowego wielkogabarytowych konstrukcji spawanych. Jest przewodniczącym Grupy Zmęczeniowego Projektowania Konstrukcji Zespołu Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji KBM PAN.