

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

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. Jan Kiciński

IMP w Gdańsku

prof. dr hab. inż. Jerzy Kisilowski

Politechnika Warszawska

prof. dr hab. inż. Stanisław Niziński

UWM w Olsztynie

dr hab. inż. Stanisław Radkowski **prof. PW**

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 Bydgoszczy

Recenzenci nadesłanych prac:

prof. dr hab. inż. Stanisław E. Dworecki

prof. dr hab. inż. Jerzy Girtler

prof. dr hab. inż. Jan Kiciński

dr hab. inż. Krzysztof Kosowski – **prof. Polit. Gd.**

prof. dr hab. inż. Ryszard Michalski

prof. dr hab. inż. Stanisław Niziński

prof. dr hab. inż. Jerzy Szkoła

dr hab. inż. Henryk Tylicki – **prof. ATR**

prof. dr hab. inż. Tadeusz Uhl

prof. dr hab. inż. Bogdan Żółtowski

dr hab. inż. Stefan Wejna – **prof. Polit. Szczec.**

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

REDAKCJA CZASOPISMA:

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

KONTO PTDT:

Bank Przemysłowo Handlowy S.A.
II O/ Warszawa
nr konta: 10601015-320000461123

Wszystkie opublikowane prace w czasopiśmie uzyskały pozytywne recenzje.

Redakcja zastrzega sobie prawo korekty nadesłanych artykułów.

Kolejność umieszczenia prac w czasopiśmie zależy od terminu ich nadesłania i otrzymania ostatecznej, pozytywnej recenzji.

Wytyczne do publikowania w DIAGNOSTYCE można znaleźć na stronie internetowej:

<http://www.uwm.edu.pl/wnt/diagnostyka>

Redakcja informuje, że istnieje możliwość zamieszczania w DIAGNOSTYCE ogłoszeń i reklam.

Jednocześnie prosimy czytelników o nadsyłanie uwag i propozycji dotyczących formy i treści naszego czasopisma. Zachęcamy również wszystkich do czynnego udziału w jego kształtowaniu poprzez nadsyłanie własnych opracowań związanych z problematyką diagnostyki technicznej. Zwracamy się z prośbą o nadsyłanie informacji o wydanych własnych pracach nt. diagnostyki technicznej oraz innych pracach wartych przeczytania, dostępnych zarówno w kraju jak i zagranicą.

Spis treści

Słowo Redaktora	5
Wymagania redakcyjne	6
ARTYKUŁY GŁÓWNE	
Aleksander JASTRIEBOW, Stanisław GAD, Grzegorz SŁOŃ – Politechnika Świętokrzyska	7
<i>Analiza komputerowa diagnozowania defektów alternatora z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej.</i>	
<i>Computer analysis of alternator defects diagnosing using artificial neural network.</i>	
Cezary BOCHENSKI, Remigiusz MRUK – SGGW	11
<i>Metody oceny stanu technicznego układu Common Rail z wykorzystaniem systemów komputerowych.</i>	
<i>Diagnostic processes of Common Rail unit based on computer systems.</i>	
Andrzej AMBROZIK, Stanisław W. KRUCZYŃSKI, Jacek ŁĄCZYŃSKI, Dariusz TOMASZEWSKI – Pol. Warszawska ...	17
<i>Badania przyrostu temperatur spalin w trójfunkcyjnym reaktorze katalitycznym na potrzeby OBD II</i>	
<i>Research of the exhaust temperature increase in three - way catalytic converter for OBD II needs</i>	
Andrzej AMBROZIK, Stanisław W. KRUCZYŃSKI, Jacek ŁĄCZYŃSKI, Dariusz TOMASZEWSKI – Pol. Warszawska ...	21
<i>Pomiary stężeń tlenu w diagnozowaniu pokładowym trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego spalin.</i>	
<i>Research of the oxygen content for on – board diagnosis of three way catalytic converter.</i>	
Stanisław NIZIŃSKI, Krzysztof LIGIER – UWM w Olsztynie.....	26
<i>Koncepcja modelu matematycznego kosztów eksploatacji obiektów technicznych.</i>	
<i>Conception of exploitation costs mathematical model of technical objects.</i>	
Grzegorz KLEKOT – Politechnika Warszawska	31
<i>Hałas w kabinie samochodu ciężarowego jako przykład wykorzystania metodyki stosowania materiałów gumopochodnych w zadaniu minimalizacji uciążliwości akustycznej maszyn.</i>	
<i>Noise in a truck cabin as an example of using the rubber-derivative materials in the task of minimizing of acoustic noxiousness of a machine.</i>	
Jan ADAMCZYK, Piotr KRZYWORZEKA, Witold CIOCH – AGH w Krakowie	37
<i>Wpływ interpolacji na procedurę liniowej decymacji.</i>	
<i>Interpolation Influence in Linear Decimation Procedure.</i>	
Rafał PAWLETKO – Akademia Morska w Gdyni	43
<i>Wykorzystanie sieci neuronowej do diagnozowania wybranych niesprawności silnika okrętowego.</i>	
<i>The neural networks application in the marine diesel engine diagnostics.</i>	
Józef PSZCZÓLKOWSKI – Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie.....	48
<i>Rozruch silnika tłokowego jako proces diagnostyczny.</i>	
<i>Piston engine start-up as a diagnostic process.</i>	
Arkadiusz BOCZKOWSKI – Politechnika Śląska	54
<i>Zastosowanie estymatorów punktowych i ich dyskryminant w ocenie poprawności wykonania i montażu samochodowych skrzyń przekładniowych.</i>	
<i>The application of point estimators and their discriminants in quality assessment of production and assembling automotive gearboxes.</i>	
Tadeusz UHL, Artur HANC – AGH w Krakowie.....	60
<i>Rozproszone systemy monitoringu w diagnostyce maszyn.</i>	
<i>Distributed monitoring systems in machine diagnostics.</i>	
Anna TIMOFIEJCZUK – Politechnika Śląska.....	67
<i>Zastosowanie analizy obrazów w identyfikacji zmian cech sygnałów diagnostycznych.</i>	
<i>Application of image analysis for identification of changes in varying conditions of diagnostic signal features.</i>	
Yevhen KHARCHENKO, Stefan SOBKOWSKI – UWM w Olsztynie	75
<i>Zastosowanie analizy modalnej w diagnostyce stanu technicznego konstrukcji masztowych dźwigów budowlanych.</i>	
<i>Application of a modal analysis in the technical diagnostics of the tower constructions of a building hosting equipment.</i>	
Przemysław DROŻYNER – UWM w Olsztynie.....	82
<i>Eric VEITH – Bureau Veritas Abu Dabi, Technical Centre.</i>	
<i>Risk Based Inspection methodology overview.</i>	
<i>Inspekcja w parciu o ryzyko – przegląd metody.</i>	
Jerzy SZKODA – UWM w Olsztynie	89
<i>Diagnozowanie stanów zdolności jakościowej procesu produkcyjnego.</i>	
<i>Diagnosing the states of quality ability of production process.</i>	

Kinga RAJEWSKA, Stefan Jan KOWALSKI – Politechnika Poznańska.....	95
<i>Emisja akustyczna jako narzędzie monitorowania procesu pękania materiałów suszonych.</i>	
<i>Acoustic emission as a method of monitoring of fracture phenomena in dried materials.</i>	
Stanisław NIZIŃSKI, Sławomir WIERZBICKI – UWM w Olsztynie	101
<i>Model matematyczny procesu eksploatacji obiektów technicznych z uwzględnieniem ich stanu diagnozowania.</i>	
<i>Mathematical model of technical objects exploitation considering their diagnostic state.</i>	
Marcin BEDNARSKI, Wojciech CHOLEWA – Politechnika Śląska.....	105
Wiktor FRID - Department of Nuclear Reactor Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm	
<i>Zastosowanie modeli odwrotnych do diagnozowania stanów utraty chłodzenia w reaktorach jądrowych typu wrzącego.</i>	
<i>Application of inverse models to diagnostics of loss of coolant accidents in boiling water nuclear reactors.</i>	
Krzysztof ŁUKASIK – Politechnika Lubelska	111
<i>Przykłady spektrogramów JTFA zarejestrowanych w wybranych warunkach pracy homogenizatora ciśnieniowego.</i>	
<i>A sample of JTFA spectrograms registered in selected operating conditions of pressure homogenizers.</i>	
Izabela JÓZEFczyk, Waldemar KUROWSKI, Andrzej PANKOWSKI – Płocka Szkoła Nauk Technicznych i Społecznych	116
<i>Badania charakterystyk sygnałów diagnostycznych.</i>	
<i>The study on characteristic of diagnostic signals.</i>	
RECENZJE	
J. Korbicz, J.M. Kościelny, Z. Kowalczyk, W. Cholewa: „ <i>Diagnostyka procesów</i> ”	125
W. Batko, M. Ziółko: „ <i>Zastosowanie teorii falek w diagnostyce technicznej</i> ”	126
S. Radkowski: „ <i>Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych</i> ”	127
H. Kaźmierczak: „ <i>Analiza rozkładu mocy obciążeń dynamicznych w systemach mechanicznych</i> ”	128
KONFERENCJE	
XXX Jubileuszowe Ogólnopolskie Sympozjum „ <i>Diagnostyka Maszyn</i> ”	130

(2 puste wiersze cz. 10pt.)

TYTUŁ PUBLIKACJI (cz. 12 pt. pogrubiona, wyśrodkowane)

(1 pusty wiersz cz. 10 pt.)

Imię i NAZWISKO (cz. 10 pt. wyśrodkowane)

(1 pusty wiersz cz. 10 pt.)

Instytut, Katedra (cz. 10 pt. wyśrodkowane)

adres, fax, email, co najmniej autora odpowiedzialnego

(1 pusty wiersz cz. 10 pt.)

Streszczenie

Streszczenie o charakterze dokumentacyjnym nie powinno przekraczać dziesięciu wierszy. Przy streszczeniu stosować obustronne wcięcie równe 1 cm i obustronne justowanie. Tekst streszczenia powinien być napisany w języku referatu, przy zastosowaniu akapitu 0,5 cm w pierwszym wierszu.

(1 pusty wiersz cz. 10 pt.)

Słowa kluczowe: (1 wiersz, wyśrodkowane)

(1 pusty wiersz cz. 10 pt.)

TYTUŁ W JĘZYKU ANGIELSKIM (cz. 10, wyśrodkowane)

(1 pusty wiersz cz. 10 pt.)

Summary

Streszczenie w języku angielskim powinno być tłumaczeniem streszczenia umieszczonego na początku publikacji (sposób formatowania jak w przypadku streszczenia początkowego). Po streszczeniu umieścić słowa kluczowe w języku angielskim. Uwaga w przypadku artykułów pisanych w jęz. angielskim prosimy również o zamieszczenie streszczenia w jęz. polskim.

(1 pusty wiersz cz. 10 pt.)

Keywords: (1 wiersz, wyśrodkowane)

(2 puste wiersze cz. 10 pt.)

1. TYTUŁ ROZDZIAŁU (cz. 10 pt. pogrubiona)

(1 pusty wiersz cz. 10 pt.)

Objętość publikacji nie powinna przekraczać 6-10 stron A4. Ze względów edytorskich prosimy o zachowanie parzystej liczby stron.

(1 pusty wiersz cz. 10 pt.)

1.1. Tytuł podrozdziału (cz. 10 pt. pogrubiona)

(1 pusty wiersz cz. 10 pt.)

Tekst całej publikacji (z wyjątkiem tytułu) należy napisać 10 punktową czcionką Times New Roman w dwóch kolumnach o szerokości 7,5 cm, odstęp między wierszami pojedynczy. Wymagany edytorem tekstu jest Word for Windows¹. Lewy, prawy oraz górny margines powinny wynosić 2,5 cm, a dolny 2 cm. W tekście publikacji stosować akapit 0,5 cm w pierwszym wierszu oraz pełne justowanie. Tytuły rozdziałów głównych należy pisać wielkimi literami (z pogrubieniem), natomiast tytuły podrozdziałów – małymi pogrubionymi. Po tytułach nie stawiać kropki.

(1 pusty wiersz cz. 10 pt.)

2. TYTUŁ ROZDZIAŁU (cz. 10 pt. pogrubiona)

(1 pusty wiersz cz. 10 pt.)

Równania należy ustawiać na środku wiersza i numerować po prawej stronie tekstu. Rysunki, wykresy lub fotografie wykonane dowolną techniką powinny stanowić integralną część tekstu. Podpisy pod rysunkami, wykresami lub fotografiami powinny być wyśrodkowane i posiadać obustronne wcięcie równe 1 cm. Nazwy tabel należy umieszczać nad tabelami i równać w prawo.

Przygotowane według wymagań artykuły należy przesłać adres diagnostyka@uwm.edu.pl lub na dyskietce (CD) na adres redakcji. Prosimy również o przysyłanie na adres redakcji wydrukowanego artykułu, co ułatwi ostateczną jego redakcję.

Terminy nadsyłania publikacji:

- do numeru 1(28) / 2003 – 15.05.2003r.

- do numeru 2(29) / 2003 – 15.10.2003r.

(1 pusty wiersz cz. 10 pt.)

LITERATURA (cz. 10 pt. pogrubiona)

(1 pusty wiersz cz. 10 pt.)

[1] Spis literatury wykorzystanej przez Autora powinien zawierać – numer pozycji w nawiasie kwadratowym [], nazwisko inicjały autora, tytuł pracy – dla pozycji książkowych: tom, kolejne wydanie, miejsce wydania, wydawnictwo i rok wydania a dla artykułu: tytuł czasopisma numer, strony (po skrócie str.), str. lub rozdział dla książek.

[2]

[3]

(2 puste wiersze cz. 10 pt.)

Na końcu publikacji należy umieścić krótką informację o Autorze (Autorach) wraz ze zdjęciem o wymiarach 3 x 4 cm (zdjęcie zeskanowane w odcieniach szarości z rozd. 300 dpi). Informacje te powinny być sformatowane tak jak tekst publikacji.

Adres redakcji oraz inne informacje o „Diagnostyce” można znaleźć na stronie

<http://www.uwm.edu.pl/wnt/diagnostyka/>

¹ Przypisy umieszczać na tej samej stronie

ANALIZA KOMPUTEROWA DIAGNOZOWANIA DEFECTÓW ALTERNATORA Z WYKORZYSTANIEM SZTUCZNEJ SIECI NEURONOWEJ

Aleksander JASTRIBOW

Politechnika Świętokrzyska,
Al. Tysiąclecia P. P. 7., 25-314 Kielce, fax: (0-41) 34 24 218, e-mail: enecs@tu.kielce.pl
Politechnika Rzeszowska,
ul. W. Pola 2, Rzeszów

Stanisław GAD, Grzegorz SŁOŃ

Politechnika Świętokrzyska, Katedra Energoelektroniki
Al. Tysiąclecia P. P. 7., 25-314 Kielce, fax: (0-41) 34 24 218, e-mail: enecs@tu.kielce.pl

Streszczenie

Opracowano analizę komputerową do prowadzenia symulacyjnych badań statystycznych diagnozowania defektów alternatora za pośrednictwem sztucznych sieci neuronowych w postaci wielowarstwowych perceptronów. Na podstawie zbudowanego programu i generatora danych uczących przeanalizowano możliwość diagnostyki kilku defektów alternatora. Przedstawione wyniki symulacji dają pełną gwarancję efektywnego rozwiązania postawionego problemu.

Słowa kluczowe: sztuczne sieci neuronowe, alternator, diagnostyka

COMPUTER ANALYSIS OF ALTERNATOR DEFECTS DIAGNOSING USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

Summary

The computer analysis for conducting of statistical simulating research of alternator defects diagnosing through artificial neural networks in the form of multi layer perceptrons has been worked out. On the basis of built program and teaching data generator, a possibility of some alternator defects diagnosing has been analyzed. Presented simulation results give full guarantee of effective solution of tested problem.

Key words: artificial neural networks, alternator, diagnostics

1. WSTĘP

W poprzednich pracach autorów [1-3] przeprowadzono analizę zastosowania wielowarstwowych perceptronów do budowy detektorów diagnostycznych wyposażenia elektrycznego samochodów osobowych. W niniejszej pracy analizowano zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do diagnozowania więcej niż dwóch defektów alternatora.

Diagnostyka urządzeń elektrycznych w pojazdach samochodowych polega przede wszystkim na kontroli ciągłości połączeń instalacji elektrycznej, pomiarze prądów i spadków napięć w poszczególnych jej punktach, pomiarze wartości elementów elektrycznych oraz wielkości i ma na celu wykrycie przyczyn tych usterek. Na podstawie wyników takich pomiarów można określić stan techniczny poszczególnych urządzeń [4-5].

Ogólnie znane metody i techniki detekcji i lokalizacji uszkodzeń w obiektach technicznych można podzielić na trzy zasadnicze grupy [6]:

- metody statystyczne, polegające na statystycznej obróbce sygnałów pomiarowych;
- metody z wykorzystaniem modeli matematycznych procesów;
- metody sztucznej inteligencji, a w tym systemów ekspertowych oraz sztucznych sieci neuronowych.

W ogólnym przypadku problem stosowania sieci neuronowych w diagnostyce uszkodzeń obiektów technicznych można sprowadzić do następujących działań [6]:

- zdefiniowanie listy uszkodzeń;
- określenie typowych obrazów odpowiadających wybranemu uszkodzeniu oraz stanowi normalnemu obiektu;
- wybór struktury sieci algorytmu jej uczenia; dla perceptronu wielowarstwowego liczba sygnałów mierzonych odpowiada liczbie wejść w warstwie

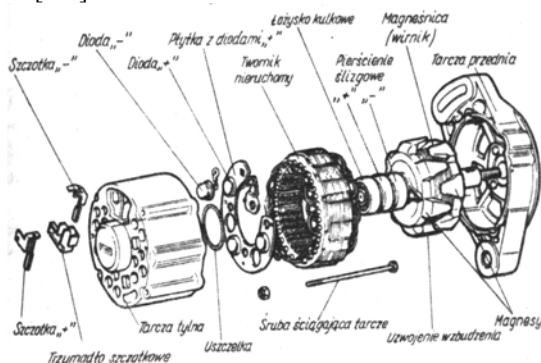
- wejściowej, a liczba uszkodzeń – liczbie wyjść w warstwie wyjściowej;
- uczenie sieci z wykorzystaniem obrazów uczących;
 - testowane sieci dla dowolnych stanów obiektu.

Zostały opracowane tabele defektów i sygnałów symptomowych dla diagnozowania jak również zbudowano odpowiednie programy i dane uczące dla uczenia i testowania wybranych struktur wielowarstwowych perceptronów.

W następnych rozdziałach będą opisane: model fizyczny alternatora z opracowanej tablicy defektów, typ i struktura wielowarstwowego perceptronu do celów diagnozowania oraz wyniki symulacji komputerowej.

2. MODEL FIZYCZNY ORAZ TABELA DEFEKTÓW ALTERNATORA

Budowa alternatora przedstawiona jest na rys. 2.1 [4-5].



Rys. 2.1. Model fizyczny alternatora.

Analizując parametry, stany pracy alternatora [5] opracowano spis parametrów i sygnałów symptomowych wpływających na kształt defektów w postaci tabeli 2.1.

Tabela 2.1.

Analiza wyników badania alternatora za pomocą lampek. E_0 – natężenie światła żarówek 1 i 3 po przyłączeniu zestawu do akumulatora (sonda nie przyłączona do żadnego zacisku prądnicy); E_1 , E_3 – natężenie światła odpowiednio żarówek 1 i 3 po przyłączeniu sondy.

przyłączenia sondy:

L p	Natężenie światła		Stan lampek		Rodzaj uszkodzenia
	Nr lampki				
	1	3	2	4	
1	$E_1 > E_0$	$E_3 > E_0$	0	0	Praca poprawna, lub zwarcie międzyfazowe uzwojeń stojana.
2	$E_1 = E_0$	$E_3 = E_0$	0	0	Przerwa w uzwojeniu stojana.
3	0	$E_3 > E_0$	0	0	Zwarcie diody połączonej z dodatnim zaciskiem prądnicy.
4	$E_1 > E_0$	0	0	0	Zwarcie diody połączonej z ujemnym zaciskiem prądnicy (masą). Jeżeli taki sam objaw występuje kolejno przy badaniu wszystkich faz, to świadczy to o przerwie w uzwojeniu wzbudzenia
5	$E_1 > E_0$	$E_3 > E_0$	1	0	Przerwa w diodzie połączonej z zaciskiem dodatnim prądnicy.

6	$E_1 > E_0$	$E_3 > E_0$	0	1	Przerwa w diodzie połączonej z zaciskiem masowym.
7	$E_1 < E_3$		1	0	Błędnie włączona dioda połączona z dodatnim zaciskiem prądnicy.
8	$E_1 > E_3$		0	1	Błędnie włączona dioda, która powinna być połączona z zaciskiem masowym.
9	$E_1 > E_3$		0	0	Jeżeli stwierdzono tylko w jednej fazie, to świadczy o zwarcu uzwojenia stojana z masą. Jeżeli występuje w trzech fazach, to świadczy o zwarcu środka gwiazdy stojana z masą.

Po opracowaniu sygnałów wpływających na sprawność pracy alternatora (tabela 2.1) niżej przedstawiono opis możliwych defektów alternatora (tabela 2.2).

Tabela 2.2.

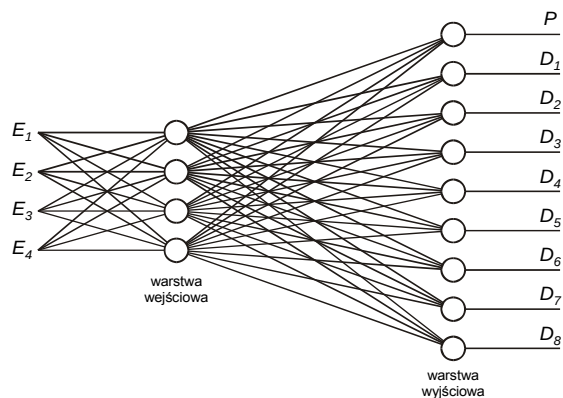
Rodzaje defektów alternatora, oraz sposób usunięcia niedomagań.

Parametr	Opis defektu	Sposób usunięcia niedomagania
P	Praca poprawna.	Alternator jest sprawny.
	Zwarcie międzyfazowe uzwojeń stojana.	Wymienić alternator na nowy.
D1	Przerwa w uzwojeniu stojana.	Wymienić alternator na nowy.
D2	Zwarcie diody połączonej z dodatnim zaciskiem prądnicy.	Wymienić płytkę z diodami.
D3	Zwarcie diody połączonej z ujemnym zaciskiem prądnicy (masą).	Wymienić płytkę z diodami.
	Przerwa w uzwojeniu wzbudzenia.	Wymienić wirnik.
D4	Przerwa w diodzie połączonej z zaciskiem dodatnim prądnicy.	Wymienić uszkodzoną diodę.
D5	Przerwa w diodzie połączonej z zaciskiem masowym.	Wymienić uszkodzoną diodę.
D6	Błędnie włączona dioda połączona z dodatnim zaciskiem prądnicy.	Poprawnie włączyć diodę.
D7	Błędnie włączona dioda, która powinna być połączona z zaciskiem masowym.	Poprawnie włączyć ową diodę.
D8	Zwarcie uzwojenia stojana z masą.	Wymienić uzwojenie.
	Zwarcie środka gwiazdy stojana z masą.	Wymienić wirnik.

Na podstawie tabel sygnałów i defektów w następnym rozdziale przedstawiono opracowany typ i strukturę wielowarstwowego perceptronu niezbędnego do rozwiązywania problemu komputerowego diagnozowania defektów alternatora.

3. STRUKTURA I DANE UCZĄCE WIELOWARSTWOWEGO PERCEPTRONU

Na rys. 3.1 przedstawiono strukturę opracowanej sztucznej sieci neuronowej do diagnozowania defektów alternatora z uwzględnieniem tabel 2.1 i 2.2.



Rys.3.1. Struktura sieci diagnostycznej.

Na wejścia sieci zostaną wprowadzone wartości czterech parametrów z tabeli 4.1. Sieć posiadać będzie dziewięć wyjść: D1 ÷ D8 i P. Wyjścia D1÷D8 będą wyprowadzać informację, czy wystąpił któryś z ośmiu defektów. Wyjście P zaś informację o poprawnej pracy alternatora. Wszystkie wyjścia będą zero-jedynkowe a funkcję aktywacji dla neuronów wybrano typu sigmoidalnego bipolarnego.

W końcowym rozdziale przedstawiono wyniki symulacji komputerowej opisanej wyżej sztucznej sieci neuronowej do diagnozowania alternatora na podstawie przedstawionych w tabeli 4.1 sygnałów uczących.

4. WYNIKI SYMULACJI KOMPUTEROWEJ

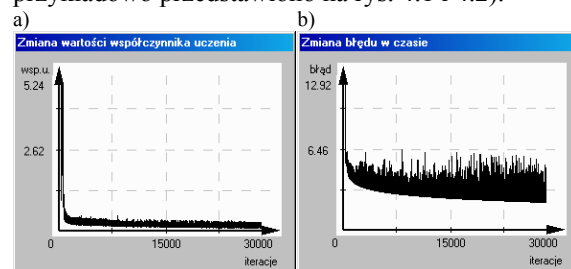
Próbki uczące i testowe są generowane losowo. Po pewnej obróbce przykłady tych ostatecznych zestawów próbek uczących przedstawiono w tabeli 4.1¹.

Tabela 4.1.

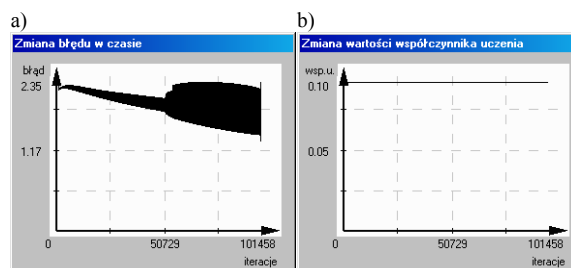
Próbki uczące dla alternatora.													
Lp	L1	L3	L2	L4	P	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
1	1,342	1,342	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1,320	1,320	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1,276	1,276	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1,286	1,286	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1,320	1,320	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1,274	1,274	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1,345	1,345	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1,278	1,278	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
...													
50	1,301	1,354	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
51	1,291	1,317	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
52	1,196	1,322	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
53	1,280	1,348	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
54	1,256	1,321	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
55	1,213	1,363	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
56	1,262	1,337	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
57	1,326	1,180	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0

58	1,345	1,337	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
59	1,381	1,260	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
60	1,316	1,293	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
61	1,396	1,258	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
62	1,348	1,267	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
63	1,343	1,256	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
64	1,394	1,255	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
65	1,303	1,216	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
66	1,386	1,265	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
67	1,301	1,244	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
68	1,385	1,288	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
69	1,310	1,271	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
70	1,288	1,207	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
71	1,404	1,270	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
72	1,273	1,225	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
73	1,317	1,324	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
74	1,344	1,323	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
75	1,319	1,313	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
76	1,322	1,313	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Struktura sieci została wybrana dwuwarstwową (rys. 2.1, 5-11-4) z sigmoidalną bipolarną funkcją aktywacji neuronów. Dla uczenia stosowano pewną adaptacyjną wersję (ze stałym i zmiennym krokiem) algorytmu wstecznej propagacji (proces uczenia przykładowo przedstawiono na rys. 4.1 i 4.2).



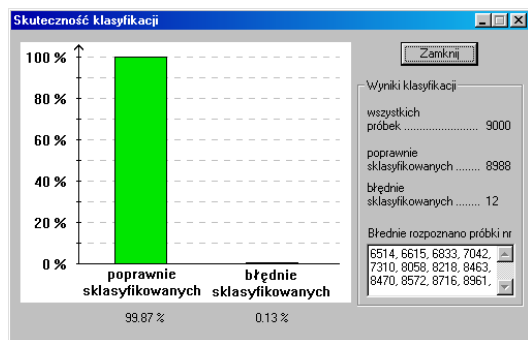
Rys. 4.1. a) i b) przedstawiają przebieg uczenia sieci algorytmem z krokiem dobieranym adaptacyjnie.



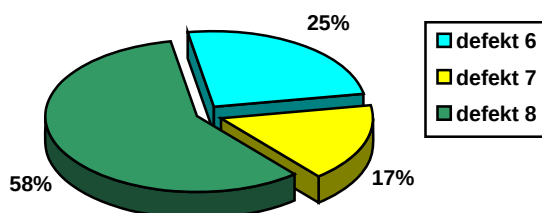
Rys. 4.2. a) i b) przedstawiają przebieg uczenia sieci algorytmem ze stałym krokiem.

Dla statystycznej analizy diagnozowania generowano po 100 próbek testowych, wyniki które przedstawiono na rys. 4.3 i 4.4.

¹ Niektóre symulacje komputerowe przeprowadzili dyplomanci prof. A. Jastriebowa – A. Kaczmarek i B. Piwowar.



Rys. 4.3. Skuteczność klasyfikacji dla alternatora.



Rys. 4.4. Rozkład błędnie rozpoznanych próbek spośród danych testowych dla alternatora.

5. WNIOSKI

Z przedstawionych wyników statystycznej komputerowej symulacji wynikają następujące wnioski:

- skuteczność diagnozowania wyniosła 99,87% (rys. 4.3);
- występują przy tym kombinacje defektów.

Opisane wyniki symulacji komputerowej potwierdzają tezę, że w diagnostyce komputerowej układów elektrycznych wyposażenia samochodowego ważną rolę odgrywa wstępna analiza możliwych reakcji systemu na pewne sygnały symptomowe, które opisują nieliniowe zależności wejść i wyjść układu. To zjawisko jest podstawą zastosowania sztucznych sieci neuronowych do rozdzielenia możliwych defektów obiektu [7].

6. LITERATURA

- [1] Gad S., Yastrebov A., Kułakowski A., One-direction multi-layer perceptrons in the diagnosis of ignition system of a car. Abstracts of II International Congress of Technical Diagnostics "Diagnostics 2000", Warsaw, Poland 2000, V. 2, pp. 113-114.
- [2] Gad S., Słoń G., Yastrebov A., Computer diagnosis and identification of selected systems of electrical equipment of cars. Proc. of XIV International Conference On Systems Science, SYSTEMS SCIENCE XIV, Wrocław, Poland, 2001, pp. 150-157.
- [3] Jastriebow A., Gad S., Słoń G., Komputerowa diagnostyka elektrycznego wyposażenia pojazdów samochodowych. Materiały IX Krajowego

Kongresu Eksploatacji Urządzeń Technicznych, Krynica Górská, 2001, s. 203-214.

- [4] Czyżowski Jacek, Podsiadło Jerzy, Trajdos Henryk: „Wybrane zagadnienia z diagnostyki samochodowej”; Politechnika Śląska, Gliwice 1987r.
- [5] Kowalski B. (red) - „Badania i diagnostyka samochodowych urządzeń elektrycznych”; WKŁ, Warszawa 1981r.
- [6] Korbicz Józef, Obuchowicz Andrzej, Uciński Dariusz: „Sztuczne sieci neuronowe: podstawy i zastosowania”; Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1994r.
- [7] Gad S., Słoń G., Jastriebow A.: „Analiza komputerowa diagnozowania defektów akumulatora za pośrednictwem sztucznych sieci neuronowych”; VII Konferencja Naukowo – Techniczna ZASTOSOWANIA KOMPUTERÓW W ELEKTROTECHNICE ZKwE'2002, Poznań/Kiekrz 22-24 kwietnia 2002, s. 671-674.



Prof. dr hab. inż. Aleksander Jastriebow jest profesorem nadzwyczajnym w Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach. Jest specjalistą w dziedzinie matematyki i informatyki stosowanej. Opublikował ponad 150 prac naukowych z zakresu automatyki, identyfikacji, diagnostyki oraz sztucznej inteligencji. Jest autorem lub współautorem 3 monografii oraz kilku skryptów i materiałów pomocniczych.



Dr hab. inż. Stanisław Gad jest pracownikiem naukowym Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Jest członkiem Sekcji Podstaw Eksploatacji KBM Polskiej Akademii Nauk. Zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia diagnostyki urządzeń pojazdowych oraz elektrotechniki i elektroniki pojazdów samochodowych. Ma w swoim dorobku 80 publikacji naukowych, w tym monografię i skrypt, oraz wiele dydaktycznych materiałów pomocniczych.



Dr inż. Grzegorz Słoń jest adiunktem w Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach. Zajmuje się elektrotechniką teoretyczną, informatyką stosowaną, elektrotechniką i elektroniką pojazdową. Jest autorem i współautorem ponad 20 prac naukowych opublikowanych i przedstawionych na konferencjach naukowych krajowych i międzynarodowych.

METODY OCENY STANU TECHNICZNEGO UKŁADU COMMON RAIL Z WYKORZYSTANIEM SYSTEMÓW KOMPUTEROWYCH

Cezary BOCHEŃSKI
Remigiusz MRUK

SGGW, Wydział Inżynierii Produkcji, Katedra Organizacji i Inżynierii Produkcji
Warszawa ul. Nowoursynowska 166, tel. (22) 847 87 16, email mrुक@alpha.sggw.waw.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę procesów diagnostyki technicznej w czasie pracy silnika z zapłonem samoczynnym. Przedstawiono rozwiązanie stanowiska badawczego wraz z oprogramowaniem sterującym pozwalającym na przeprowadzenie badań procesów diagnostycznych oraz przedstawiono wyniki badań opracowanych algorytmów diagnostycznych dla układu wtryskowego typu Common Rail.

Słowa kluczowe: diagnostyka, silnik, Common Rail, systemy wtrysku, sieci neuronowe

DIAGNOSTIC PROCESSES OF COMMON RAIL UNIT BASED ON COMPUTER SYSTEMS

Summary

The paper presented problems of diagnostic processes within function of self-ignition engine. There is presented a measuring stand of together with a controlling software enabling to research the diagnostic processes and result of investigation elaborate diagnostic algorithms of Common Rail injection system.

Key words: diagnostic, self-ignition engine, Common Rail, injection systems, neural networks

1. WSTĘP

Silnik z zapłonem samoczynnym (ZS) jest podstawowym źródłem napędu pojazdów w transporcie ciężkim, rolnictwie a także w znacznej części pojazdów dostawczych i osobowych. Silnik ten posiada wysoką sprawność ogólną, dużą trwałość i niezawodność oraz mniejszą emisję niektórych związków toksycznych.

W nowo produkowanych silnikach z zapłonem samoczynnym stosowany jest coraz częściej elektronicznie sterowany system doprowadzania paliwa typu Common Rail [1]. Zastosowane rozwiązania konstrukcyjne oraz technologiczne pozwalają na poprawienie wielu parametrów silnika w stosunku do klasycznych rozwiązań.

W dostępnej literaturze nie znaleziono do tej pory informacji o badaniach umożliwiających śledzenie zmian stanu technicznego w czasie pracy układu wtryskowego Common Rail, zagrożeniach spowodowanych uszkodzeniami elementów składowych i procesami zużyciowymi.

Nowoczesny, elektronicznie sterowany system wtrysku wymaga innej metodyki diagnozowania w porównaniu z układami klasycznymi. Związane jest to nie tylko z zastosowaniem odmiennej konstrukcji, ale także z wprowadzeniem elektronicznych układów sterujących i ze specyfiki procesu wtrysku paliwa. Niezbędne jest podjęcie

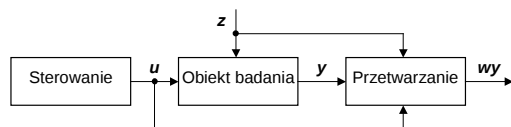
badań w zakresie diagnozowania i obsługi technicznej przedstawionego układu wtryskowego.

W artykule przedstawiono rozwiązania umożliwiające zastosowanie parametrów eksploatacyjnych związanych z zachodzącymi procesami głównymi w układzie Common Rail w ocenie stanu technicznego badanego układu na podstawie metod diagnostycznych z wykorzystaniem systemów komputerowych.

2. METODYKA BADAŃ

W ustalaniu relacji między stanem technicznym diagnozowanego obiektu a sygnałami diagnostycznymi w badaniach zastosowano teorię eksperymentu czynnego, którego ogólny schemat dla potrzeb zagadnień diagnostycznych przedstawiono na rysunku 1.

Warunki eksperymentu czynnego umożliwiają kontrolę zmian wartości w zbiorze wymuszeń sterujących w bardzo szerokich granicach często trudnych do zrealizowania w rzeczywistości lub niemożliwych do osiągnięcia, pozwalając na kompleksowe badania i uzyskanie jak największej ilości informacji o zachowaniu się obiektu a także na kontrolowane zmiany parametrów stanu badanego układu. Do realizacji tego sposobu przeprowadzania badań niezbędne było opracowanie oraz budowa laboratoryjnego stanowiska badawczego.



Rys. 1. Schemat ogólny stanowiska badawczego umożliwiającego przeprowadzenie eksperymentu czynnego: u - sygnały wymuszeń sterujących, z - wymuszenia zewnętrzne oraz zakłócenia, y - sygnały wyjściowe, wy - wyniki eksperymentu

Stanowisko badawcze pozwala na symulację pracy układu paliwowego dla przyjętych parametrów charakterystyki silnika. Umożliwia zmianę dwufazowego wtrysku paliwa, z możliwością regulacji przedziałów czasowych. Stanowisko umożliwia również zmianę prędkości obrotowej pompy wysokiego ciśnienia, pomiar masy paliwa, temperaturę czynnika oraz ciśnienie.

Koncepcja budowy stanowiska badawczego została oparta na zastosowaniu układu wtryskowego typu Common Rail stosowany w silniku wysokoprężnym OM611 produkowanego przez Daimler-Chrysler, z którego zostały wykorzystane następujące elementy:

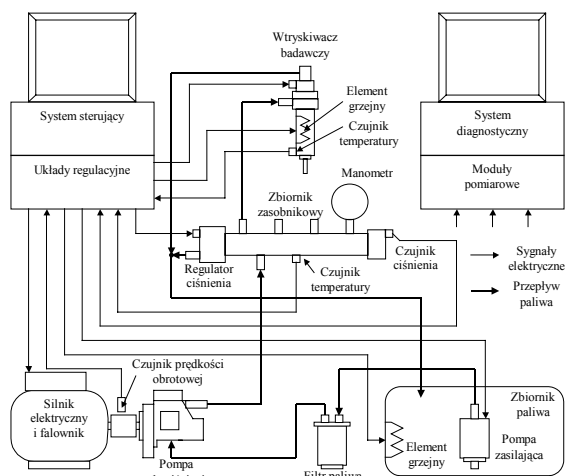
- Pompa zasilająca, której zadaniem jest dostarczenie paliwa pod ciśnieniem około 0,3 MPa;
- Filtr paliwa wykorzystywany do dokładnego oczyszczania paliwa;
- Pompa wysokociśnieniowa umożliwia tłoczenie paliwa pod ciśnieniem około 135 MPa;
- Zbiornik zasobnikowy;
- Czujnik ciśnienia paliwa w układzie Common Rail;
- Regulator ciśnienia umożliwia utrzymanie wymaganej wartości ciśnienia;
- Wtryskiwacz.

W opracowanym stanowisku, którego schemat przedstawiono na rysunku 2 do sterowania procesem wtrysku paliwa wykorzystano komputer klasy PC, oraz wykonano niezbędne układy peryferyjne umożliwiające współpracę z elementami składowymi układu wtrysku paliwa, które charakteryzują się podstawowymi parametrami:

- Sterownik silnika elektrycznego do napędu pompy wysokociśnieniowej;
- Sterownik regulatora ciśnienia paliwa w układzie Common Rail;
- Sterownik wtryskiwacza;
- Sterownik układu regulacji.

W stanowisku badawczym do komunikacji oprogramowania z układami sterującymi zostały wykorzystane uniwersalne karty analogowo-cyfrowe firmy NATIONAL INSTRUMENTS typu PCI6024 i DIO96. Oprogramowanie sterujące zostało utworzone w środowisku Windows 95/98 z wykorzystaniem pakietu C++Builder firmy

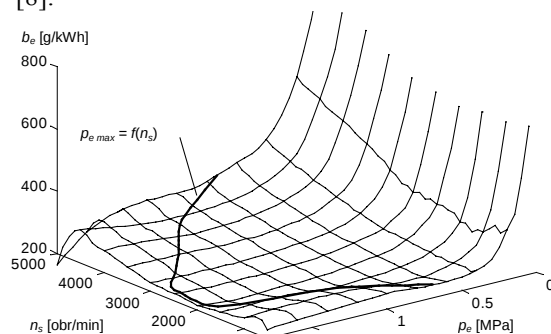
BORLAND oraz pakietu MATLAB firmy MATHWORKS, które umożliwia sterowanie podstawowymi procesami roboczymi układu.



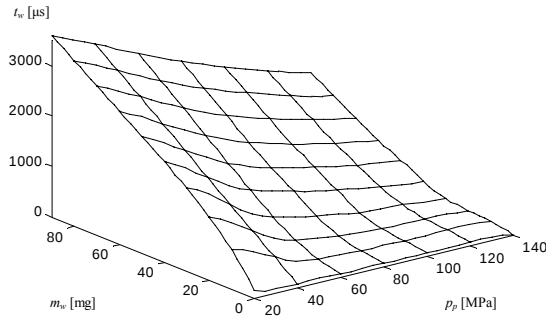
Rys. 2. Schemat ogólny opracowanego stanowiska badawczego systemu wtrysku paliwa typu Common Rail

Sterowanie poszczególnymi elementami wykonawczymi stanowiska pomiarowego zrealizowane zostało poprzez opracowanie we własnym zakresie dodatkowych modułów. W przypadku sterowania prędkością obrotową pompy wysokiego ciśnienia zostało zaproponowane rozwiązanie komunikacji między komputerem sterującym a falownikiem (HITACHI) za pomocą magistrali szeregowej typu RS485.

W opracowaniu części algorytmu symulacyjnego odpowiadającego za uzyskanie wymuszeń sterujących zostały wykorzystane dane techniczne silnika turbodoładowanego z zapłonem samoczynnym typu OM611, zastosowanego w pojazdach dostawczych, oraz jako bazowa jednostka do napędu pojazdów i maszyn rolniczych, produkowanego przez Daimler-Chrysler (rysunek 3) [8]:



Kluczowym elementem umożliwiającym poprawną pracę stanowiska badawczego jest elektronicznie sterowany wtryskiwacz, dzięki któremu można uzyskać dawkę paliwa w czasie jednego wtrysku na pracującym stanowisku badawczym zgodną z rzeczywistym układem.



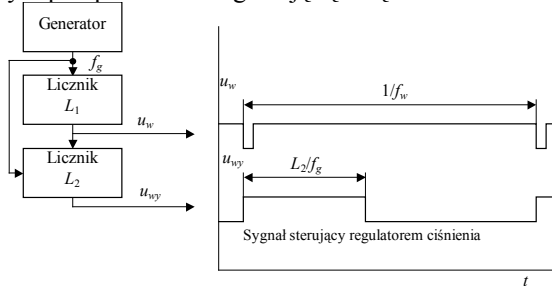
Rys. 4. Uzyskany kształt powierzchni charakterystyki wydatku masy paliwa dla jednego wtrysku z wtryskiwacza

W tym celu przeprowadzono pomiar charakterystyki wydajności masowej wtryskiwacza m_w dla paliw o różnych współczynnikach lepkości dynamicznej η_p oraz na podstawie wyników badawczych z uwzględnieniem metod aproksymacji wielomianowej opracowano model pracy wtryskiwacza w badanym układzie, którego przebieg przedstawiony jest na rysunku 4.

Do regulacji ciśnienia w układzie wtryskowym został wykorzystany regulator ciśnienia firmy BOSCH zintegrowany z akumulatorem hydraulicznym oraz opracowany moduł wykonawczy (rysunek 5).

Do wyzwalania regulatora ciśnienia zabudowanego w układzie wtryskowym układ wykonawczy wykorzystuje metodę impulsową typu PWM stosowaną także w oryginalnym rozwiązaniu systemu sterującego.

Układ sterujący regulatora ciśnienia został opracowany i wykonany we własnym zakresie. W rozwiązaniu tym zastosowano jako elementy bezpośrednio sterujące prądem płynącym w cewce regulatora ciśnienia tranzystory typu MOSFET, charakteryzujące się bardzo małymi rezystancjami w chwili załączenia i dużymi szybkościami pracy. Układ został skonstruowany tak, aby oprócz wsparcia sprzętowego dla regulacji typu PWM przeprowadzanej przez system komputerowy można było przeprowadzić regulację ręczną.



Rys. 5. Schemat blokowy układu generującego sygnał sterujący zaworem regulacji ciśnienia oraz sygnały generowane w czasie pracy

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. Metoda komputerowej oceny stopnia zużycia układu wtryskowego

W czasie eksploatacji układu wtryskowego następuje ciągły proces zużywania się powierzchni roboczych elementów precyzyjnych. W przypadku osiągnięcia zużycia granicznego nieszczelności te mogą uniemożliwić uzyskanie wymaganego ciśnienia paliwa, niezbędnego do przeprowadzenia procesu wtrysku.

W metodzie oceniającej stopień zużycia powierzchni roboczych elementów precyzyjnych układu Common Rail wykorzystano przeprowadzone pomiary spadku ciśnienia przy zmianach wartości temperatury paliw odpowiednio $T_p = 40, 60, 80$ °C oraz przy początkowym ciśnieniu panującym w układzie $p_{p0} = 100, 135$ MPa.

W opracowaniu algorytmu metody diagnostycznej oceny szczelności układu wtryskowego wykorzystano różne techniki analizy danych oparte na:

- modelu matematycznym przebiegu spadku ciśnienia;
- sieci neuronowej o cechach aproksymujących;
- sieci neuronowej o cechach klasyfikujących.

W przypadku opracowania modelu matematycznego uwzględniono zależność (1), na podstawie równania Naviera-Stokesa [2], [3]:

$$M_p = -\frac{\rho_p p_p h_z^3 b_z}{12 \eta_p l_z} \quad (1)$$

W tym przypadku założono, że dominującym czynnikiem wpływającym na ilość zgromadzonego paliwa (pojemność hydrauliczna) jest ściśliwość paliwa (2) [10]:

$$M_p = \frac{\rho_p V_p}{B_p} \frac{dp_p}{dt} \quad (2)$$

Na podstawie analizy literatury uwzględniono w modelu matematycznym opisującym przebieg zmian ciśnienia wpływ lepkości dynamicznej oraz temperatury. Ostatecznie uwzględniając wpływ rozpatrywanych powyżej zmiennych niezależnych uzyskano model matematyczny opisujący przebieg zmian ciśnienia w badanym układzie (3):

$$w_p = \exp\left(\frac{-A_1 \exp(-A_2 t)}{T_p - A_3 (A_4 \eta_p + 1)}\right) \quad (3)$$

Na podstawie metody aproksymacji najmniejszych kwadratów uzyskano postać równania dopasowanie modelu do danych pomiarowych charakteryzujące się współczynnikiem $R^2 = 0,98$ oraz wartością $\delta \bar{w}_p = 0,028$.

Do budowy drugiego wariantu metody diagnostycznej układu wtryskowego wykorzystano jednokierunkową, wielowarstwową sieć neuronową o właściwościach aproksymacyjnych [7], [4], posiadającą funkcję aktywacji opisane równaniami (4) (5):

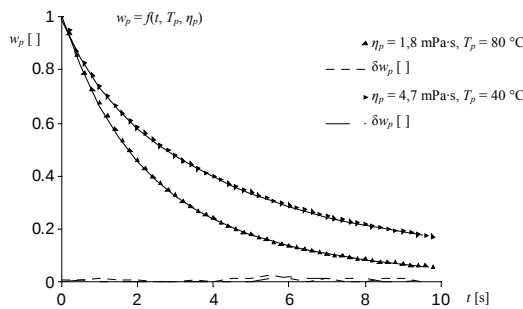
$$f_1(x) = \frac{2}{1 + \exp\left(-2 \sum_{i=1}^n w_i x_i + b\right)} - 1 \quad (4)$$

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^n v_i x_i + b \quad (5)$$

Do procesu uzyskania modelu zmian ciśnienia w badanym układzie zastosowano sieć neuronową o trzech wejściach, na które podany został wektor x (6) zawierający rozpatrywane zmienne niezależne, oraz jednym wyjściu y (6), na którym uzyskujemy sygnał modelowanego przebiegu względnego ciśnienia w_p :

$$x = [t, T_p, \eta_p], \quad y = [w_p] \quad (6)$$

W procesie uczenia zastosowano algorytm wstecznej propagacji błędów typu Levenberg Marquardt [5], [6].



Rys. 6. Wyniki dopasowania modelu z wykorzystaniem wybranej sieci neuronowej do wybranych danych z pomiarów spadku ciśnienia w rurze akumulacyjnej

Na podstawie uzyskanych wyników z procesu uczenia, do dalszych etapów budowy metody diagnostycznej została wybrana sieć zawierająca trzy neurony w warstwie ukrytej oraz jeden neuron w warstwie wyjściowej, która charakteryzowała się uzyskaniem minimalnej wartości $\delta w_p = 0,015$ po procesie uczenia. Jakość aproksymacji potwierdza także rysunek 6, na którym zostały przedstawione wartości uzyskane z wybranych pomiarów w postaci znaczników oraz linie przebiegu względnego ciśnienia uzyskane z wykorzystaniem nauczonej sieci neuronowej.

Dla uzyskania właściwości klasyfikujących w sieci zostały zastosowane we wszystkich warstwach funkcje aktywacji w postaci zależności (7) [9]:

$$f_1(x), f_2(x), f_3(x) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\sum_{i=1}^n w_i x_i + b\right)} \quad (7)$$

Zastosowana sieć neuronowa posiadała trzy wejścia, na które podany został wektor x (8) zawierający rozpatrywane zmienne niezależne oraz dodatkowo chwilową wartość względnego ciśnienia w_p . Pojedynczy wektor wyjściowy y zawiera sygnał klasyfikujący k , który uzyskuje wartość 1 gdy parametry wejściowe należą do zbioru S (9) charakteryzującego stan zużycia poniżej wielkości granicznej (stan sprawności technicznej),

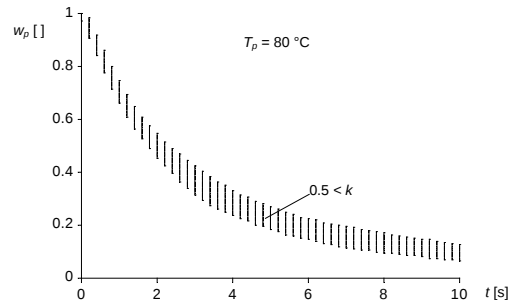
w przeciwnym przypadku na wyjściu uzyskujemy wartość 0:

$$x = [t, T_p, w_p] \quad (8)$$

$$y = [k], \quad k = \begin{cases} 1 & \text{dla } x \in S \\ 0 & \text{dla } x \notin S \end{cases} \quad (9)$$

Dla rozpatrywanych sieci zastosowano w czasie procesu uczenia algorytm wstecznej propagacji błędów typu Levenberg Marquardt. Wartość średniego błędu kwadratowego Δk^2 została przyjęta jako kryterium stopnia nauczania się sieci.

Na podstawie uzyskanych wartości Δk^2 z procesu uczenia do budowy metody diagnostycznej została wybrana sieć zawierająca dziesięć neuronów w dwóch warstwach ukrytych oraz jeden neuron w warstwie wyjściowej.



Rys. 7. Przykładowy obszar wygenerowany przez nauczoną sieć neuronową, w którym dane pomiarowe klasyfikowane są jako stan sprawności technicznej (powierzchnia zakreskowana)

3.2. Metoda komputerowej oceny poprawności procesu wtryskowego

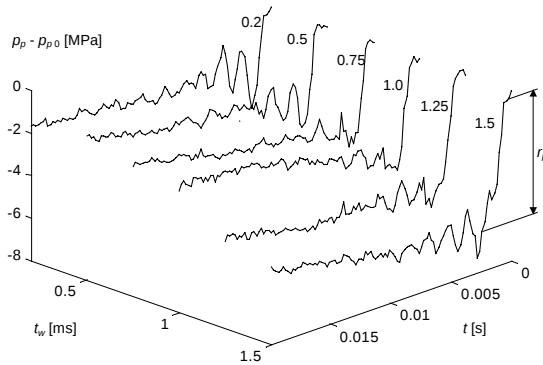
Elementami kluczowymi, od których zależy proces rozpylenia paliwa są wtryskiwacze elektromagnetyczne. W czasie eksploatacji w miarę zużywania się powierzchni par precyzyjnych następują niekorzystne zmiany parametrów funkcjonalnych, które prowadzą do pogorszenia się jakości procesu wtrysku paliwa.

Zastosowanie metody umożliwiającej ciągłą ocenę poprawności procesu wtryskowego pozwala na uniknięcie wielu zagrożeń eksploatacyjnych.

W procesie opracowania algorytmu metody oceny poprawności procesu wtryskowego wykorzystano różne techniki analizy danych oparte na:

- sieci neuronowej o cechach aproksymujących;
- sieci neuronowej o cechach klasyfikujących.

Rejestracja chwilowej wartości ciśnienia paliwa w układzie wtryskowym oraz ich analiza pozwoliła na uzyskanie informacji o zmianach tego parametru w czasie trwania wtrysku. Rysunek 8 przedstawia przykładowe przebiegi uzyskane w czasie badań w postaci różnicy ciśnienia chwilowego i ciśnienia początkowego uzyskanego bezpośrednio przed otwarciem wtryskiwacza $p_p - p_{p0}$.

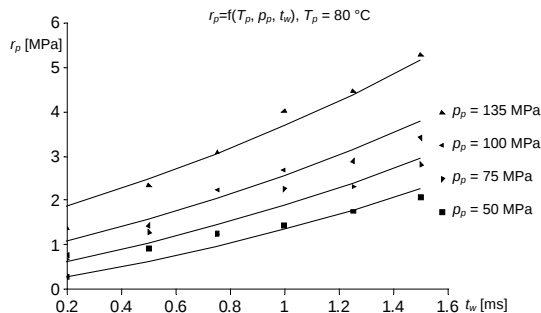


Rys. 8. Przebiegi pulsacji ciśnienia w układzie Common Rail w czasie procesu wtrysku

Do budowy pierwszego wariantu metody oceny poprawności procesu wtryskowego wykorzystano jednokierunkową, wielowarstwową sieć neuronową o właściwościach aproksymacyjnych z algorytmem uczenia typu wstecznej propagacji błędów Levenberg Marquardt. Sieć w tym zastosowaniu posiada trzy wejścia, na które podany został wektor x określony przez zależność (10) dwa neurony w warstwie ukrytej oraz jeden sygnał wyjściowy y :

$$x = [r_p, \bar{p}_p, t_w], \quad y = [r_p] \quad (10)$$

Po procesie uczenia uzyskano wartość $\delta r_p = 0,115$ pozwalającą na zastosowanie jej w metodzie diagnostycznej. Jakość aproksymacji potwierdza także rysunek 9, na którym zostały przedstawione wartości uzyskane z wybranych pomiarów oraz linie przebiegu zmian r_p ciśnienia uzyskane z wykorzystaniem nauczonej sieci neuronowej.



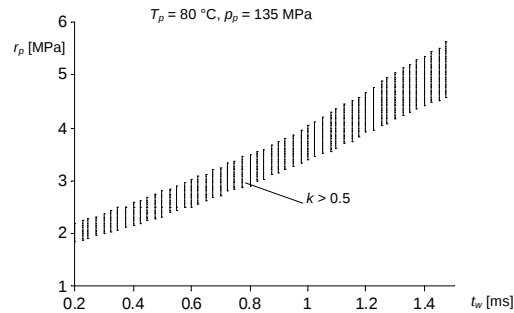
Rys. 9. Wyniki dopasowania modelu z wykorzystaniem wybranej nauczonej sieci neuronowej

W drugim rozwiązaniu algorytmu metody diagnostycznej wykorzystano jednokierunkową, wielowarstwową sieć neuronową o właściwościach klasyfikujących z algorytmem uczenia typu wstecznej propagacji błędów Levenberg-Marquardt, posiadającą cztery wejścia, na które podany został wektor x oraz jedno wyjście y (11):

$$x = [r_p, p_p, t_w, r_p], \quad y = [k] \quad (11)$$

Na podstawie uzyskanych wartości $\Delta \bar{k}^2$ z procesu uczenia do budowy metody diagnostycznej została wybrana sieć zawierająca trzy neurony w dwóch warstwach ukrytych oraz jeden neuron w warstwie wyjściowej, której obszar klasyfikacji danych odpowiadających

prawidłowemu funkcjonowaniu procesu regulacji ciśnienia przedstawia rysunek 10.



Rys. 10. Obszar wygenerowany przez nauczoną sieć neuronową stanu sprawności technicznej (powierzchnia zakreskowana)

3.2. Badanie oraz analiza właściwości opracowanych rozwiązań metod oceny stanu technicznego

Badania metod oceny stanu technicznego wybranych elementów układu wtryskowego Common Rail polegały na określeniu szybkości pracy ich postaci aplikacyjnych. Do pomiaru wszystkich rozwiązań został użyty niezależny system komputerowy PC charakteryzujący się następującymi podstawowymi cechami:

- Typ procesora, częstotliwość taktowania Pentium III, 800 MHz;
- Ilość pamięci, częstotliwość taktowania 128 MB, 133 MHz.

Tab. 1. Zestawienie badanych właściwości użytkowych opracowanych rozwiązań metody oceny stopnia zużycia układu wtryskowego

Model matematyczny	Sieć neuronowa aproksymacyjna	Sieć neuronowa klasyfikująca
Proces uczenia		
Liczba punktów pomiarowych []	600	1512
Liczba powtórzeń []	1	500
Całkowity czas uczenia [s]	0,099	669
Operacje zmiennie-przecinkowe []	$0,768 \cdot 10^6$	$43,4 \cdot 10^9$
Proces eksploatacji		
Liczba punktów pomiarowych []	100	100
Czas obliczeń [ms]	0,266	2,10
Operacje zmiennie-przecinkowe []	$1,10 \cdot 10^3$	$17,2 \cdot 10^3$

Sieci neuronowe klasyfikujące wymagają w procesie uczenia zastosowania zbioru o bardzo dużej liczbie danych w porównaniu z innymi rozwiązaniami (tabela 1 i 2 proces uczenia). Porównanie czasów dla procesu uczenia

(przygotowania rozwiązań metod) poszczególnych rozwiązań pozwala sądzić, że wykorzystanie sieci aproksymacyjnych jest rozwiązaniem najbardziej efektywnym (krótkie czasy uczenia, prosta metoda przygotowywania danych uczących).

Natomiast, jeśli przyjrzymy się wynikom uzyskanym w procesie eksploatacji, to zdecydowanie rozwiązania oparte na modelach matematycznych są najszybsze (tabela 1 i 2 proces eksploatacji). Pozwala to wykorzystać je wszędzie tam, gdzie niezbędny jest bardzo krótki czas reakcji systemu diagnostycznego na symptomy nieprawidłowej pracy. Jednak w przypadku bardzo skomplikowanych zależności między parametrami diagnostycznymi a stanem technicznym powinniśmy wykorzystać sieci neuronowe.

Tab. 2. Zestawienie badanych właściwości użytkowych opracowanych rozwiązań metody oceny poprawności procesu wtryskowego

	Sieć neuronowa aproksymacyjna	Sieć neuronowa klasyfikująca
	Proces uczenia	
Liczba punktów pomiarowych []	72	1764
Liczba powtórzeń []	100	500
Całkowity czas uczenia [s]	1,65	72,6
Operacje zmiennoprzecinkowe []	$3,04 \cdot 10^6$	$2,00 \cdot 10^9$
	Proces eksploatacji	
Liczba punktów pomiarowych []	1	1
Czas obliczeń [ms]	0,130	0,153
Operacje zmiennoprzecinkowe []	290	458

4. WNIOSKI

Uzyskane wyniki badań podczas symulacji na stanowisku badawczym pracy układu Common Rail potwierdziły słuszność opracowanej koncepcji budowy stanowiska badawczego oraz rozwiązań konstrukcyjnych układów sterujących poszczególnymi elementami układu wtryskowego.

Zastosowanie systemu komputerowego oraz wymienionego oprogramowania pozwoliło na uzyskanie dużej szybkości działania procesów regulacyjnych, które pozwoliły na symulację pracy układu w czasie rzeczywistym (czasy pomiędzy poszczególnymi stanami układu wtryskowego odpowiadają warunkom rzeczywistym).

Opracowane algorytmy metod diagnostycznych na podstawie przedstawionych metod oceny stanu technicznego charakteryzują się dużą szybkością działania, pozwalając na zastosowanie ich w systemach zabudowanych na pracujących maszynach.

Zastosowane urządzenia pomiarowe oraz sterujące wraz z układami wykonanymi we własnym zakresie mogą być podstawą do budowy stanowisk badawczych innych urządzeń wykorzystywanych we współczesnych maszynach rolniczych i pojazdach.

5. LITERATURA

- [1] Bosch 2000: Diesel-Speichereinspritzsystem Common Rail. Robert Bosch GmbH, Stuttgart.
- [2] Burka E., Nałęcz T. 1999: Mechanika płynów w przykładach. PWN, Warszawa.
- [3] Gryboś R. 1998: Podstawy mechaniki płynów. PWN, Warszawa.4
- [4] Korbicz J., Obuchowski A., Uciński D. 1994: Sieci neuronowe podstawy i zastosowania. PLJ, Warszawa.
- [5] Osowski S. 1994: Sieci neuronowe. Politechnika Warszawska, Warszawa.
- [6] Osowski S. 1996: Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym. WNT, Warszawa.
- [7] Osowski S. 2000: Sieci neuronowe do przetwarzania informacji. Politechnika Warszawska, Warszawa.
- [8] Peters A., Pütz W. 1997: Der neue Vierzylinder-Dieselmotor OM611 mit Common-Rail-Einspritzung. MTZ 58 nr 12, s. 760-767.
- [9] Tadeusiewicz R. 1998: Elementarne wprowadzenie do techniki sieci neuronowych z przykładowymi programami. PLJ, Warszawa.
- [10] Tarnowski W., Bartkiewicz S. 1998: Modelowanie matematyczne i symulacja komputerowa dynamicznych procesów ciągłych. FENIKS, Koszalin.



prof. dr hab. Cezary Bocheński
Szkoła Główna Gospodarstwa
Wiejskiego
Wydział Inżynierii Produkcji
Kierownik Zakładu
Infrastruktury Technicznej



mgr inż. Remigiusz. Mruk
Szkoła Główna Gospodarstwa
Wiejskiego
Wydział Inżynierii Produkcji
Pracownik Zakładu
Infrastruktury Technicznej

BADANIA PRZYROSTU TEMPERATUR SPALIN W TRÓJFUNKCYJNYM REAKTORZE KATALITYCZNYM NA POTRZEBY OBD II

Andrzej AMBROZIK, Stanisław W. KRUCZYŃSKI,
Jacek ŁĄCZYŃSKI, Dariusz TOMASZEWSKI

Instytut Pojazdów Politechniki Warszawskiej
02-524 Warszawa, ul. Narbutta 84
fax. (0-22) 8490303
e-mail: skruczyn@simr.pw.edu.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono wstępne wyniki badań diagnozowania reaktora katalitycznego oparte o przyrost temperatury spalin. Podano warunki badań oraz zdefiniowano sygnał diagnostyczny. Przedstawiono zależności konwersji CO, HC i NO_x od aktywności reaktora katalitycznego. Wykresami zilustrowano wyniki pomiarów sygnału diagnostycznego w zależności od aktywności reaktora katalitycznego oraz w zależności od konwersji CO, HC i NO_x. Pracę zakończono analizą wyników badań.

Słowa kluczowe: toksyczność spalin, reaktor katalityczny, diagnostyka pokładowa

RESEARCH OF THE EXHAUST TEMPERATURE INCREASE IN THREE - WAY CATALYTIC CONVERTER FOR OBD II NEEDS

Summary

The aim of this paper is to present the results of the catalytic reactor diagnosis, basis on exhaust temperature increase in catalyst. In this paper research conditions are introduced and diagnostic signal is defined. The dependence of the conversion of exhaust components CO, HC, NO_x, on the catalytic converter activity is presented. The results of diagnostic signal measurement in the function of catalytic converter activity and in the function of exhaust components CO, HC, NO_x are illustrated. The paper is finished by analysis of the research results.

Key words: exhaust toxicity, catalytic converter, on-board diagnostics

1. WSTĘP

Metody diagnozowania trójfunkcyjnych reaktorów katalitycznych na potrzeby OBD podzielić można na trzy podstawowe grupy oparte o następujące pomiary [1]:

- temperatur (detekcja ilości wydzielonego ciepła),
- stężen tlenu (detekcja ubytku tlenu i utraty przestrzeni jego magazynowania),
- stężen wybranych składników spalin (bezpośrednia detekcja sprawności pracy reaktora).

Obecnie na potrzeby diagnostyki pokładowej rozwijane są dwie pierwsze metody, lub ich kombinacje. Zastosowanie metody bezpośredniej, opartej o pomiary stężen składników spalin ograniczane jest brakiem trwałych i niezawodnych detektorów możliwych do zastosowania w eksploatowanych pojazdach.

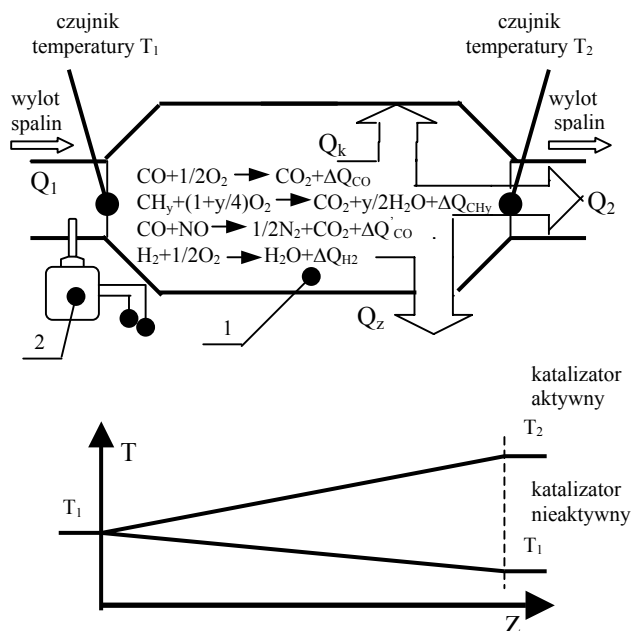
Celem pracy jest ocena możliwości diagnozowania trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego spalin w oparciu o wyniki pomiaru różnic temperatur spalin przed i za reaktorem

występujących przy ustalonych warunkach pracy badanego silnika spalinowego. Poprawność pracy trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego spalin oceniana jest na podstawie wartości konwersji tlenku węgla, węglowodorów i tlenków azotu.

Przyrost temperatury spalin w reaktorze katalitycznym wynika z egzotermicznych reakcji utleniania CO, HC i H₂. Przyrost ten może być monitorowany za pomocą czujników temperatury umieszczonych przed i za reaktorem katalitycznym, bądź czujników umieszczonych w samym monolicie reaktora.

Spadek różnicy temperatur spalin mierzonych przed i za reaktorem może być traktowany jako sygnał diagnostyczny reaktorów katalitycznych. Diagnostyka ta wymaga zastosowania dokładnego, trwałego i o małej bezwładności cieplnej czujnika temperatury pracującego w wysokich temperaturach i agresywnych chemicznie gazach spalinowych przez okres kilku lat eksploatacji pojazdu. W nieustalonych warunkach pracy silnika, wartości temperatury spalin i monolitu reaktora

katalitycznego ulegają ciągłej zmianie. Jeżeli pomiary temperatur dokonane by były podczas stanów nieustalonych, to efektem tego mogą być niedokładne wartości przyrostu temperatur. Wobec tego przyrost temperatury musi być próbkowany podczas ustalonych warunków pracy silnika po czasie niezbędnym dla ustabilizowania się temperatur przed i za reaktorem. Schemat reaktora i miejsca umieszczenia termopar w katalizatorze przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat reaktora katalitycznego przygotowanego do badań przyrostu temperatur spalin jako sygnału diagnostycznego

1 - reaktor katalityczny spalin, 2 - sonda sterująca składem mieszanki palnej; Q_1 - strumień ciepła spalin na wejściu do reaktora, Q_k - strumień ciepła ogrzewający złożę reaktora katalitycznego; Q_z - strumień ciepła oddawany przez reaktor katalityczny do otoczenia; Q_2 - strumień ciepła unoszony ze spalinami; ΔQ_{CO} , ΔQ_{CH_y} , ΔQ_{CO} , ΔQ_{H_2} - ilość ciepła wydzielona przez reakcje chemiczne zachodzące w reaktorze katalitycznym

2. STANOWISKO BADAWCZE

Badania eksperymentalne wykonano na stanowisku badawczym z silnikiem Rover 1.4 wyposażonym we wtryskowy układ zasilania z korekcją składu mieszanki za pomocą czujnika tlenu. W układzie wylotowym silnika zainstalowano trójfunkcyjny reaktor katalityczny Pt-Rh/ Al_2O_3 - CeO_2 o objętości monolitu dobranej do pojemności skokowej silnika. Badany reaktor katalityczny posiadał blok wykonany w postaci monolitu metalowego pokrytego nośnikiem γ - Al_2O_3 - CeO_2 z naniesionymi na nim krystalitami platyny i rodru w proporcji 5:1 i ilości 2.0 g/dm³ monolitu.

Reaktor katalityczny w celu symulacji procesu dezaktywacji pocięto na osiem segmentów o jednakowej długości ości. Symulacji dezaktywacji reaktora katalitycznego dokonywano poprzez wymianę segmentów aktywnych z przedniej części reaktora na segmenty nieaktywne. W ten sposób uzyskano różne poziomy aktywności reaktora A począwszy od aktywności $A = 100\%$ aż do aktywności $A = 0\%$ z krokiem równym 12.5%. Aktywność reaktora katalitycznego określono jako stosunek objętości segmentów aktywnych V_a do objętości całego katalizatora V_k .

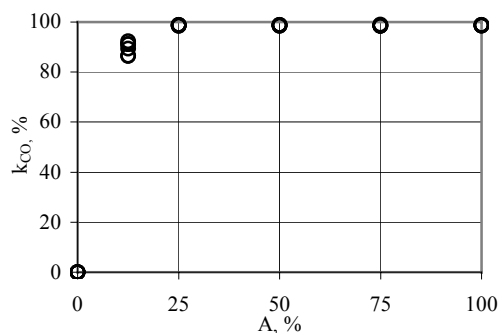
$$A = \frac{V_a}{V_k}$$

Różnicę temperatur spalin przed i za monolitem katalizatora traktowano jako sygnał diagnostyczny mierzony za pomocą termoelementów typu NiCr – NiAl umieszczonych w obudowie stalowej. W celu wyznaczenia stopnia konwersji CO, HC i NO_x próbki spalin pobierano z przed i z reaktora i kierowano do zestawu analizatorów spalin mierzających stężenia tlenu węglą metodą NDIR, węglowodorów metodą FID oraz tlenków azotu metodą CLD.

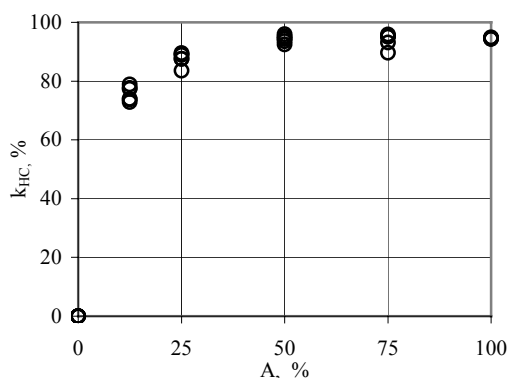
3. WYNIKI BADAŃ

Badania sygnałów diagnostycznych oraz pomiary konwersji składników spalin w reaktorze katalitycznym przy różnej jego aktywności wykonano przy prędkości obrotowej $n = 2000$ i 3000 obr/min i trzech różnych obciążeniach silnika $M_e = 36, 46, 56$ Nm odpowiadających różnym względnym objętościowym natężeniom przepływu spalin przez reaktor katalityczny SV zaczynając odpowiednio się od 22000 h^{-1} do 50000 h^{-1} . Badania przeprowadzono przy stałej temperaturze otoczenia.

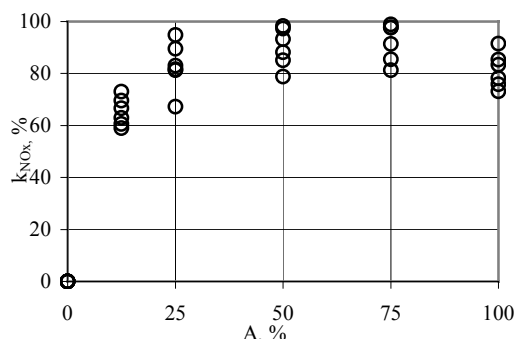
Wyniki badań przedstawiono kolejno na rysunkach 2, 3 i 4, które ilustrują zależności odpowiednich konwersji od aktywności reaktora katalitycznego.



Rys. 2. Zależność konwersji tlenku węgla k_{CO} od aktywności A reaktora katalitycznego przy różnych natężeniach przepływu spalin



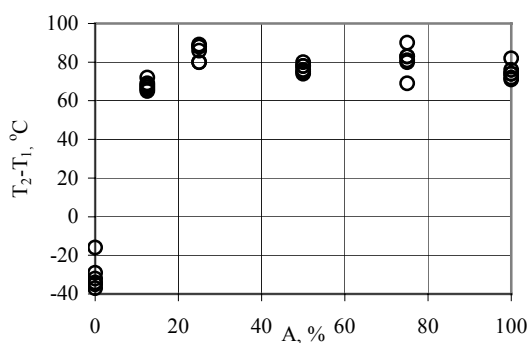
Rys. 3. Zależność konwersji węglowodorów k_{HC} od aktywności A reaktora katalitycznego przy różnych natężeniach przepływu spalin



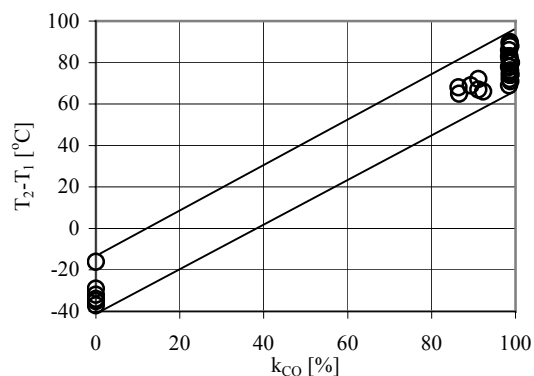
Rys. 4. Zależność konwersji tlenków azotu k_{NOx} od aktywności A reaktora katalitycznego przy różnych natężeniach przepływu spalin

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki pomiarów sygnału diagnostycznego $\Delta T = T_2 - T_1$ w funkcji aktywności reaktora. Sygnał diagnostyczny ΔT w tej pracy zdefiniowano jako zmianę temperatury spalin wewnątrz monolitu reaktora wynikającą z egzotermicznych reakcji utleniania tlenku węgla i węglowodorów oraz redukcji tlenków azotu (różnica temperatur spalin przed i za reaktorem katalitycznym mierzona w jego osi):

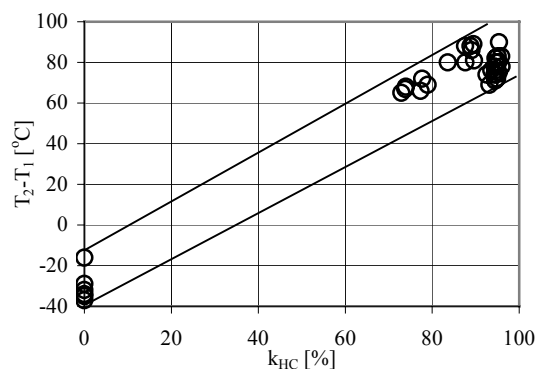
$$\Delta T = T_2 - T_1$$



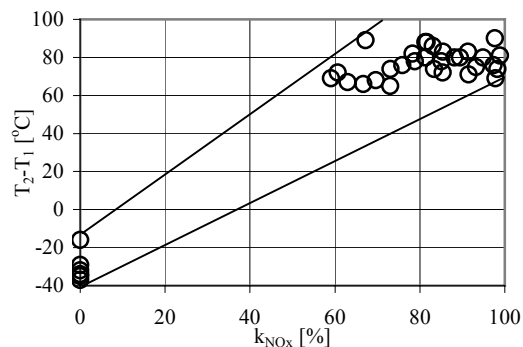
Rys. 5. Zależność różnicy temperatur $\Delta T = T_2 - T_1$ spalin od aktywności reaktora A



Rys. 6. Zależność różnicy temperatur $\Delta T = T_2 - T_1$ od konwersji tlenku węgla k_{CO}



Rys. 7. Zależność różnicy temperatur $\Delta T = T_2 - T_1$ od konwersji węglowodorów k_{HC}



Rys. 8. Zależność różnicy temperatur $\Delta T = T_2 - T_1$ od konwersji tlenków azotu k_{NOx}

4. WNIOSKI

- Reaktor katalityczny dobrany odpowiednio do pojemności skokowej silnika zapewnia poprawną pracę reaktora w ustalonych warunkach pracy silnika nawet przy utracie prawie 75 % jego aktywności co spowodowane jest zasadami doboru reaktorów, które uwzględniają ich dezaktywację w czasie eksploatacji.
- Przyrosty temperatur spalin wynikające z konwersji poszczególnych składników spalin

są w niewielkim stopniu zależne od prędkości obrotowej silnika i jego obciążenia.

- Badania eksperymentalne sygnałów diagnostycznych na potrzeby OBD II w ustalonych warunkach pracy silnika oraz w warunkach pracy pojazdu ECE R83 powinny być prowadzone przy symulacji dezaktywacji reaktora gwarantującej uzyskanie niskich sprawności konwersji składników szkodliwych spalin.
- Różnice temperatur spalin w reaktorze katalitycznym mierzone w ustalonych warunkach pracy silnika mogą być wykorzystane do diagnostyki reaktora katalitycznego.
- Celowym jest prowadzenie dalszych badań tego typu reaktorów katalitycznych w rzeczywistych warunkach ich eksploatacji.



Mgr inż. Jacek Łączyński,
słuchacz studium
doktoranckiego przy SiMR
Politechniki Warszawskiej,



Mgr inż. Dariusz
Tomaszewski, słuchacz
studium doktoranckiego
przy SiMR Politechniki
Warszawskiej.
prof. dr hab. inż. Andrzej
Ambrozik

5. LITERATURA

- [1] Ambrozik A., Kruczyński S.W.: Diagnostyka i monitoring trójfunkcyjnych reaktorów katalitycznych spalin. XXVII Ogólnopolskie Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka, luty 2000.
- [2] Kruczyński S.W., Łączyński J., Tomaszewski D.: Ocena sygnałów diagnostycznych przyrostu temperatur podczas symulowanej dezaktywacji trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego spalin. XXIX Ogólnopolskie Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka, marzec 2002.



Prof. dr hab. inż. Andrzej
Ambrozik, profesor
w Instytucie Pojazdów
Politechniki Warszawskiej,
Kierownik Samodzielnego
Zakładu Silników Spalino-
wych i Maszyn Roboczych
Politechniki Świętokrzy-
skiej w Kielcach,



Dr inż. Stanisław
Kruczyński, adiunkt
w Instytucie Pojazdów
Politechniki Warszawskiej,

POMIARY STĘŻEŃ TLENU W DIAGNOZOWANIU POKŁADOWYM TRÓJFUNKCYJEGO REAKTORA KATALITYCZNEGO SPALIN

Andrzej AMBROZIK, Stanisław W. KRUCZYŃSKI
Dariusz TOMASZEWSKI, Jacek ŁĄCZYŃSKI

Instytut Pojazdów Politechniki Warszawskiej
02 – 524 Warszawa, ul. Narbutta 84
fax: (22) 8490303
e-mail: skruczyn@simr.pw.edu.pl

Streszczenie

W pracy oceniono możliwości diagnozowania trójfunkcyjnych reaktorów katalitycznych za pomocą sygnałów z czujników tlenu w ustalonych warunkach pracy silnika. Zaproponowano metodę symulacji procesu dezaktywacji polegającą na wymianie wkładów aktywnych reaktora na wkłady nieaktywne. Do potrzeb diagnostyki trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego wybrano symptom diagnostyczny spowodowany zmianą stężenia tlenu i zjawiskiem spadku powierzchni jego magazynowania. Na podstawie uzyskanych wyników określono przydatność sygnałów wykorzystywanych do diagnozy reaktora katalitycznego ze względu na emisję składników toksycznych spalin.

Słowa kluczowe: toksyczność spalin, reaktor katalityczny, diagnostyka pokładowa

RESEARCH OF THE OXYGEN CONTENT FOR ON – BOARD DIAGNOSIS OF THREE WAY CATALYTIC CONVERTER

In this paper the possibility of three – way catalytic converter diagnosis by means of oxygen sensors signals in fixed engine working conditions is estimated. Method of the deactivation process depending on the exchange reactor active bricks of converter on disactive ones is suggested. For needs of three – way catalytic converter diagnosis it choosed diagnostic symptom caused by oxygen loss and decrease of Oxygen Storage Capacity (OSC). On the basis of the forthcoming results, diagnostic signals usefulness for converter diagnosis in view of harmful gases emission is evaluated

Key words: exhaust toxicity, catalytic converter, on-board diagnostics

1. WSTĘP

Reaktor katalityczny spalin ze względu na swoją wysoką sprawność oczyszczania spalin w układzie pełni kluczową rolę w ograniczaniu emisji z silników spalinowych z zapłonem iskrowym. Urządzenie to zapewnia wysoką sprawność konwersji w spalinach powstałych ze spalania mieszanki stechiometrycznej. Mieszanka ta uzyskana jest poprzez regulację jej składu w pętli zamkniętej za pomocą czujnika tlenu o charakterystyce przełącznikowej. Rysunek 1 przedstawia konwersji składników szkodliwych wraz z charakterystyką czujnika tlenu w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza.

Metody diagnozowania trójfunkcyjnych reaktorów katalitycznych można podzielić na trzy podstawowe grupy oparte o następujące pomiary [1]:

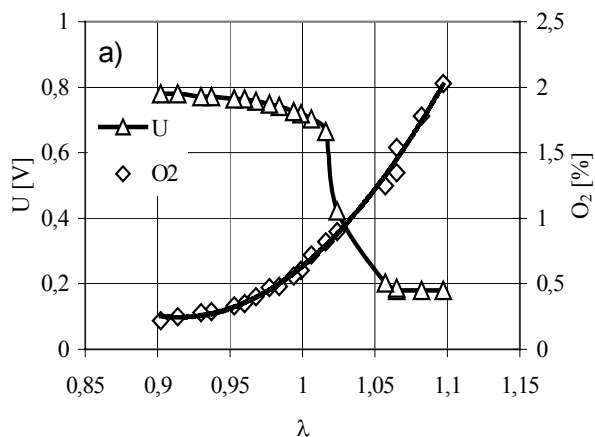
- temperatur (detekcja ilości wydzielonego ciepła),
- stężenie tlenu (detekcja ubytku tlenu i utrata przestrzeni jego magazynowania),
- stężenie wybranych składników spalin (bezpośrednia detekcja sprawności pracy reaktora).

Obecnie na potrzeby diagnostyki pokładowej rozwijane są dwie pierwsze metody lub ich kombinacje. Zastosowanie metody bezpośredniej opartej o pomiary stężeń składników spalin ograniczane jest brakiem trwałych i niezawodnych detektorów możliwych do zastosowania w eksploatowanych pojazdach [2].

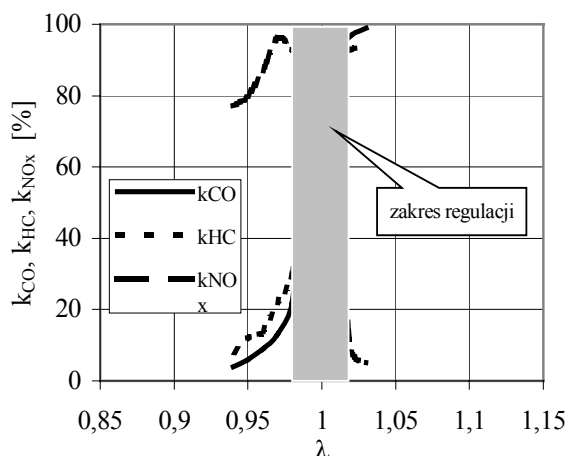
Sprawność pracy trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego spalin oceniana jest na podstawie wartości stopnia konwersji tlenu węgla, węglowodorów i tlenków azotu.

katalityczny, spowoduje, że sygnały będą prawie identyczne z możliwym przesunięciem względem siebie o czas przepływu spalin przez reaktor (rys.2. b).

a).



b).



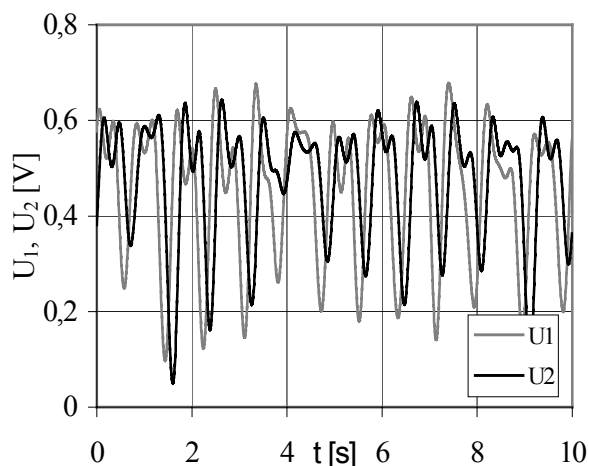
Rys. 1. a - charakterystyka czujnika tlenu,
b - konwersja substancji szkodliwych
w zależności od współczynnika
nadmiaru powietrza

Ze zjawiskami konwersji związane są procesy zmiany stężeń tlenu:

1. Zjawisko spadku stężenia tlenu na skutek reakcji utleniania.
2. Zjawisko magazynowania/ uwalniania tlenu w materiale nośnika (tlenki ceru).

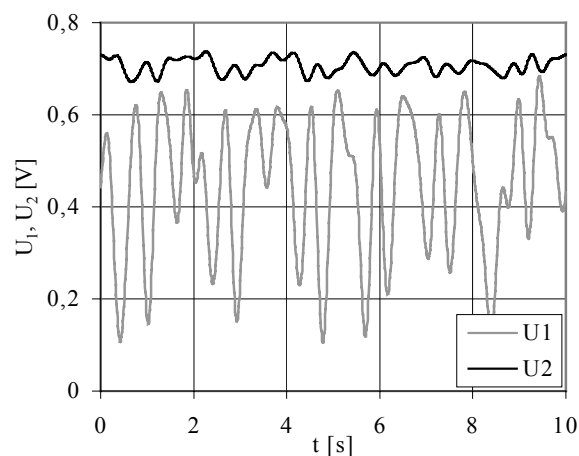
Monitorując zmiany stężenie tlenu w reaktorze katalitycznym możemy wnioskować pośrednio o intensywności konwersji katalitycznej.

W ustalonych warunkach pracy silnika sygnały z czujników tlenu umieszczonych przed i za reaktorem katalitycznym, będą się różniły wartością średnią i amplitudą wskutek wyżej wymienionych zjawisk (rys.2. a). Zdezaktywowany reaktor



a).

b).



Rys. 2. Sygnały z czujników tlenu przy
prędkości obrotowej $n = 2000$ obr/min
i prędkości przepływu spalin
 $SV = 22000 \text{ h}^{-1}$: a – dla reaktora o
100 % aktywności, b - dla reaktora o
0 % aktywności..

Celem pracy jest ocena możliwości diagnozowania trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego spalin w oparciu o pomiary pośrednie stężenia tlenu w spalinach przed i za reaktorem występujących przy ustalonych warunkach pracy badanego silnika spalinowego.

2. STANOWISKO BADAWCZE

Eksperyment wykonano na stanowisku badawczym silnika Rover 1.4 wyposażonego we wtryskowy układ zasilania z korekcją składu

mieszanki za pomocą czujnika tlenu. W układzie wylotowym silnika zastosowano trójfunkcyjny reaktor katalityczny Pt-Rh/Al₂O₃-CeO₂ o objętości monolitu dobranej odpowiednio do pojemności skokowej silnika. Badany reaktor katalityczny posiadał blok wykonany w postaci monolitu metalowego pokrytego nośnikiem γ -Al₂O₃-CeO₂ z naniesionymi na nim krystalitami platyny i rodu w proporcji 5:1 i ilości 2.0 g/dm³ monolitu. Określenia stężenia tlenu za reaktorem dokonywano z wykorzystaniem czujnika tlenu o charakterystyce identycznej jak czujnik sterujący.

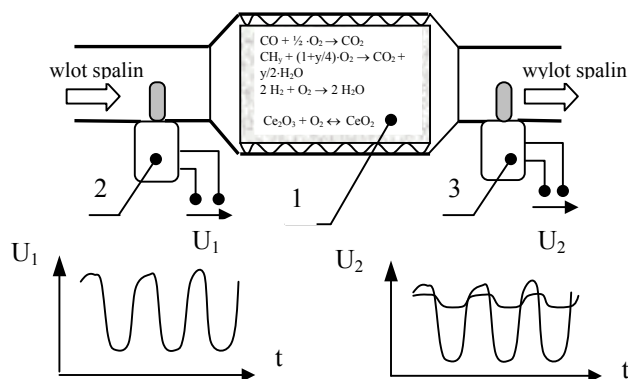
Reaktor katalityczny w celu symulacji procesu dezaktywacji pocięto na osiem segmentów o jednakowej długości. Symulacji dezaktywacji reaktora katalitycznego dokonywano poprzez wymianę segmentów aktywnych z przedniej części reaktora na segmenty nieaktywne. W ten sposób uzyskano różne poziomy aktywności reaktora A począwszy od aktywności A = 100 % aż do aktywności A = 0 % z krokiem równym 12.5 %. Aktywność reaktora katalitycznego określono jako stosunek objętości segmentów aktywnych V_a do objętości całego katalizatora V_k.

$$A = \frac{V_a}{V_k} \quad (1)$$

W celu wyznaczenia stopnia konwersji CO, HC i NO_x próbki spalin pobierano z przed i z za reaktora i kierowano do zestawu analizatorów spalin mierzących stężenia tlenku węgla metodą NDIR, węglowodorów metodą FID oraz tlenków azotu metodą CLD. Pomiarów stężeń tlenu dokonywano w sposób pośredni przy pomocy czujników tlenu umieszczonych przed i za reaktorem katalitycznym. Generowane sygnały napięciowe te były próbkowane z częstotliwością 100 Hz. Następnie dokonano filtracji sygnałów przy użyciu filtra dolnoprzepustowego o częstotliwości granicznej 5 Hz. Schemat reaktora i miejsca umieszczenia czujników tlenu w katalizatorze przedstawiono na rysunku 3.

3. WYNIKI BADAŃ

Badania sygnałów diagnostycznych oraz pomiary konwersji składników spalin w reaktorze katalitycznym przy różnej jego aktywności wykonano przy prędkości obrotowej n = 2000 i 3000 obr/min i trzech różnych obciążeniach silnika M_e = 36, 46, 56 Nm. Względne objętościowe natężenie przepływu spalin SV zawierało się w granicach od 22000 h⁻¹ do 50000 h⁻¹. Badania przeprowadzono przy stałej temperaturze otoczenia.



Rys. 3. Schemat układu badawczego reaktora katalitycznego: 1 – reaktor katalityczny spalin, 2 – sonda sterująca, 3 – sonda diagnostyczna.

Definicje sygnałów diagnostycznych:

1. W pierwszej metodzie sygnał diagnostyczny zdefiniowano jako iloraz wartości średnich sygnałów napięciowych generowanych przez sondy:

$$I_{Usr} = \frac{U_{2sr}}{U_{1sr}} \quad (2)$$

2. W drugim przypadku sygnał diagnostyczny zdefiniowano jako iloraz zakresów wartości sygnałów napięciowych generowanych przez sondy:

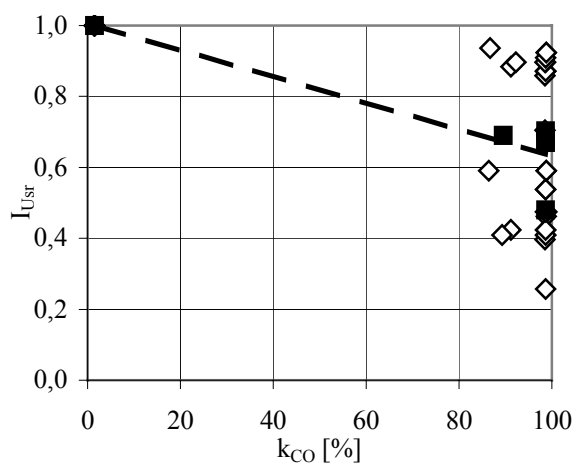
$$I_{\Delta U} = \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} = \frac{U_{2max} - U_{2min}}{U_{1max} - U_{1min}} \quad (3)$$

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono zależność sygnałów diagnostycznych od konwersji tlenku węgla k_{CO}, węglowodorów k_{HC} oraz tlenków azotu k_{NOx}.

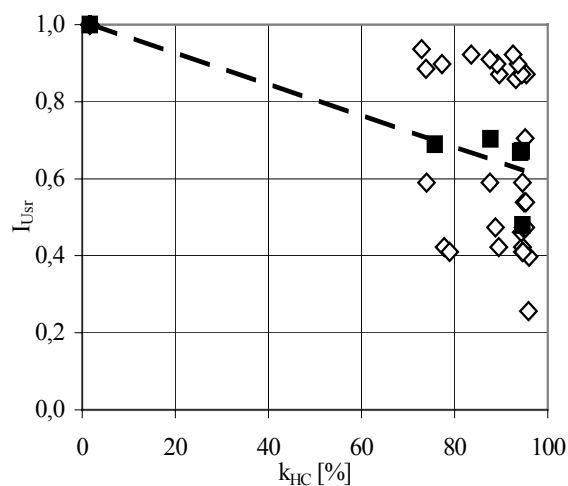
Na rysunku 6 przedstawiono wyniki pomiarów sygnałów diagnostycznych w funkcji aktywności reaktora.

Analiza wyników badań zależności konwersji poszczególnych substancji szkodliwych od aktywności reaktora, oraz zależności sygnału diagnostycznego od konwersji CO, HC i NO_x prowadzi do następujących wniosków.

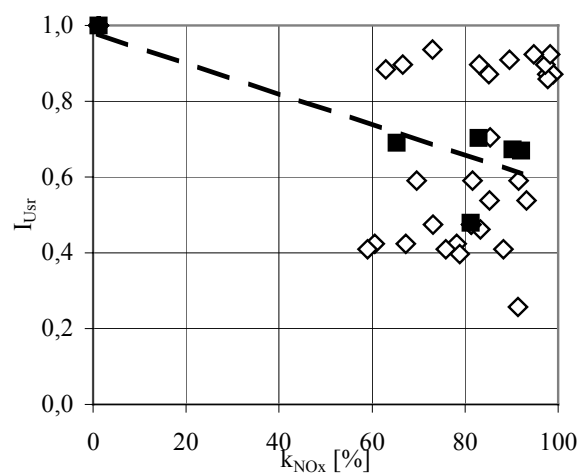
a).



b).

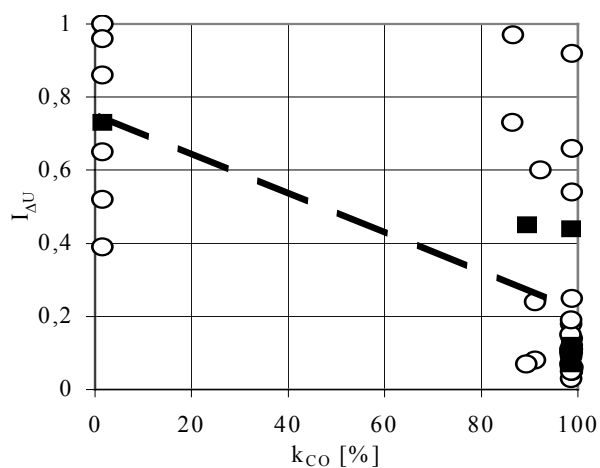


c).

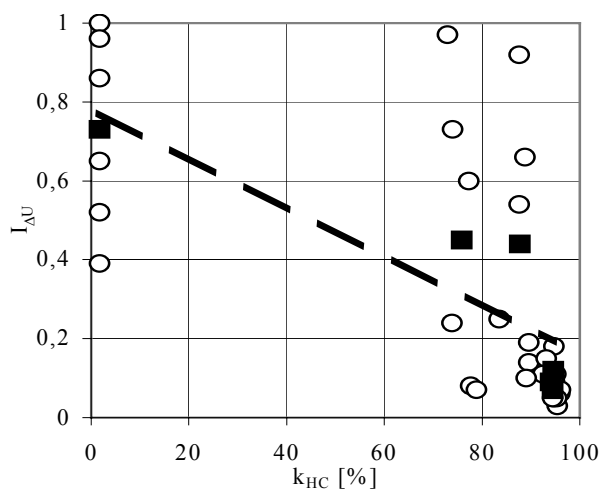


Rys.4. Zależność sygnału diagnostycznego od konwersji składników toksycznych dla definiowanych sygnałów jako iloraz wartości średnich sygnałów generowanych przez czujniki

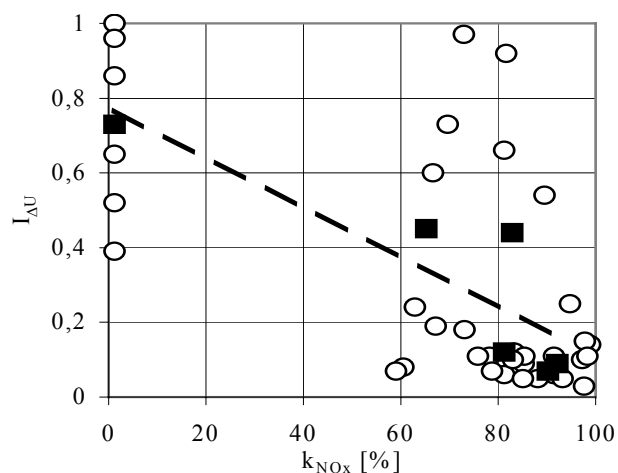
a).



b).



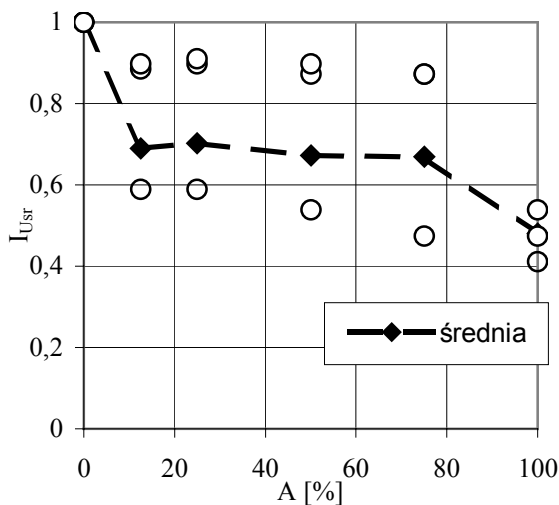
c).



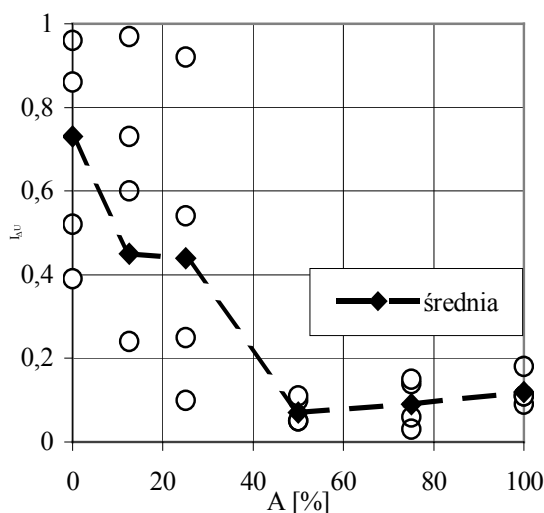
Rys.5. Zależność sygnału diagnostycznego od konwersji składników toksycznych dla definiowanych sygnałów jako iloraz zakresów wartości generowanych przez czujniki

a).

b).



Rys. 6. Wykresy sygnałów diagnostycznych



definiowanych jako:

- a). Iloraz wartości średnich sygnałów z czujników;
- b). Iloraz zakresów wartości sygnałów generowanych przez czujniki.

4. WNIOSKI

- Badania eksperymentalne sygnałów diagnostycznych na potrzeby OBD II w ustalonych warunkach pracy silnika oraz w warunkach pracy pojazdu ECE R83 powinny być prowadzone przy symulacji dezaktywacji reaktora gwarantującej uzyskanie niskich sprawności konwersji składników szkodliwych spalin.
- Obydwie przedstawione metody określania sygnału diagnostycznego $I_{U_{sr}}$ i I_{A_U} nie spełniają warunków poprawności diagnozy reaktora, choć

metoda oparta na sygnale diagnostycznym I_{A_U} wykazuje pewną jednoznaczną zależność.

- Znacznym ograniczeniem wykorzystania metod jest przełącznikowa charakterystyka czujnika tlenu, która powoduje niejednoznaczność określenia informacji w spalinach o składzie bliskim stechiometrycznemu.

5. LITERATURA

- [1] Ambrozik A., Kruczyński S. W.: Diagnostyka i monitoring trójfunkcyjnych reaktorów katalitycznych spalin. XXVII Ogólnopolskie Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka, luty 2000.
- [2] Kruczyński S. W., Łączyński J., Tomaszewski D.: Ocena sygnałów diagnostycznych z czujników tlenu podczas symulowanej dezaktywacji trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego spalin. XXIX Ogólnopolskie Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka, marzec 2002.

Informacje o Autorach zamieszczono na stronie 20

KONCEPCJA MODELU MATEMATYCZNEGO KOSZTÓW EKSPLOATACJI OBIEKTÓW TECHNICZNYCH

Stanisław NIZIŃSKI, Krzysztof LIGIER

Katedra Eksploatacji Pojazdów i Maszyn UWM w Olsztynie
 ul. Oczapowskiego 11, 10-736 Olsztyn
 tel. 523 48 11, e-mail: klig@uwm.edu.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono koncepcje uzyskania modelu matematycznego kosztów eksploatacji w tym diagnozowania obiektów technicznych, będących składnikami kosztów całkowitych i logistycznych systemu działania. Zaproponowano także program badań eksperymentalnych kosztów, którego zrealizowanie umożliwi uzyskanie omówionych modeli.

Słowa kluczowe: system eksploatacji, koszty eksploatacji, logistyka, eksploatacja, model matematyczny

CONCEPTION OF EXPLOITATION COSTS MATHEMATICAL MODEL OF TECHNICAL OBJECTS

Summary

In the paper there was presented a conception of obtaining of the exploitation costs mathematical model, including diagnosing of technical objects, that are components of total and logistics costs of the operation system. The costs experimental research program was proposed. After accomplishing the program, it will enable reaching the described models.

Key words: exploitation costs, exploitation system, logistics, exploitation, diagnostic, mathematical model

1. WPROWADZENIE

Wyróżnia się dwa sposoby tworzenia modelu matematycznego obiektu badań:

- 1) na bazie badań doświadczalnych (metoda eksperymentalna). Ten sposób tworzenia modelu matematycznego przyjmuje się, jeśli są nieznane podstawy teoretyczne lub zjawiska w obiekcie badań są szczególnie złożone;
- 2) na podstawie analizy teoretycznej zjawisk związanych z obiektem (metoda teoretyczna). Istota metody polega na opisie teoretycznym obiektu badań za pomocą podstawowych praw naukowych umożliwiających jego analizę teoretyczną. Utworzony model powinien podlegać weryfikacji doświadczalnej.

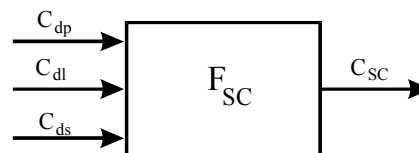
Celem niniejszej pracy jest przedstawienie koncepcji poszukiwania modeli matematycznych kosztów eksploatacji obiektów technicznych, w tym:

- szczegółowych, dotyczących różnych urządzeń technicznych eksploatowanych w różnych systemach działania;

- ogólnych dotyczących urządzeń technicznych eksploatowanych w dowolnych systemach działania.

2. MODEL KOSZTÓW CAŁKOWITYCH SYSTEMU DZIAŁANIA

Model kosztów C_{SC} dowolnego systemu działania zilustrowano na rys. 1 [1].



Rys. 1. Ilustracja graficzna modelu kosztów całkowitych systemu działania (oznaczenia w tekście)

Jakościowy model kosztów całkowitych systemu działania określa wzór:

$$C_{SC} = F_{SC}(C_{dp}, C_{dl}, C_{ds}) \quad (1)$$

gdzie:

C_{SC} – koszty całkowite systemu działania;
 C_{dp} – koszty działalności podstawowej;
 C_{dl} – koszty działalności logistycznej;
 C_{ds} – koszty działalności systemowej (administracyjnej).

Funkcja obiektu badań kosztów całkowitych obiektów technicznych aproksymowano wielomianem drugiego stopnia ze współdziałaniami pierwszego rzędu:

$$C_{SC} = a_0 + a_1 C_{dp} + a_2 C_{dl} + a_3 C_{ds} + a_4 C_{dp}^2 + a_5 C_{dl}^2 + a_6 C_{ds}^2 + a_7 C_{dp} C_{dl} + a_8 C_{dp} C_{ds} + a_9 C_{dl} C_{ds} \quad (2)$$

gdzie:

$a_0, a_1, a_2, \dots$ - parametry (współczynniki) funkcji obiektu badań.

Podkreślić należy w badaniach obiektów charakteryzowanych wieloma wielkościami wejściowymi przyjmuje się powszechnie, jeśli nie występują zalecenia szczególne wymagające innego typu funkcji, wielomian drugiego stopnia (kwadratowy) ze współdziałaniami (2) lub bez współdziałania, pierwszego rzędu (3), który może być zredukowany do postaci linowej (4):

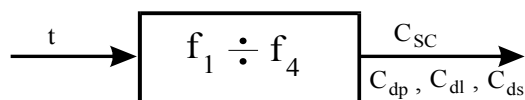
$$C_{SC} = b_0 + b_1 C_{dp} + b_2 C_{dl} + b_3 C_{ds} + b_4 C_{dp}^2 + b_5 C_{dl}^2 + b_6 C_{ds}^2 \quad (3)$$

$$C_{SC} = d_0 + d_1 C_{dp} + d_2 C_{dl} + d_3 C_{ds} \quad (4)$$

gdzie:

$b_0, d_0, b_1, d_1, b_2, d_2, \dots$ - parametry (współczynniki) funkcji obiektu badań.

Ze względów praktycznych ważny jest model kosztów: całkowitych C_{SC} , działalności podstawowej C_{dp} , działalności logistycznej C_{dl} , i systemowej C_{ds} , funkcji czasu t (rys. 2).



Rys. 2. Ilustracja graficzna modelu kosztów: C_{SC} , C_{dp} , C_{ds} , C_{dl} funkcji czasu

$$\begin{aligned} C_{SC} &= f_1(t) \\ C_{dp} &= f_2(t) \\ C_{dl} &= f_3(t) \\ C_{ds} &= f_4(t) \end{aligned} \quad (5)$$

Do najczęściej stosowanych wielomianów aproksymujących koszty całkowite i ich składniki, można zaliczyć niżej podane postacie wielomianów algebraicznych:

$$\begin{aligned} C_{SC} &= a_c + a_{c1}t + a_{c2}t^2 + \dots + a_{cn}t^n \\ C_{dp} &= a_p + a_{p1}t + a_{p2}t^2 + \dots + a_{pn}t^n \\ C_{dl} &= a_c + a_{l1}t + a_{l2}t^2 + \dots + a_{ln}t^n \\ C_{ds} &= a_s + a_{s1}t + a_{s2}t^2 + \dots + a_{sn}t^n \end{aligned} \quad (6)$$

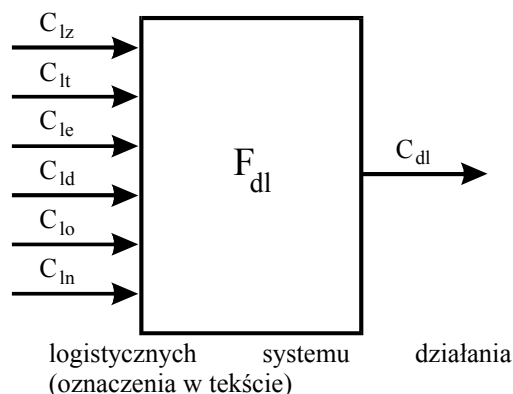
gdzie:

$a_c, a_p, a_l, a_s, \dots$ - parametry (współczynniki) funkcji obiektu badań.

3. MODEL KOSZTÓW LOGISTYCZNYCH

Jakościowy model matematyczny kosztów logistycznych systemu działania przedstawia wyrażenie (rys. 3) [1].

Rys. 3. Ilustracja graficzna modelu kosztów



$$C_{dl} = F_{dl}(C_{lz}, C_{lt}, C_{le}, C_{ld}, C_{lo}, C_{ln}) \quad (7)$$

gdzie:

C_{lz} – koszty zasilania (zaopatrzenia); C_{lt} – koszty transportu; C_{le} – koszty eksploatacji urządzeń technicznych; C_{ld} – koszty dystrybucji; C_{lo} – koszty ochrony środowiska; C_l – inne koszty.

Wielomian aproksymujący (funkcja obiektu badań) koszty logistyczne ma postać:

$$\begin{aligned} C_{dl} &= a_1 + a_{11}C_{lz} + a_{12}C_{lt} + a_{13}C_{le} + a_{14}C_{ld} + a_{15}C_{lo} + a_{16}C_{ln} + a_{17}C_{lz}^2 + a_{18}C_{lt}^2 + a_{19}C_{le}^2 + a_{110}C_{ld}^2 + a_{111}C_{lo}^2 + a_{112}C_{ln}^2 + a_{113}C_{lz}C_{lt} + a_{114}C_{lz}C_{le} + a_{115}C_{lz}C_{ld} + a_{116}C_{lz}C_{lo} + a_{117}C_{lz}C_{ln} + a_{118}C_{lt}C_{le} + a_{119}C_{lt}C_{ld} + a_{120}C_{lt}C_{lo} + a_{121}C_{lt}C_{ln} + a_{122}C_{le}C_{ld} + a_{123}C_{le}C_{lo} + a_{124}C_{le}C_{ln} + a_{125}C_{ld}C_{lo} + a_{126}C_{ld}C_{ln} + a_{127}C_{lo}C_{ln} \end{aligned} \quad (8)$$

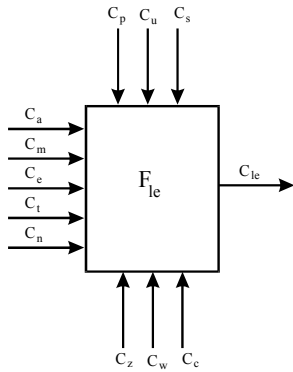
gdzie:

$a_1, a_{11}, a_{12}, \dots$ - parametry (współczynniki) funkcji badań.

Koszty działalności: logistycznej C_{dl} , zasilania C_{lz} , transportu C_{lt} , eksploatacji urządzeń C_{le} , dystrybucji wyrobów C_{ld} , ochrony środowiska C_{lo} i inne C_{ln} można opisać za pomocą wielomianów algebraicznych (2, 3, 4).

4. MODEL KOSZTÓW EKSPLOATACJI

Jakościowy model matematyczny kosztów eksploatacji obiektów technicznych określa wyrażenie (9) (rys. 4) [1].



Rys. 4. Ilustracja graficzna kosztów eksploatacji obiektów technicznych (oznaczenia w tekście)

$$C_{le} = F_{le}(C_a, C_m, C_e, C_t, C_n, C_p, C_u, C_s, C_z, C_w, C_c) \quad (9)$$

gdzie:

- C_a – koszty eksploatacji obiektów technicznych;
- C_m – koszty amortyzacji;
- C_e – koszty materiałów i części zamiennych;
- C_t – koszty obcych usług transportowych;
- C_n – koszty obcych napraw urządzeń;
- C_p – płace pracowników;
- C_u – ubezpieczenia społeczne;
- C_s – odpisy na zakładowy fundusz świadczeń socjalnych;
- C_z – pozostałe świadczenia pracowników;
- C_w – podatki;
- C_c – pozostałe koszty.

Wielomian algebraiczny określający funkcję eksploatacji obiektów technicznych ma postać:

$$C_{le} = a_e + a_{e1}C_a + a_{e2}C_m + \dots + a_{e11}C_c + a_{12}C_a^2 + a_{e13}C_m^2 + \dots + a_{e22}C_c^2 + a_{e23}C_aC_m + a_{e24}C_aC_e + \dots + a_{ek}C_wC_c \quad (10)$$

Koszty eksploatacji obiektów technicznych C_{le} , koszty urządzeń, materiałów i części zamiennych C_m i innych można opisać za pomocą wielomianów algebraicznych (2, 3, 4).

Koszty eksploatacji C_{lem} obiektów technicznych w zależności od miejsca ich powstawania w systemie eksploatacji można opisać za pomocą wyrażenia (rys. 5):

$$C_{lem} = F_{lem}(C_{eu}, C_{ed}, C_{eo}, C_{ez}) \quad (11)$$

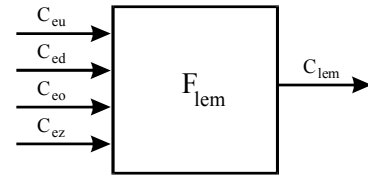
gdzie:

$C_{eu}, C_{ed}, C_{eo}, C_{ez}$ – koszty w podsystemie użytkowania, diagnostycznym, obsługiwanym i zarządzania.

Wielomian algebraiczny kosztów C_{lem} ma postać:

$$C_{lem} = a_m + a_{m1}C_{eu} + a_{m2}C_{ed} + a_{m3}C_{eo} + a_{m4}C_{ez} + a_{m5}C_{eu}^2 + a_{m6}C_{ed}^2 + a_{m7}C_{eo}^2 + a_{m8}C_{ez}^2 + a_{m9}C_{eu}C_{ed} + a_{m10}C_{eu}C_{eo} + a_{m11}C_{eu}C_{ez} + a_{m12}C_{ed}C_{eo} + a_{m13}C_{ed}C_{ez} + a_{m14}C_{eo}C_{ez} \quad (12)$$

Koszty eksploatacji C_{lem} , w podsystemie użytkowania C_{eu} , diagnostycznym C_{ed} , obsługiwanym C_{eo} i zarządzania C_{ez} można opisać za pomocą wielomianów algebraicznych (2, 3, 4).



Rys. 5. Ilustracja graficzna modelu kosztów eksploatacji obiektów technicznych w zależności od miejsca ich powstawania (oznaczenia w tekście)

Chcąc uzyskać konkretny model matematyczny kosztów całkowitych i logistycznych systemu działania, a także kosztów eksploatacji obiektów technicznych należy wykonać badania eksperymentalne, których koncepcję przedstawiono w punkcie 5.

5. PROGRAM

BADAŃ

EKSPERYMENTALNYCH

Program badań kosztów eksploatacji obiektów technicznych przedstawiono na rys. 6. Poziom zerowy grafu odpowiada kosztom C_{sc} całkowitym systemu działania, zaś poziom I ich składnikom: tzn.: kosztom C_{dp} działalności podstawowej; logistycznej C_{dl} i systemowej (administracyjnej) C_{ds} . Poziom II grafu przedstawia składniki kosztów logistycznych, tzn. koszty: zasilania (zaopatrywania) C_{lz} , transportu C_{lt} , eksploatacji C_{le} , dystrybucji C_{ld} , i ochrony środowiska C_{lo} . Na poziomie III pokazano składniki kosztów eksploatacji C_{le} , zaś na poziomie IV koszty, które powstają w podsystemach: użytkowania C_{eu} , diagnostyki C_{ed} , obsługiwanego C_{eo} i zarządzania C_{ez} .

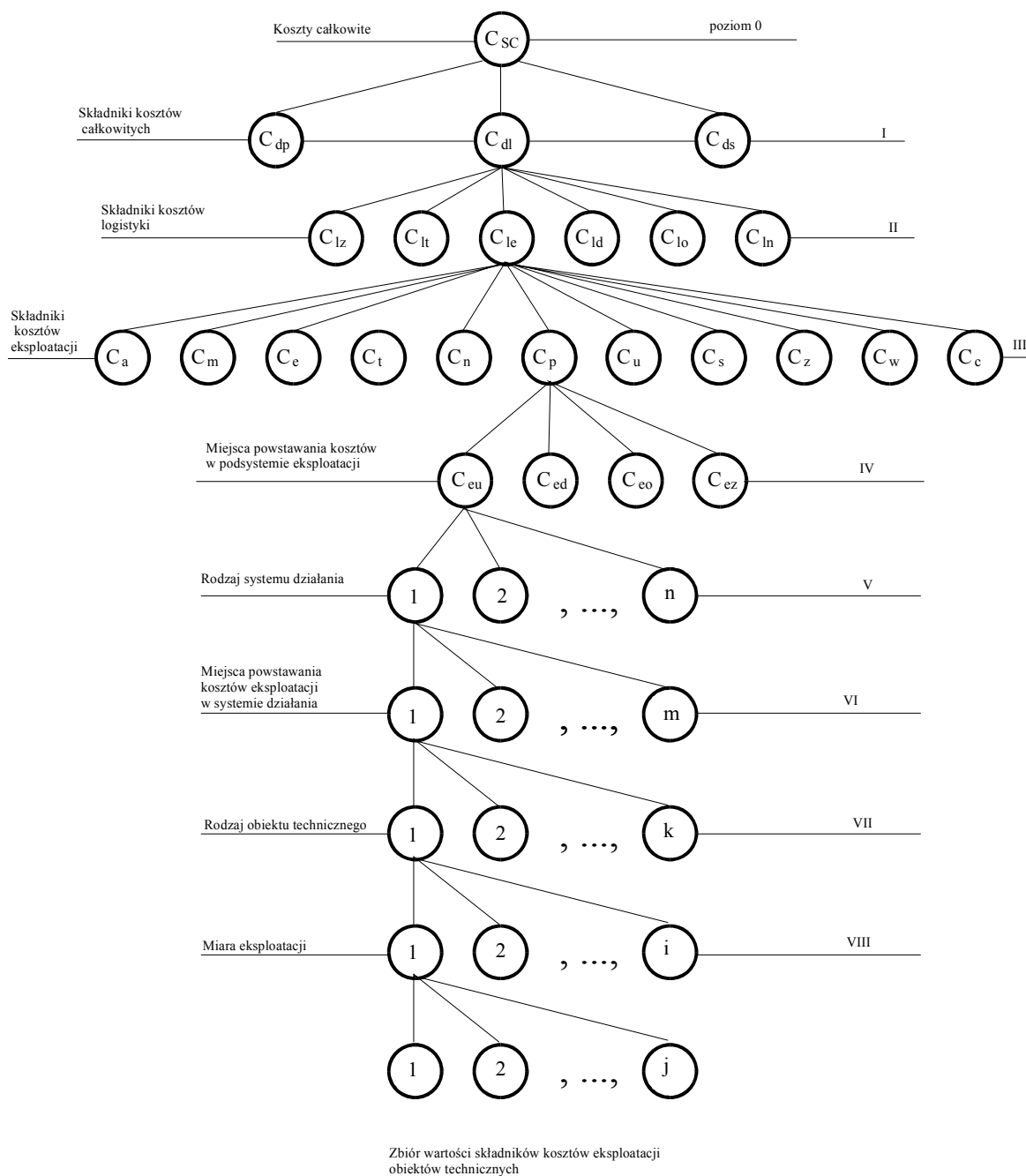
Poziom V oznacza rodzaj systemu działania, w którym występują koszty eksploatacji obiektów technicznych. Proponuje się rozważyć następujące systemy działania:

- przedsiębiorstwo produkcyjne;
- przedsiębiorstwo rolnicze;
- przedsiębiorstwo transportowe;
- wojskowe jednostki budżetowe.

Poziom VI oznacza miejsca powstawania kosztów eksploatacji obiektów technicznych w systemach działania, tzn. w wydziałach produkcji podstawowej i wydziałach pomocniczych (naprawczych). Poziom VII oznacza koszty eksploatacji rejestrowane dla konkretnych obiektów technicznych. Proponuje się rozważyć koszty eksploatacji: tokarek, kombajnów zbożowych, samochodów ciężarowych i innych obiektów technicznych. Poziom VIII grafu nakazuje rejestrację kosztów eksploatacji obiektów technicznych w funkcji miary eksploatacji, którą mogą być: miesiące, lata, km, mtg, liczba cykli obciążenia, itp.

Można rozpatrzyć inne poziomy badania kosztów eksploatacji obiektów technicznych na przykład: warunki eksploatacji (hala, drogi

utwardzone, bezdroża), obciążenie (pełne, średnie, małe), kwalifikacje operatorów (bardzo dobre, dobre, dostateczne), itp.



Rys. 6. Graf badań kosztów eksploatacji obiektów technicznych

6. PODSUMOWANIE

Reasumując rozpatrzone zagadnienia poświęcone modelom matematycznym kosztów eksploatacji obiektów technicznych można stwierdzić, co następuje:

- 1) do opracowania modelu matematycznego kosztów eksploatacji obiektów technicznych jest celowe wykorzystanie metody eksperymentalnej;
- 2) koszty całkowite systemu działania obejmują koszty: działalności podstawowej, logistycznej i systemowej;
- 3) koszty logistyczne systemu działania obejmują koszty: zasilania, transportu, dystrybucji, ochrony środowiska i eksploatacji majątku trwałego, w tym eksploatacji obiektów technicznych;
- 4) w skład kosztów eksploatacji obiektów technicznych między innymi wchodzi

następujące składniki kosztów: amortyzacji, materiałów i części zamiennych, energii, usług transportowych, obcych napraw urządzeń, płac pracowników, ubezpieczeń społecznych;

- 5) do uzyskania modelu matematycznego kosztów eksploatacji obiektów technicznych jest niezbędne wykonanie badań eksperymentalnych według opracowanego programu (rys. 6).

LITERATURA

- [1] NIZIŃSKI S., WIERZBICKI S.: Model kosztów eksploatacji obiektów technicznych. IX Kongres Eksploatacji Urządzeń Technicznych, SPE ITE Radom – Krynica 2001.
- [2] POLAŃSKI Z.: Planowanie doświadczeń w technice. WNT, Warszawa 1984.



Prof. dr hab. inż. Stanisław Niziński jest pracownikiem naukowym Katedry Eksploatacji Pojazdów i Maszyn UWM w Olsztynie oraz Wojskowego Instytutu Techniki Pancernej i Samochodowej w Sulejówku. Jest wieloletnim członkiem Sekcji Podstaw

Eksploatacji KBM PAN oraz Polskiego Naukowo-Technicznego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej. Jego zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia dotyczące logistyki w systemach działania, eksploatacji i diagnostyki obiektów technicznych, szczególnie pojazdów mechanicznych. Jest autorem i współautorem wielu prac naukowych i dydaktycznych.



Mgr inż. Krzysztof Ligier jest asystentem w Katedrze Eksploatacji Pojazdów i Maszyn Wydziału Nauk Technicznych UWM w Olsztynie. Jest członkiem Polskiego Naukowo-Technicznego Towarzystwa Eksploatacji, redaktorem czasopisma „Diagnostyka”.

Zajmuje się problemami eksploatacji i diagnostyki maszyn i urządzeń technicznych.

HAŁAS W KABINIE SAMOCHODU CIĘŻAROWEGO JAKO PRZYKŁAD WYKORZYSTANIA METODYKI STOSOWANIA MATERIAŁÓW GUMOPOCHODNYCH W ZADANIU MINIMALIZACJI UCIAŹLIWOŚCI AKUSTYCZNEJ MASZYN¹.

Grzegorz KLEKOT

Instytut Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Warszawskiej
02-524 Warszawa, Narbutta 84, fax 660 8622, email gkl@simr.pw.edu.pl

Streszczenie

Zasadniczym etapem procesu minimalizacji uciążliwości akustycznej maszyn jest wskazanie elementów odpowiedzialnych za generację drgań i hałasu. Po ustaleniu głównych dróg propagacji energii wibroakustycznej można prowadzić analizę rozwiązań konstrukcyjnych, pozwalających zmniejszyć niepożądane efekty towarzyszące pracy maszyny. Niezłe rezultaty w tym zakresie przynosi stosowanie materiałów gumopochodnych na przegrody akustyczne i bariery dla przenoszenia drgań strukturalnych. Bazując na powyższym opracowano i zrealizowano modyfikację konstrukcyjną z użyciem elementów gumowych, która doprowadziła do redukcji dokuczliwych dźwięków w kabinie kierowcy samochodu ciężarowego podczas jazdy. Uzyskane efekty potwierdzają poprawność przyjętych rozwiązań metodycznych.

Słowa kluczowe: hałas maszyn, propagacja drgań i hałasu, materiały tłumiące

NOISE IN A TRUCK CABIN AS AN EXAMPLE OF USING THE RUBBER-DERIVATIVE MATERIALS IN THE TASK OF MINIMIZING OF ACOUSTIC NOXIOUSNESS OF A MACHINE

Summary

The prime stage of the process of minimizing of machines acoustic noxiousness consists in identifying elements responsible for generating noise and vibrations. Having identified main propagation ways of vibroacoustic energy we can attempt the analyse of construction solutions that would help to reduce some of the unwanted side-effects accompanying work of a machine. Application of the rubber-derivative materials for acoustic screens and barriers for transmission of structural vibrations demonstrates rather good results. It was a base for elaborating and realising of a construction modernisation where the rubber elements were used. The noxious sounds in a truck driver's cabin with a car running have been reduced as the result, which proves that the applied problem's solution methods have been correctly chosen.

Key words: machines noise, propagation of noise and vibrations, damping materials

1. WPROWADZENIE

W pracach nad ograniczaniem uciążliwości akustycznej maszyn szczególnego znaczenia nabiera umiejętne wykorzystanie narzędzi typowych dla diagnostyki technicznej. Jest to widoczne przede wszystkim na etapie diagnozowania przyczyn hałaśliwości, sprowadzającym się do wskazania dominujących źródeł dźwięku oraz ustalenia dróg propagacji energii wibroakustycznej.

Szeroko wykorzystywanym narzędziem jest modelowanie. Można zaryzykować tezę, że większość współczesnych wibroakustycznych metod wnioskowania o stanie technicznym bazuje na modelowej analizie zjawisk związanych z pracą

maszyn. Ilustracją powyższej tezy jest tok postępowania na przykład podczas wykrywania doraźnych uszkodzeń łożysk tocznych lub w diagnostyce zazębień.

Tradycyjnie do innej grupy zastosowań kwalifikowane są modele opracowane na potrzeby konstrukcji maszyn. Niemniej obecnie coraz trudniej pominąć zagadnienia eksploatacyjne w procesie konstruowania, co modyfikuje między innymi podejście do modelowania. Współcześnie coraz częściej elementy konstrukcyjne integrują się eksploatacyjnymi, w tym diagnostycznymi. Znakomitym przykładem są działania poprawiające komfort obsługi maszyn.

¹ Praca powstała podczas realizacji Projektu Badawczego Nr 7 T07C 038 17 finansowanego przez KBN

Zachęcające rezultaty uzyskane podczas badań pilotażowych nad wykorzystaniem nowego typu materiałów gumowych o strukturze ziarnistej jako elementów dźwiękoizolacyjnych [3] uzasadniły podjęcie próby opracowania metodyki doboru i stosowania tych materiałów w zadaniu minimalizacji uciążliwości wibroakustycznej maszyn. Za podstawę przyjęty został ogólny model propagacji energii wibroakustycznej [2]. Uszczegółowienie tego modelu i jego identyfikacja wykonana na bazie wyników badań laboratoryjnych [3] pozwoliły zaproponować metodę prognozowania klimatu akustycznego po przeprowadzeniu modyfikacji konstrukcyjnych służących ograniczeniu aktywności wibroakustycznej [4].

Bazując na opracowanej metodyce przeanalizowano przyczyny uciążliwego hałasu oraz zaproponowano modyfikację wybranych węzłów konstrukcyjnych, co pozwoliło istotnie zredukować dźwięki postrzegane przez kierowcę jako dokuczliwe. W dalszej części artykułu opisano tok

postępowania prowadzący do poprawy klimatu akustycznego w kabinie kierowcy.

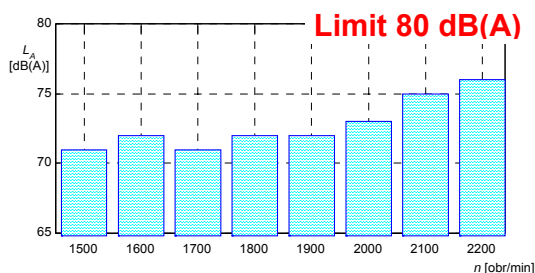
2. PREZENTACJA OBIEKTU

Fotografia poniżej (rys. 1) przedstawia fabrycznie nowy samochód ciężarowy marki VOLVO typu FL6 wyposażony w kabinę z typoszeregu stworzonego dla pojazdów cięższych (nieco większą od standardowej) oraz układ napędowy dostosowany do jazdy szosowej na długich dystansach. Był to bezawaryjny egzemplarz o niewielkim przebiegu, którego bezpośredni użytkownik (kierowca) uskarżał się na dokuczliwe dźwięki występujące podczas jazdy z prędkościami drogowymi. Na podstawie informacji przedstawiciela producenta ustalono, że podobnych zjawisk nie sygnalizowano w innych egzemplarzach tego modelu. Jest to więc cecha osobnicza, prawdopodobnie wynikająca z wysokiej indywidualizacji konkretnej maszyny.



Rys. 1. Obiekt badań

Wyniki pomiarów hałasu w kabinie podczas rozpędzania samochodu pokazują, że w rozważanym przypadku nie mamy do czynienia z przekroczeniem limitów normowych (rys. 2). Niemniej zauważono charakterystyczny dźwięk, który na dłuższą metę może być uciążliwy. Zarazem nie stwierdzono żadnych innych symptomów mogących sugerować wadliwe funkcjonowanie maszyny.



Rys. 2. Hałas w kabinie podczas jazdy

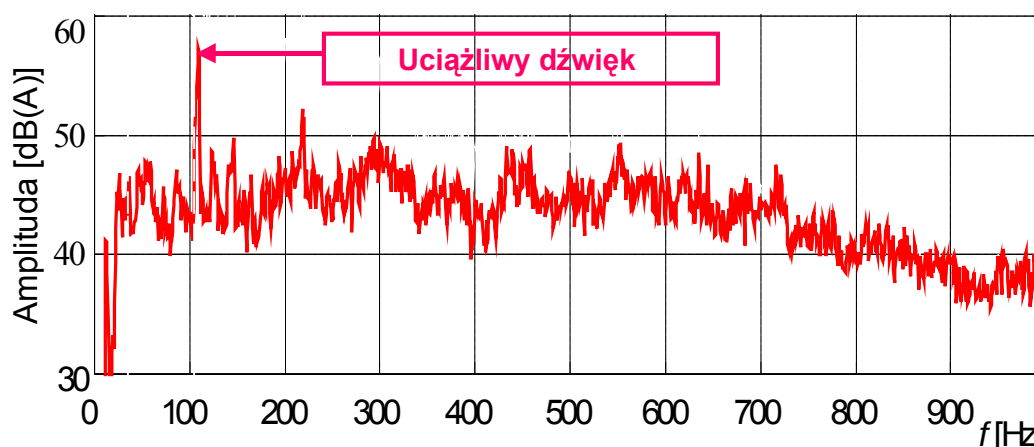
3. ANALIZA WYMUSZEŃ

Podstawowym zadaniem diagnostycznym w procesie eliminacji niepożądanych efektów akustycznych było wskazanie elementów odpowiedzialnych za ich generację.

Samochód ciężarowy stanowi dość złożoną strukturę mechaniczną z wieloma źródłami wymuszeń wibroakustycznych i skomplikowaną propagacją sygnałów. Analiza modelu przedstawionego w [4] pozwoliła ze względu na charakter uciążliwości odrzucić źródła nieskorelowane. Wytypowano zespół napędowy jako prawdopodobne źródło dokuczliwych dźwięków. W celu weryfikacji tej hipotezy wykonano eksperyment symulujący jazdę na kolejnych biegach z uniesionymi kołami napędowymi, podczas którego badano hałas w kabinie oraz drgania łąp silnika i ramy. Nie udało się jednak na bazie uzyskanych rezultatów wyjaśnić pochodzenia uciążliwych dźwięków: podczas jazdy symulowanej zjawisko nie występowało.

W tej sytuacji okazało się niezbędne rozszerzenie eksperymentu o badania drogowe. Podczas jazdy na kolejnych biegach z różnymi prędkościami zarejestrowano przebiegi czasowe hałasu w kabinie oraz przyspieszeń drgań kilku punktów podwozia i zespołu napędowego.

Na rysunku 3 przedstawiono widmo hałasu w kabinie skorygowane charakterystyką ucha ludzkiego (tak zwana korekcja A) uzyskane podczas jazdy z prędkością około 110 km/h, co odpowiadało prędkości obrotowej silnika około 2100 obr./min. Dominuje tu składowa o częstotliwości około 105 Hz, tłumaczająca obecność charakterystycznego dźwięku. Można ją zidentyfikować jako tak zwaną częstotliwość zapłonu sześciocyndrowego silnika czterosuwowego. Zatem źródłem tej składowej jest silnik napędowy.



Rys. 3. Widmo hałasu w kabinie przy prędkości 110 km/h

4. GŁÓWNA DROGA PROPAGACJI

Porównanie widm przyspieszeń drgań łąpy silnika oraz ramy pod łąpą (rysunek 4) prowadzi do wniosku o skutecznej wibroizolacji zespołu napędowego. Wyklucza to jednocześnie istotny wpływ propagacji drgań przez główne elementy konstrukcyjne pojazdu.

Dalsza analiza materiału badawczego pokazała, że na składową dominującą w strukturze hałasu odbieranego przez kierowcę niewielki wpływ mają dźwięki przenoszone bezpośrednio przez powietrze. Okazało się natomiast, iż w rozważanym przypadku drgające elementy kabiny są wtórnymi źródłami hałasu.

Kolejnym badaniem węzłem konstrukcyjnym stał się zewnętrzny mechanizm zmiany biegów. Podparcie dźwigni zmiany biegów jest mocowane bezpośrednio do podłogi kabiny, co stwarza dodatkowe możliwości propagacji drgań. Okazało

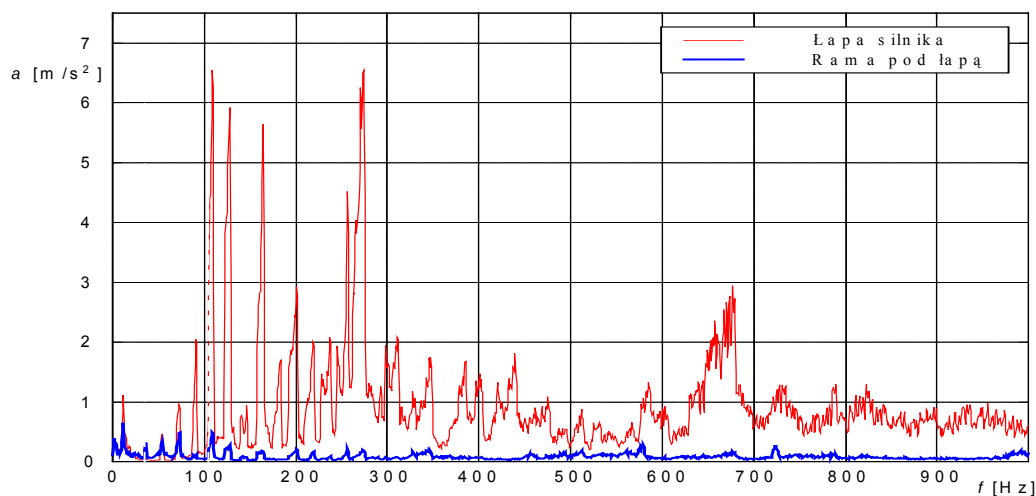
się, że widmo przyspieszeń drgań końcówki drążka zmiany biegów (rysunek 5) ma podobną strukturę do widma drgań łąpy silnika, lecz wartości amplitud składowych są wyższe. Wskazuje to jednoznacznie mechanizm zmiany biegów jako główną drogę propagacji energii wibroakustycznej między silnikiem a kabiną kierowcy.

5. IZOLACJA WIBROAKUSTYCZNA

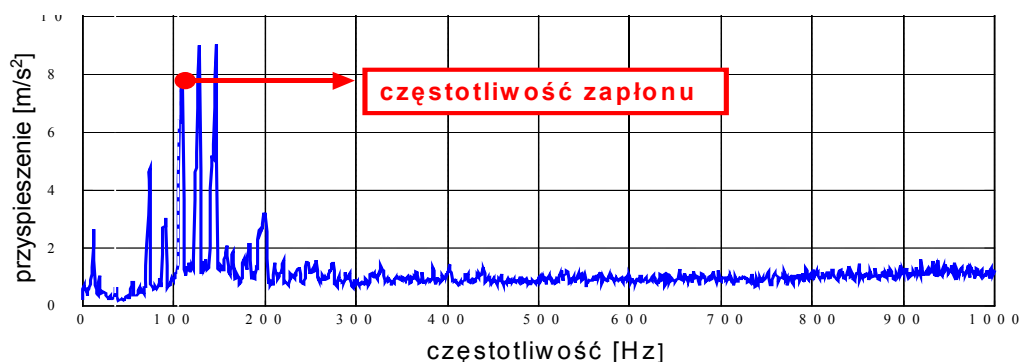
Z przedstawionych powyżej rozważań wynika, że kluczowe znaczenie dla poprawy klimatu akustycznego w kabinie kierowcy ma eliminacja głównej drogi propagacji energii wibroakustycznej, a przynajmniej ograniczenie drgań przenoszonych na podłogę kabiny przez mechanizm zmiany biegów. Cel taki można zrealizować kilkoma sposobami. Najlepsze efekty powinna dać likwidacja drążka zmiany biegów i wprowadzenia elektrycznego lub hydrostatycznego sterowania

zmianą biegów. Znane są również cięgnowe układy sterujące. Niektórzy producenci dużych ciągników siodłowych stosują mechanizm zmiany biegów

związany z podwoziem i zespołem napędowym, gdzie dźwignia zmiany biegów nie styka się bezpośrednio z podłogą kabiny.

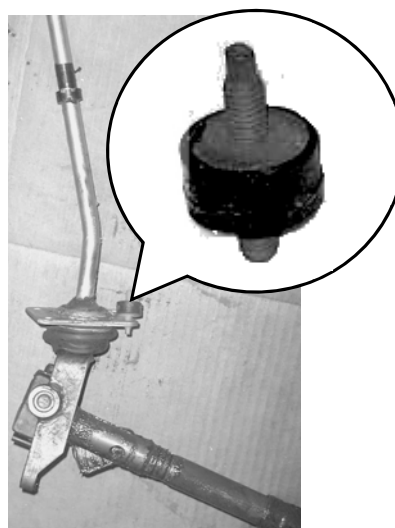


Rys. 4. Drgania silnika podczas jazdy



Rys. 5. Widmo drgań drążka zmiany biegów

Zaprezentowane rozwiązania konstrukcyjne w normalnym trybie winny być rozważane przed wdrożeniem do produkcji, na etapie doskonalenia prototypu. W rozważanym przypadku obiektem analiz był gotowy, wysoce zindywidualizowany produkt, dla którego brakowało przesłanek ekonomicznych do tak głębokich zmian konstrukcyjnych. Wobec tego jedyną możliwą receptą na poprawę komfortu pracy kierowcy było wprowadzenie do istniejącego mechanizmu barier dla propagacji energii wibroakustycznej. Bazując na rezultatach uzyskanych podczas realizacji projektu badawczego zaproponowano zwiększenie sztywności drążka zmiany biegów oraz wykonanie izolacji wibroakustycznej podparcia dźwigni w podłodze kabiny przy wykorzystaniu elementów z gumy o drobnym ziarnie i ściśle określonym wypełnieniu. Propozycja ta pozwala zweryfikować w praktyce metodykę postępowania opisaną w [4]. Zastosowane rozwiązanie konstrukcyjne przedstawiono na zdjęciu (rysunek 6); użyto czterech identycznych elementów izolacyjnych.



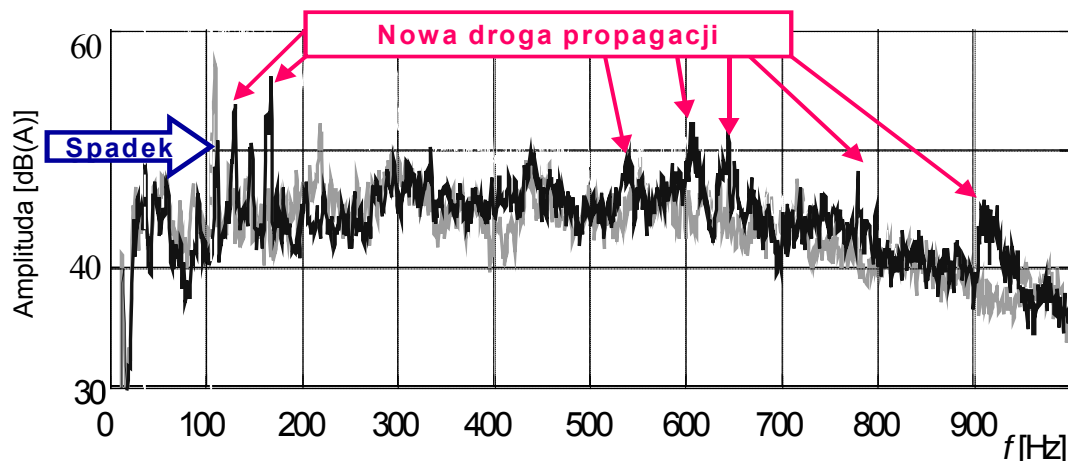
Rys. 6. Wibroizolacja mocowania dźwigni zmiany biegów

6. WERYFIKACJA EKSPERYMENTALNA

Efektywność wykonanej modernizacji zbadano podczas jazdy po szosie. Subiektywne odczucia kierowcy potwierdziły skuteczną eliminację uciążliwych dźwięków. Taki efekt jest uzasadniony strukturą częstotliwościowej sygnału akustycznego

w kabinie kierowcy.

Porównanie skorygowanych charakterystyk ucha ludzkiego (korekcja A) widm zarejestrowanych w obu cyklach badań drogowych (wersja pierwotna i zmodyfikowana) podczas jazdy z prędkością około 110 km/h przedstawiono na rysunku 7.

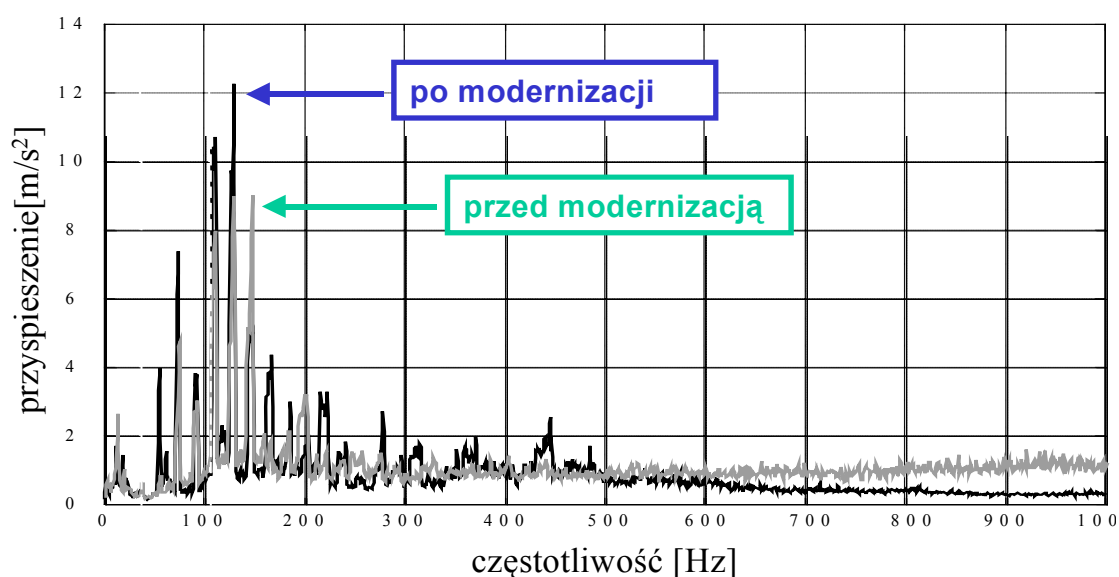


Rys. 7. Wpływ modernizacji na widmo hałasu w kabinie

Zmiany konstrukcyjne spowodowały istotne obniżenie amplitudy składowej o częstotliwości zapłonu silnika (około 105 Hz). Jednocześnie pojawiły się harmoniczne o nieco wyższych częstotliwościach; struktura widmowa hałasu w kabinie upodobniła się tutaj do widma drgań silnika (rysunek 4).

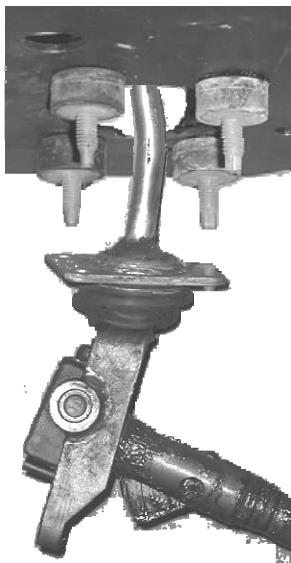
Jak widać podjęte kroki doprowadziły do skutecznej eliminacji dźwięków uznanych za uciążliwe. Niemniej uaktywniła się nowa droga propagacji, odpowiedzialna za wzrost amplitud

dźwięków o nieco wyższych częstotliwościach. Częściowym wytłumaczeniem takich efektów jest celowe przesunięcie strefy rezonansu drążka zmiany biegów w kierunku wyższych częstotliwości spowodowane jego większą sztywnością. Podatne elementy wibroizolacyjne między podłogą kabiny a podparciem dźwigni zmiany biegów umożliwiły względny ruch tych zespołów, co w rezultacie spowodowało wzrost amplitudy przyspieszeń drgań końcówki drążka (rysunek 8).



Rys. 8. Wpływ modernizacji na drgania drążka zmiany biegów

Przedstawione rezultaty nie stanowiły jednak bezpośredniej przyczyny zmiany struktury hałasu w kabinie, bowiem właściwie zaprojektowana wibroizolacja podparcia dźwigni zmiany biegów doprowadziła do istotnego obniżenia drgań przenoszonych na podłogę kabiny w całym zakresie częstotliwości. Niemniej odsunięcie podparcia od podłogi poskutkowało pojawieniem się szczeliny powietrznej, która otworzyła nową drogę propagacji fali akustycznej do wnętrza kabiny. Na kolejnym rysunku (rys. 9) uwidocznił ten szczegół konstrukcyjny.



Rys. 9. Nowa droga propagacji sygnału akustycznego

Brak bezpośredniej przegrody akustycznej o powierzchni kilkunastu centymetrów kwadratowych umożliwił łatwą propagację wyższych składowych, co spowodowało, że wypadkowy poziom ciśnienia akustycznego w kabinie korygowany według charakterystyki ucha ludzkiego zmalał po modernizacji tylko nieznacznie (o około 0.5 dB(A)).

7. PODSUMOWANIE

Jak widać na przedstawionym przykładzie, właściwe wykorzystanie materiałów gumowych o strukturze ziarnistej prowadzi do minimalizacji uciążliwości akustycznej maszyn. Zastosowana metodyka pozwoliła ustalić przyczyny i w sposób selektywny wyeliminować skutecznie uciążliwy dźwięk. Skuteczność rozwiązań jest przyczynkiem do weryfikacji opracowanych algorytmów.

W konkretnym przypadku likwidacja głównej drogi propagacji energii wibroakustycznej uaktywniła nowe czynniki rzutujące na niewielkie obniżenie wypadkowego poziomu dźwięku. Trzeba podkreślić jednak eliminację uciążliwości przez zamierzoną zmianę struktury częstotliwościowej sygnału akustycznego. Mimo uznania rezultatów za

satisfakcjonujące wskazano kolejne możliwości dalszej poprawy klimatu akustycznego w kabinie pod warunkiem konsekwentnego stosowania przyjętych rozwiązań metodycznych.

8. LITERATURA

- [1] Dąbrowski Z. The Evaluation of the Vibroacoustic Activity for the Needs of Constructing and Use of Machines. Machine Dynamics Problems, Warsaw, 1992, Vol. 4.
- [2] Dąbrowski Z., Radkowski S., Dziurdź J., Dybała J., Mączak J., Tomaszek S.: Kształtowanie właściwości wibroakustycznych elementów i zespołów maszyn (uwagi metodyczne), Warszawa 2000 (ISBN 83-912190-4-6).
- [3] Klekot G., Study of Influence of the Flat Barriers on Sound Propagation, The 8th International Congress on Sound and Vibration, Hong Kong 2001.
- [4] Klekot G., Identyfikacja parametrów i weryfikacja modelu na przykładzie badań nad wykorzystaniem materiałów o strukturze ziarnistej do minimalizacji drgań i hałasu konstrukcji, Przegląd Mechaniczny, nr 3 2002 Warszawa.
- [5] Osiński Z. (red.): Tłumienie drgań, PWN, Warszawa 1997.



Dr inż. Grzegorz Klekot ukończył Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej w 1984 roku. Stopień doktora nauk technicznych w zakresie budowy i eksploatacji maszyn uzyskał w 1993r. Jest adiunktem w Instytucie Podstaw Budowy Maszyn na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej. Wykłada Podstawy Konstrukcji Maszyn i kieruje laboratorium podstaw pomiarów wielkości dynamicznych.

Od 1996 roku jako auditor techniczny współpracuje z Polskim Centrum Akredytacji (do 2000 r. Polskie Centrum Badań i Certyfikacji). Na potrzeby krajowego systemu akredytacji bierze udział w ocenach kompetencji laboratoriów wibroakustycznych.

Zainteresowania naukowe koncentruje na szeroko pojętych zagadnieniach diagnostyki wibroakustycznej i cichobieżności maszyn. Uczestniczy w pracach zespołu Pracowni Wibroakustyki, jest autorem szeregu artykułów fachowych, współautorem kilku monografii oraz współtwórcą dwóch opatentowanych opracowań.

WPŁYW INTERPOLACJI NA PROCEDURĘ LINIOWEJ DECYMACJI

Jan ADAMCZYK
Piotr KRZYWORZEKA
Witold CIOCH

Katedra Mechaniki i Wibroakustyki
Akademia Górniczo-Hutnicza
Al. Mickiewicza 30, 30-065 Kraków
cioch@agh.edu.pl

Streszczenie

Postać widmowa nadaje się do analizy sygnałów stacjonarnych. Procedura liniowej decymacji (PLD) sprowadza sygnał przy zmiennej prędkości obrotowej do postaci odpowiadającej stałym obrotom. W opracowaniu przedstawiono opis matematyczny i wyprowadzenie oryginalnej PLD. Zapis algorytmiczny, który zamieszczono umożliwia tworzenia implementacji programowych. Pokazano możliwości stosowania metod interpolacyjnych w PLD. Wyniki w postaci widm amplitudowych przemieszczeń drgań wału na wybiegu dla omawianych metod przedstawiono w zestawieniu graficznym. W opracowaniu podkreślono wpływ wartości współczynnika decymacji na selektywność widmową.

Słowa kluczowe: sygnał niestacjonarny, decymacja.

Interpolation Influence in Linear Decimation Procedure

Summary

Nonstationary signals cannot be analysed using the spectrum analysis methods. A Linear Decimation Procedure transforms signals measured for a changeable rotational speed into signals corresponding to the constant speed. In this article a mathematical description and derivation of the original LDP were presented. An algorithmic notation of the method allows to create program implementations. Also the possibilities of the usage of interpolation methods for PLD were presented. The obtained results, in the form of the amplitude spectrums of the shaft vibration displacement during rotor run-down, for the methods presented in this article were graphically presented. In this article the influence of the decimation ratio on spectral selectivity was emphasised.

Key words: nonstationary signals, decimation

1. Analiza sygnałów niestacjonarnych

Zmienne warunki pracy powodują trudności w diagnozowaniu przy użyciu analizy opartej o widmo amplitudowe. Trudności te są związane z tym, że prosta postać widmowa nadaje się do analizy sygnałów stacjonarnych. Diagnozowanie w zmiennych warunkach pracy powoduje rozmywanie się widma czego efektem jest brak selektywności prążków odpowiadających poszczególnym harmonikom częstości obrotowej. Poniżej zademonstrowano oryginalną procedurę decymacji umożliwiającą przedstawienie sygnału niestacjonarnego (zmienna prędkość obrotowa) w postaci stacjonarnej, poprawiając selektywność widmową. Procedura liniowej decymacji (PLD) polega na powtórным przepróbkowaniu sygnału z liniowo zmiennym współczynnikiem decymacji doprowadzając do stałej liczby próbek na cykl. Procedura ta została szerzej przedstawiona w pracach [1][2][3][4][5].

2. Procedura liniowej decymacji

Z twierdzenia Kotelnikowa-Shannona wynika kryterium określania okresu próbkowania, a w konsekwencji częstotliwości próbkowania zwanej częstotliwością Nequista.

Dla procedur decymacyjnych wartość częstotliwości próbkowania powinna spełniać:

$$f_s > 2f_{\max} Dc \quad (1)$$

gdzie:

- f_s - częstotliwość próbkowania,
- $f_{\max}$ - górna częstotliwość analizowanego pasma sygnału,
- Dc - wartość współczynnika decymacji.

Pasmo sygnału powinno być ograniczone filtracją dolnoprzepustową do częstotliwości poniżej $f_{\max}$. Dla tak określonej częstotliwości próbkowania ilość próbek okna obserwacji wyznacza zależność:

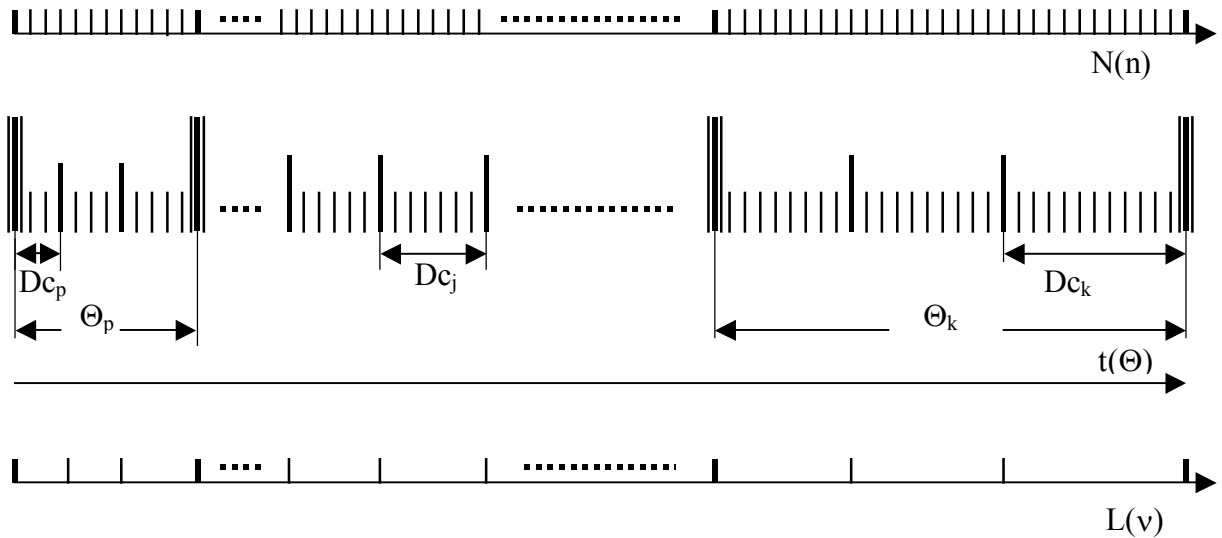
$$N = \frac{f_s}{r} \quad (2)$$

Ostatecznie ze względu na poprawność działania FFT ilość próbek okna obserwacji określa wzór (3), gdzie N jest potęgą cyfry 2:

gdzie:

r- wymagana rozdzielczość widmowa

$$N = 2^k \geq \frac{f_s}{r}, \quad k \in \mathbb{C} \quad (3)$$



Rys. 1. Procedura liniowej decymacji

Θ - czas cyklu

$t(\Theta)$ - czas obserwacji

$N(n)$ - pierwotny zbiór próbek w oknie obserwacji

$L(v)$ - wtórny zbiór próbek w oknie obserwacji (po PLD)

Dc_p - początkowy współczynnik decymacji

Dc_k - końcowy współczynnik decymacji

3. Wyznaczenie współczynnika decymacji

Określenie współczynnika decymacji Dc jest kluczowym elementem PLD. Określa on krok z jakim przepróbkowywany jest sygnał. Jest on zgodny z przyrostem lub spadkiem prędkości obrotowej tzn. ze zmianą cyklu.

Zakładając końcowy współczynnik decymacji Dc_k można wyznaczyć ilość próbek w ostatnim cyklu okna obserwacji po zastosowaniu przepróbkowania. Wybór stałego końcowego współczynnika decymacji umożliwia sprowadzenie sygnału do stacjonarności w oknie obserwacji dla ostatniego cyklu, co jest przy analizie w czasie rzeczywistym dogodnie.

$$L_{\Theta k} = \frac{N_{\Theta k}}{Dc_k} \quad (4)$$

gdzie:

$L_{\Theta k}$ - ilość próbek ostatniego cyklu okna obserwacji nowo powstałego wektora

$N_{\Theta k}$ - ilość próbek ostatniego cyklu okna obserwacji sygnału pierwotnego

Dc_k - założony końcowy współczynnik decymacji

Ponieważ ilość próbek musi być stała na cykl w nowo powstałym wektorze – przebieg stacjonarny -

$$L_{\Theta j} = L_{\Theta k} = L_{\Theta p} = \text{const} \quad (5)$$

$L_{\Theta j}$ - ilość próbek w j-tym cyklu przepróbkowanego wektora

początkowy współczynnik decymacji możemy wyznaczyć z zależności:

$$Dc_p = \frac{N_{\Theta p}}{L_{\Theta k}} = Dc_k \frac{N_{\Theta p}}{N_{\Theta k}} \quad (6)$$

Zakładając liniową zmianę współczynnika decymacji zgodnie z wykresem 2 wyznaczamy współczynniki decymacji Dc_n dla $n \in [0, n_{Dk}]$, gdzie

ADAMCZYK, KRZYWORZEKA, CIOCH, *Wpływ interpolacji na procedurę liniowej...*

n odpowiada numerom próbek wektora pierwotnego podlegającym PLD.

$$Dc_n = Dc_p + \Delta Dc_n \quad (7)$$

$$\frac{\Delta Dc_n}{\Delta Dc} = \frac{n}{n_{Dk}} \quad (8)$$

gdzie:

$$n_{Dk} = n_k - Dc_k \quad (9)$$

n_{Dk} – numer próbki umożliwiający zakończenie PLD w zakresie wektora pierwotnego

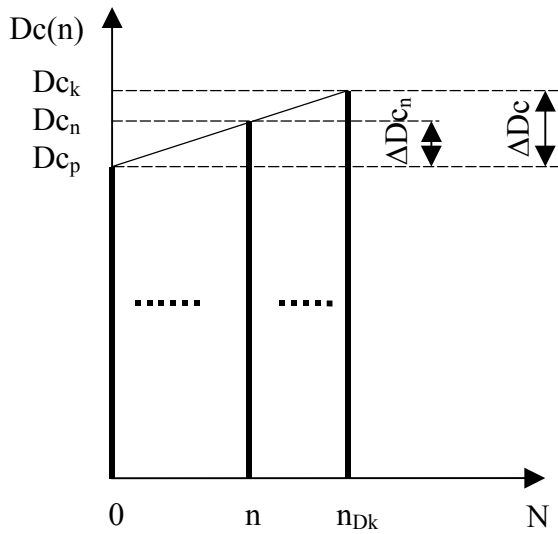
n_k – numer ostatniej próbki okna obserwacji

stąd:

$$\Delta Dc_n = \frac{n}{n_{Dk}} \Delta Dc \quad (10)$$

Wstawiając (6) i (10) do (7) otrzymujemy:

$$Dc_n = Dc_k \frac{N_{\Theta p}}{N_{\Theta k}} + \frac{n}{n_{Dk}} (Dc_k - Dc_p) \quad (11)$$

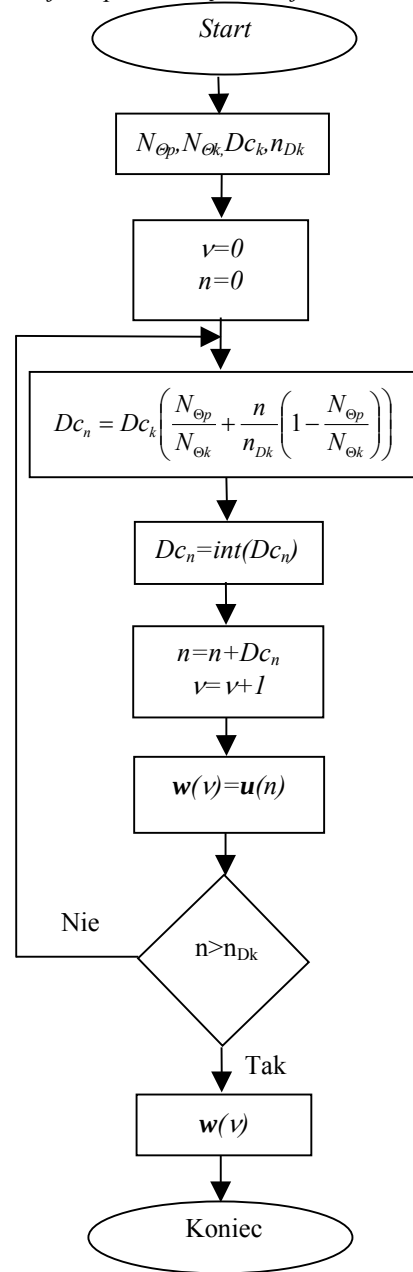


Rys. 2. Wyznaczenie współczynnika decymacji w zależności od numeru próbki wektora pierwotnego

Ostatecznie można procedurę wyznaczania współczynnika decymacji zapisać w postaci:

$$Dc_n = Dc_k \left(\frac{N_{\Theta p}}{N_{\Theta k}} + \frac{n}{n_{Dk}} \left(1 - \frac{N_{\Theta p}}{N_{\Theta k}} \right) \right) \quad (12)$$

Realizację dynamicznego przepróbkowania sygnału przedstawia algorytm pętli PLD na rys. 3.



Rys. 3. Algorytm PLD
 $u(n)$ – wektor pierwotny
 $w(v)$ – wektor wtórny

dla $n=0$

$$Dc_n = Dc_k \left(\frac{N_{\Theta p}}{N_{\Theta k}} \right) = Dc_p \quad (13)$$

$$w(1) = u(Dc_p) \quad (14)$$

dla $n=n_{Dk}$

$$Dc_n = Dc_k \left[\frac{N_{\Theta p}}{N_{\Theta k}} + \frac{N_{\Theta k} - N_{\Theta p}}{N_{\Theta k}} \right] = Dc_k \quad (15)$$

$$w(v_k) = u(n_{Dk} + Dc_k) = u(n_k) \quad (16)$$

gdzie:

$u(n)$ – wektor pierwotny

$w(v)$ – wektor wtórny (przepróbkowany)

Jeśli numer ostatniej próbki poddanej PLD nie jest równy n_k , procedura umożliwia zakończenie decymacji w zakresie wektora pierwotnego.

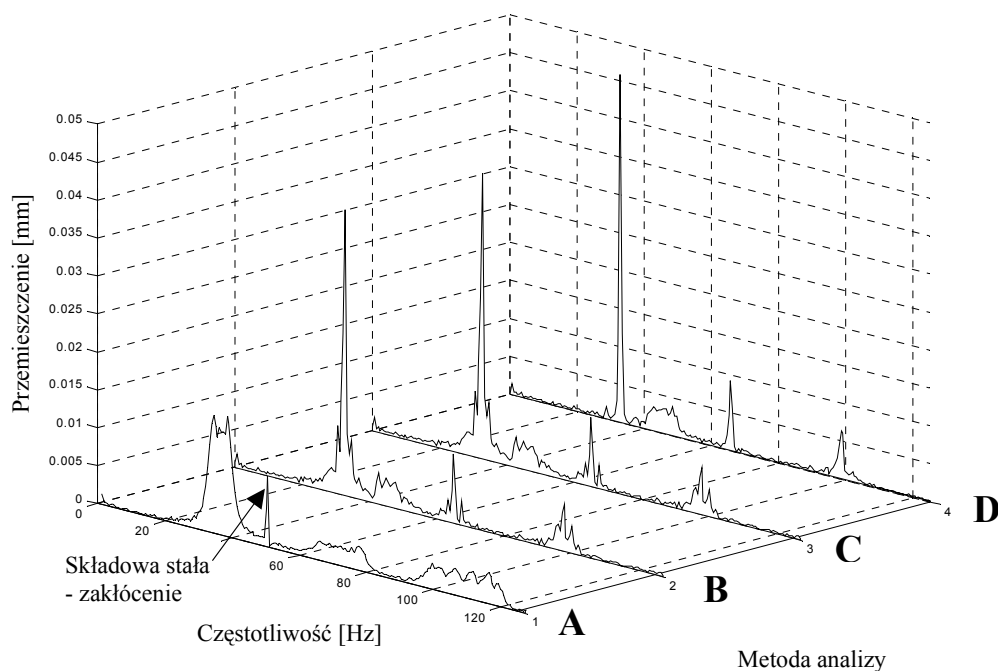
Przyjmowanie przez współczynnik decymacji wartości całkowitych konieczne jest do wyboru kolejnych próbek (numer próbki) z wektora pierwotnego. Zaokrąglanie można zastąpić obliczaniem wartości nowego wektora przez zastosowanie interpolacji. Dla niecałkowitego współczynnika decymacji wartość nowej próbki jest wartością interpolowaną między wybranymi próbkami wektora pierwotnego. Postępowanie takie przybliża metodę do próbkowania zgodnego z chwilową wartością prędkości kątowej. W następnym punkcie (p. 4) przedstawiony zostanie wpływ zastosowania tego typu analizy na rozdzielczość widmową.

4 Metody interpolacyjne w PLD

Na rysunku 4 przedstawiono przykłady zastosowania PLD z wykorzystaniem interpolacji:

- widmo amplitudowe bez PLD;
- widmo amplitudowe z PLD, współczynnik decymacji $Dc_k=20$, Dc_n – liczba całkowita;
- widmo amplitudowe z PLD, współczynnik decymacji $Dc_k=20$, interpolacja sygnału dla Dc_n będącego liczbą niecałkowitą (dokładność 0.1);
- widmo amplitudowe z PLD, współczynnik decymacji $Dc_k=40$, Dc_n – liczba całkowita, dwukrotne nadpróbkowanie sygnału (interpolacja).

Widmo amplitudowe drgań przemieszczeń wału na wybiegu



Rys. 4. Widmo amplitudowe drgań przemieszczeń wału na wybiegu dla różnych metod analizy.

- widmo amplitudowe;
- widmo amplitudowe z PLD, $Dc_k=20$, $Dc_n \in \mathbb{C}$;
- widmo amplitudowe z PLD, $Dc_k=20$, $Dc_n \in \mathbb{R}$, dokładność 0,1 - interpolacja sygnału;
- widmo amplitudowe z PLD, $Dc_k=40$, $Dc_n \in \mathbb{C}$, dwukrotne nadpróbkowanie sygnału (interpolacja).

Porównując wykresy na rysunku 4 widać, że największa selektywność prążków jest na wykresie D otrzymanym dla współczynnika decymacji końcowej $Dc_k=40$. Dla otrzymania tego samego pasma widma (125 Hz) co przy analizie przy

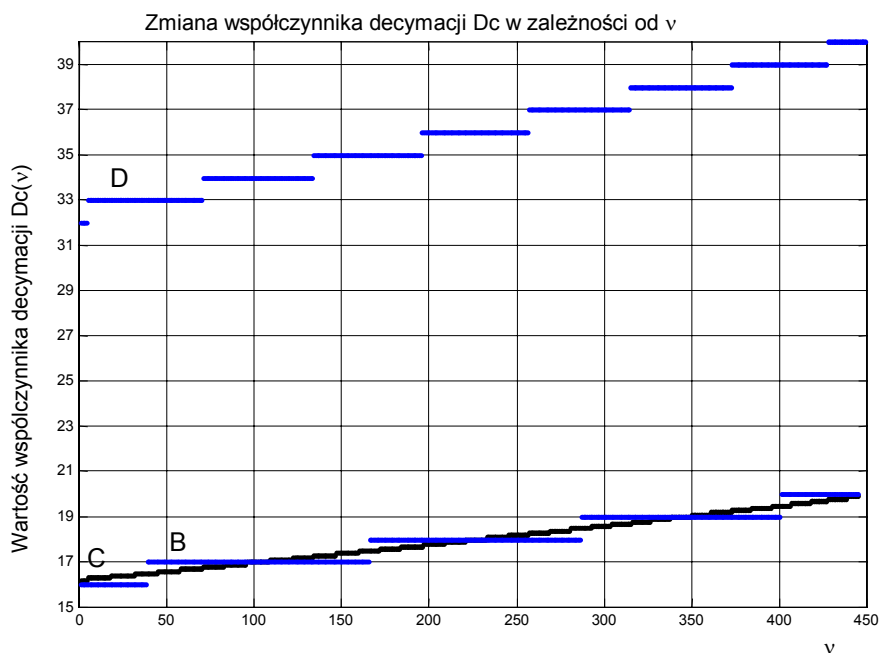
mniejszym współczynniku decymacji $Dc_k=20$ (wykres B i C) należy dokonać dwukrotnego nadpróbkowania sygnału. Jeśli sygnał jest już zarejestrowany można to zrealizować zwiększając sztucznie częstotliwość próbkowania przez

zastosowanie interpolacji. Przy stosowaniu metod interpolacyjnych zalecane jest wcześniejsze przefiltrowanie sygnału filtrem dolnoprzepustowym, co stanowi regułę wszelkich procedur decymacyjnych [6].

Zastosowanie metody interpolacji wartości sygnału dla niecałkowitych współczynników decymacji (wykres C) z dokładnością współczynnika 0.1 nie powoduje widocznej poprawy jakościowej widma

(porównaj z wykresem B).

Na rysunku 5 przedstawiono wartości współczynnika decymacji odpowiadające kolejnym próbkom wektora wtórnego $Dc_n(v)$



Rys. 5. Wartość współczynnika decymacji w zależności od próbek wektora wtórnego v dla metod z rys. 4.

Wnioski

1. Procedura PLD nie wymaga złożonych obliczeń i jest prosta w implementacji on-line.
2. Metod PLD eliminując liniowy trend cyklu zachowuje jego fluktuacje w przedziale transformacji. Zachowuje zatem informacje o ewentualnych modulacjach kąta [4].
3. Procedura nie wymaga dokładnego śledzenia kąta obrotu.
4. Zadowalające rezultaty otrzymuje się już przy $Dc_k=20$. Dodatkową poprawę selektywności widma można otrzymać przez zwiększenie wartości współczynnika decymacji.
5. Zwiększenie dokładności odwzorowania przez zastosowanie interpolacji sygnału dla niecałkowitych współczynników decymacji (śledzenie kąta obrotu) nie poprawia w znaczący sposób selektywności widmowej.

Oznaczenia

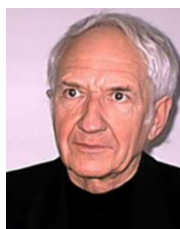
PLD - procedura liniowej decymacji,
 $u(n)$ - wektor pierwotny sygnału,
 $w(v)$ - wektor wtórny sygnału,
 $N(n)$ - pierwotny zbiór próbek,

$L(v)$ - wtórny zbiór próbek,
 n - numer próbki wektora pierwotnego,
 n_k - numer ostatniej próbki wektora pierwotnego (ilość próbek okna obserwacji),
 n_{DK} - numer próbki umożliwiający zakończenie PLD w zakresie wektora pierwotnego,
 v_k - numer ostatniej próbki wektora wtórnego,
 Dc_k - końcowy współczynnik decymacji,
 Dc_p - początkowy współczynnik decymacji,
 Dc_n - współczynnik decymacji odpowiadający n -tej próbce wektora pierwotnego,
 $t(\Theta)$ - czas obserwacji,
 Θ - czas cyklu,
 Θ_p - cykl początkowy okna obserwacji
 Θ_k - cykl końcowy okna obserwacji
 $N_{\Theta p}$ - ilość próbek początkowego cyklu okna obserwacji,
 $N_{\Theta k}$ - ilość próbek końcowego cyklu okna obserwacji,
 $L_{\Theta p}$ - ilość próbek początkowego cyklu okna obserwacji wektora wtórnego,
 $L_{\Theta k}$ - ilość próbek końcowego cyklu okna obserwacji wektora wtórnego,
 $L_{\Theta j}$ - ilość próbek j -tego cyklu wektora wtórnego.

Literatura

- [1] Adamczyk J., Krzyworzecka P., Łopacz H.: Systemy synchronicznego przetwarzania sygnałów diagnostycznych. Collegium Columbinum, Kraków, 1999.
- [2] Adamczyk J., Krzyworzecka P., Cioch W.: Wykorzystanie decymacji dynamicznej w diagnozowaniu maszyn. Mat XXVIII Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Z.N. Pol. Śl. Katowice 2001.
- [3] Adamczyk J., Cioch W., Krzyworzecka P.: Wpływ dynamicznej decymacji sygnału drganiowego na wykrywalność stanu krytycznego maszyn wirnikowych w nieustalonych warunkach pracy. II International Scientifically – Technical Conference EXPLO-DIESEL & GAS TURBINE '01, Gdańsk-Miedzydroje-Kopenhaga.
- [4] Krzyworzecka P.: Synchroniczne wspomaganie odwzorowań diagnostycznych. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo – Dydaktyczne, Kraków 2001.
- [5] Krzyworzecka P., Cioch W.: Dynamiczna kompensacja wpływu zmian długości cyklu na sygnał drganiowy. Mat XXVII Sympozjum Diagnostyka Maszyn, z. 1, Z.N. Pol. Śl. Katowice 2000.
- [6] Lyons R. G.: Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów, WKŁ, W-wa, 1999.

Pracę zrealizowano w ramach projektu badawczego KBN nr 7 T07B 05318.



Prof. dr hab. inż. Jan Adamczyk jest absolwentem Wydziału Maszyn Górniczych i Hutniczych Akademii Górniczo-Hutniczej 1962 r. Na tym Wydziale w 1971 r. obronił pracę doktorską uzyskując stopień doktora o specjalności mechanika stosowana, a w 1979 r. uzyskał stopień doktora habilitowanego. W 1991 r. otrzymał tytuł profesora nauk technicznych w specjalności: mechanika stosowana, wibroakustyka i inżynieria dźwięku, diagnostyka techniczna. Jest autorem około 140 publikacji w tym 9 podręczników i monografii. Zajmuje się diagnostyką maszyn i urządzeń za pomocą analizy sygnałów wibroakustycznych, dynamiką maszyn oraz modelowaniem dynamicznym układów mechanicznych ze względu na drgania układów liniowych i nieliniowych. Wiele prac poświęcił ograniczaniu emisji energii wibroakustycznej, zabezpieczeniom akustycznym i antywibracyjnym, oraz nagłaśnianiu pomieszczeń.



Dr inż. Piotr Krzyworzecka studiował na Wydziale Elektryfikacji Górnictwa i Hutnictwa AGH uzyskując w roku 1964 dyplom magistra inżyniera elektryka o specjalności automatyka, a w roku 1972 doktorat z zakresu diagnostyki technicznej. Pracuje na tejże uczelni do dziś, początkowo w Katedrze Maszyn i Pomiarów Elektrycznych, potem (od 1987) w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki. Jest autorem ok. 60 publikacji, głównie o tematyce diagnostycznej, rzeczoznawcą SEP w zakresie elektroakustyki, sekretarzem Polskiej Sekcji Audio Engineering Society, a także członkiem PTDT od momentu jego powstania.



Mgr inż. Witold Cioch jest absolwentem Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej 1996 r., gdzie otrzymał dyplom magistra inżyniera mechanika o specjalności napędy lotnicze i Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej 1998 r., gdzie uzyskał dyplom magistra inżyniera o specjalności wibroakustyka. Obecnie jest doktorantem w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki AGH. Autor 20 publikacji z tematyki diagnostyki technicznej i szeroko rozumianej wibroakustyki. Zajmuje się zagadnieniami cyfrowego przetwarzania sygnałów diagnostycznych, sieciami neuronowymi i analizą ryzyka eksploatacyjnego.

WYKORZYSTANIE SIECI NEURONOWEJ DO DIAGNOZOWANIA WYBRANYCH NIESPRAWNOŚCI SILNIKA OKRĘTOWEGO

Rafał PAWLETKO

Katedra Siłowni Okrętowych Wydziału Mechanicznego
Akademii Morskiej w Gdyni
ul. Morska 83, 81-225 Gdynia; tel. (58) 690-13-05, e-mail: pawletko@am.gdynia.pl

Streszczenie

Tematem publikacji jest próba określenia przydatności sieci neuronowych do diagnozowania wybranych niesprawności silnika okrętowego. Weryfikację doświadczalną zaproponowanego algorytmu diagnostycznego przeprowadzono na symulatorze Turbo Diesel 2.0, zainstalowanym w Katedrze Siłowni Okrętowych Akademii Morskiej w Gdyni.

Słowa kluczowe: diagnostyka, silniki spalinowe, sieci neuronowe.

THE NEURAL NETWORKS APPLICATION IN THE MARINE DIESEL ENGINE DIAGNOSTICS

Summary

The paper presents the new possibilities offered by neural networks when applied to the diesel engine diagnostics. The experience data has been collected during the test at the Turbo Diesel 2.0 diagnostic simulator, which has been installed in the Gdynia Maritime Academy. The proposed of the neural networks practical implementation has been include.

Key words: diagnostics, diesel engines, neural networks.

1. WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój konstrukcji nowoczesnych silników okrętowych, stwarza konieczność opracowania systemów diagnostycznych, które będą w stanie precyzyjnie określić ich stan techniczny. Istnieje wiele metod, które mogą zostać wykorzystane do budowy takiego systemu. Na szczególną uwagę, głównie z powodu możliwości wykorzystania danych eksperymentalnych na temat obiektu diagnozowania, zasługują algorytmy diagnostyczne oparte o techniki sieci neuronowych.

W artykule omawia się możliwości zastosowania sieci neuronowych jednokierunkowych w diagnozowaniu wybranych niesprawności silnika okrętowego. Ponieważ, symulowanie niesprawności na rzeczywistym silniku jest niezwykle kosztowne i czasochłonne, postanowiono wykorzystać do badań symulator diagnostyczny Turbo Diesel 2.0 zainstalowany w Katedrze Siłowni Okrętowych AM w Gdyni. Autor jest w pełni świadom ryzyka takiego podejścia, wynikającego przede wszystkim z problemu wiarygodności samego symulatora. Biorąc jednak pod uwagę fakt, że model symulatora oparty został na wynikach badań symulacyjnych przeprowadzonych na rzeczywistym silniku, oraz wstępny charakter eksperymentu, uznano go za odpowiedni do przeprowadzenia badań będących tematem niniejszego artykułu. Podejście polegające

na wykorzystaniu symulacji do badań diagnostycznych, można znaleźć też w pracy [6].

2. KONCEPCJA UŻYCIA SIECI NEURONOWEJ DO DIAGNOSTYKI SILNIKA OKRĘTOWEGO

W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania sieci neuronowych jednokierunkowych nazywanych perceptronami w diagnostyce silnika okrętowego. W sieciach tego typu neurony są zorganizowane w warstwy, wśród których wyróżnić można warstwę wejściową oraz wyjściową. Pozostałe noszą nazwę warstw ukrytych [11].

Założenie teoretyczne i przykłady zastosowań sieci neuronowych opisane zostały bardzo dokładnie w szeregu publikacji, do których należą między innymi prace [10] i [11].

Koncepcja wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do diagnostyki silnika polega na budowie neuronowego klasyfikatora stanów obiektu. Prawidłowo wytrenowana sieć neuronowa powinna klasyfikować stan silnika do odpowiednich grup niesprawności.

Innymi słowy, problem można traktować jako zadanie rozpoznawania obrazów. Przez obraz rozumie się określony stan techniczny obiektu, opisany za pomocą zbioru parametrów pracy.

Koncepcję zastosowania sieci neuronowych do diagnostyki silnika można sprowadzić do następujących zadań:

1. Określenie listy niesprawności.

W ramach badań będących tematem artykułu, zbiór niesprawności ograniczony został możliwościami symulatora Turbo Diesel 2.0 i obejmuje on:

- wybrane niesprawności układu doładowania (np.: zanieczyszczenie filtra powietrza, sprężarki powietrza doładowującego, turbiny gazowej, układu wydechowego i chłodnicy powietrza).
- wybrane niesprawności układu komory spalania i aparatury wtryskowej (np.: utrata szczelności komory spalania, wadliwa regulacja kąta wyprzedzenia wtrysku czy zużycie pary precyzyjnej pompy paliwowej).
- wybraną niesprawność układu korbowo-tłokowego (wzrost oporów tarcia).

Warto podkreślić, że wartości parametrów struktury dla w/w symulacji mogą każdorazowo być wybierane z pewnego zakresu i niemal dowolnie mieszane ze sobą. W praktyce jedynym występującym ograniczeniem jest zdolność silnika do pracy przy danej ilości i zakresie niesprawności.

2. Wyodrębnienie grupy typowych obrazów (stanów silnika) odpowiadających wybranym uszkodzeniom i stanom normalnej pracy. W opisywanym eksperymencie zbiór obrazów uczących był zdeterminowany oczekiwaniami związanymi z pracą sieci, a mianowicie miała ona określać parametry struktury silnika niezależnie od jego obciążenia. Zatem grupa obrazów uczących powinna składać się z niesprawności różnego stopnia przy różnych obciążeniach silnika. Przykładowo: stopień zanieczyszczenia filtra 10%, 20%, 30%, 40% przy zakresie zmiany obciążenia od 50 do 100%.

3. Wybór struktury sieci i sposobu jej uczenia. Zasadniczym problemem przy budowie neuronowego klasyfikatora obiektów, jest dobór odpowiedniej struktury sieci. Koncepcja przewidywała badania w dwóch kierunkach - zastosowanie jednej sieci wielowarstwowej do diagnozowania wszystkich niesprawności silnika oraz podział zadań pomiędzy większą ilość sieci neuronowych.

4. Uczenie sieci z wykorzystaniem obrazów uczących. Uczenie sieci nieliniowych wykorzystuje metodę wstecznej propagacji błędów [12].

5. Testowanie sieci dla stanów ze zbioru obrazów uczących oraz takich, które do niego nie należą wg.[11].

3. WYNIKI WERYFIKACJI DOŚWIADCZALNEJ WYKORZYSTANIA SIECI NEURONOWYCH

Przebieg eksperymentu z wykorzystaniem sieci neuronowych składał się z dwóch etapów. W pierwszym etapie zbadano możliwości zastosowania sieci neuronowej wielowarstwowej do diagnostyki silnika okrętowego. Koncepcja taka polega na tym, iż odpowiednio wytrenowana sieć neuronowa, jest zdolna do identyfikacji przewidzianej (wyuczonej) liczby niesprawności. Przy takim założeniu diagnostyka całego silnika byłaby możliwa za pomocą jednej sieci neuronowej, z odpowiednią ilością neuronów w warstwie wyjściowej ściśle związaną z liczbą identyfikowanych niesprawności.

W drugi etapie badań wzięto pod uwagę możliwość podziału zadań na większą liczbę sieci neuronowych. Za identyfikację niesprawności silnika odpowiada ilość sieci równa ilości identyfikowanych uszkodzeń. Zarówno w pierwszym, jak i drugim etapie badań zadanie diagnostyczne, polegało na możliwości przybliżonego wyznaczenia wartości parametrów struktury, przy różnych warunkach eksploatacji, a zwłaszcza przy stosunkowo silnie zmiennym obciążeniu silnika.

W pierwszym etapie eksperymentu weryfikacji poddano sieci neuronowe nieliniowe wielowarstwowe. Wykorzystano przy tym sieć o następującej strukturze: warstwa wejściowa zawierała 8 neuronów, dwie warstwy ukryte po 5, natomiast wyjściowa 3 neurony. Sieć była trenowana dla rozpoznawania trzech niesprawności. Każdy neuron w warstwie wyjściowej był odpowiedzialny za określoną niesprawność:

- Neuron 0 – filtr powietrza,
- Neuron 1 – chłodnica powietrza,
- Neuron 2 – układ wydechowy.

Weryfikacji dokonywano badając odpowiedzi sieci na maksymalny, symulowany zakres niesprawności. Oczekiwane odpowiedzi sieci powinny zatem wynosić 40 w przypadku rozpoznania niesprawności lub 0 w przypadku jej braku. Badania wykonano przy prędkości obrotowej silnika 750 [obr/min].

Wyniki przytoczone w tabeli 1 pokazują, że w przypadku zadawania niesprawności pojedynczo; badana sieć reaguje w sposób poprawny w szerokim zakresie obciążeń silnika. Kontynuując badania sprawdzono jak badana sieć rozpoznaje niesprawności wielokrotne, zaś wyniki tych testów pokazano w tabeli 2.

Tab. 1. Odpowiedzi sieci na niesprawności zadawane pojedynczo.

Obciążenie	Symulowana niesprawność (wartość max. – 40%)	Neuron 0 filtr powietrza	Neuron 1 chłodnica powietrza	Neuron 2 kolektor wydechowy
100%	filtr powietrza	40	0	0
	chłodnica powietrza	0	40	0
	kolektor wydechowy	0	0	40
80%	filtr powietrza	39	0	0
	chłodnica powietrza	0	39	0
	kolektor wydechowy	0	0	40
60%	filtr powietrza	39	0	0
	chłodnica powietrza	0	39	0
	kolektor wydechowy	0	0	39

Tab. 2. Odpowiedzi sieci na niesprawności zadawane równocześnie.

Obciążenie	Symulowana niesprawność (wartość max. – 40%)	Neuron 0 filtr powietrza	Neuron 1 chłodnica powietrza	Neuron 2 kolektor wydechowy
100%	filtr + chłodnica	20	0	0
	filtr + wydech	24	0	21
	chłodnica + wydech	0	0	20
80%	filtr + chłodnica	20	0	0
	filtr + wydech	24	0	21
	chłodnica + wydech	0	0	20
60%	filtr + chłodnica	20	0	0
	filtr + wydech	24	0	21
	chłodnica + wydech	0	0	20

Podobnie jak w poprzednim przypadku wartości oczekiwane powinny wynosić 40 lub 0. Z tabeli 2 wynika, że w przypadku występowania niesprawności wielokrotnych sieć reaguje nieprawidłowo. Mamy tutaj do czynienia ze zjawiskiem tzw. „wyboru sieci”. Termin ten został zaproponowany przez autora artykułu. Zjawisko to polega na tym, że w przypadku wystąpienia dwóch niesprawności jednocześnie, odpowiedź pozytywna pojawia się zazwyczaj tylko na jednym wyjściu sieci. Przykładowo, jeśli wystąpiły jednocześnie niesprawności filtra i chłodnicy, odpowiedź pozytywna pojawiła się tylko na pierwszym

neuronie odpowiedzialnym za diagnozowanie filtra powietrza. Odpowiedź neuronu drugiego, odpowiedzialnego za diagnozowanie chłodnicy, wyniosła 0. Sieć, zatem „uznała” niesprawność filtra powietrza za bardziej istotną. Należy dodać, że odpowiedź w przypadku „wybranej” niesprawności jest dużo niższa niż oczekiwana. Odpowiedź neuronu na zanieczyszczenie filtra w 40% (oczekiwana wartość 40) wyniosła 20 (co oznacza błąd rzędu 50%). Właśnie opisane wyżej zjawisko tzw. „wyboru sieci” ogranicza obszar zastosowania tego typu sieci do diagnozowania jedynie niesprawności występujących pojedynczo. W praktyce jednak taka sytuacja ma miejsce bardzo rzadko. Zazwyczaj bowiem mamy do czynienia z wieloma niesprawnościami występującymi równocześnie, choć przy różnym natężeniu.

Powyższe wyniki badań wykazały, iż sieć neuronowa daje poprawne rezultaty jedynie wtedy, gdy jest wytrenowana do diagnozowania jednej niesprawności. Pomogło to stworzyć koncepcję zastosowania niezależnych sieci do diagnozowania poszczególnych niesprawności (podział zadań na większą liczbę sieci neuronowych). Oznacza to, iż na przykład diagnostyką filtra powietrza, będzie się zajmowała sieć neuronowa wytrenowana w rozpoznawaniu tylko tej konkretnej niesprawności. W drugim etapie badań zastosowano zatem trzy, niezależnie wytrenowane sieci neuronowe o następującej strukturze: warstwa wejściowa zawierała 8 neuronów, dwie warstwy ukryte po 5, natomiast wyjściowa 1 neuron. Pierwsza z sieci neuronowych była odpowiedzialna za diagnostykę filtra powietrza, druga – chłodnicy powietrza, natomiast trzecia – kolektora wylotowego.

Weryfikacji dokonywano badając odpowiedzi sieci na maksymalny, symulowany zakres niesprawności. Oczekiwane odpowiedzi sieci powinny zatem wynosić 40 w przypadku rozpoznania niesprawności lub 0 w przypadku jej braku. Badania wykonano przy prędkości obrotowej silnika 750 [obr/min].

Podział zadań pomiędzy trzy niezależne sieci neuronowe, pozwolił wyeliminować błędy pojawiające się podczas występowania niesprawności wielokrotnych.

W wyniku przeprowadzonych badań, można sformułować podane poniżej zalecenia praktyczne, odnośnie wdrażania sieci neuronowych do diagnostyki silnika okrętowego.

Tab.3. Odpowiedzi sieci na niesprawności zadawane jednocześnie.

Obciążenie	Symulowana niesprawność (wartość max. – 40%)	Sieć 1 filtr powietrza	Sieć 2 chłodnica powietrza	Sieć 3 kolektor wydechowy
100%	filtr + chłodnica	40	40	0
	filtr + wydech	40	0	40
	Chłodnica + wydech	0	40	40
80%	filtr + chłodnica	40	40	0
	filtr + wydech	40	0	40
	Chłodnica + wydech	0	40	40
60%	filtr + chłodnica	40	40	0
	filtr + wydech	39	0	39
	chłodnica + wydech	0	39	40

W celu stworzenia sieci neuronowej do przygotowanej identyfikacji określonej niesprawności należy postępować w następujący sposób:

1. Należy wyodrębnić optymalny zbiór parametrów diagnostycznych do identyfikacji założonej niesprawności na podstawie dostępnej teorii dotyczącej określonego zagadnienia (liczba parametrów powinna być możliwie mała).
2. Następnie trzeba wykonać badania symulacyjne na obiekcie rzeczywistym lub modelu matematycznym w celu zgromadzenia obrazów różnych poziomów założonej niesprawności oraz stanów wzorcowych (bez niesprawności) badanego obiektu.
3. Teraz można wykorzystać zgromadzone obrazy do nauki sieci.
4. Idąc dalej, należy zweryfikować zachowanie sieci na podstawie obrazów znanych oraz tych, które nie były zawarte w zbiorze uczącym (zdolność generalizacji).
5. W przypadku nieprawidłowych reakcji (brak identyfikacji wytrenowanej niesprawności) trzeba ewentualnie rozszerzyć liczbę parametrów diagnostycznych lub zbiór obrazów uczących.
6. Następnie należy zbadać wpływ pozostałych niesprawności. W tym celu należy wykonać kolejne badania symulacyjne, aby zgromadzić obrazy stanów eksploatacyjnych pozostałych niesprawności możliwych do wykonania na danym obiekcie.
7. Jeśli wytrenowana sieć reaguje pozytywnie na jakieś inne niesprawności od założonej, należy rozszerzyć zbiór obrazów uczących o dane niesprawności.

8. Teraz trzeba ponownie wytrenować sieć na nowym zbiorze obrazów.
9. Na koniec powinno się zweryfikować zachowanie sieci. W przypadku trudności w selekcji poszczególnych niesprawności konieczne jest kolejne rozszerzenie zbioru parametrów diagnostycznych.

Z uwagi na wstępny charakter prowadzonych badań zalecenia powyższe należy traktować z dużą ostrożnością. Jest rzeczą możliwą, że dalsze badania nad zastosowaniem sieci neuronowych doprowadzą do opracowania prostszej i bardziej efektywnej metodyki implementacji i uczenia sieci neuronowej.

5. WNIOSKI

Ilościowe określenie wybranych parametrów struktury silnika na podstawie jego parametrów pracy, jest zadaniem niezwykle trudnym. Trudność ta wynika przede wszystkim z faktu występowania silnie nieliniowej zależności pomiędzy symptomami, a odpowiadającymi im uszkodzeniami. Sieci neuronowe pozwalają ten problem rozwiązać, między innymi dzięki możliwości efektywnej aproksymacji przez sieć nieliniowych funkcji wielu zmiennych.

Zastosowane w diagnostyce silnika okrętowego umożliwiają ilościowe określenie wszystkich parametrów struktury, a tym samym, identyfikację wszystkich niesprawności możliwych do zasyмуляwania w programie Turbo Diesel 2.0.

Jak wykazały badania, niektóre niesprawności silnika okrętowego (np. zanieczyszczenie turbosprężarki), pozostają trudne do dokładnego, ilościowego diagnozowania w przypadku wystąpienia łącznie z innymi uszkodzeniami, nawet przy użyciu sieci neuronowych. Zdaniem autora, celowym wydaje się kontynuowanie badań nad zastosowaniem sieci neuronowych w diagnostyce, a zwłaszcza porównanie wyników badań na symulatorze z wynikami uzyskanymi na rzeczywistym obiekcie.

7. LITERATURA

- [1] Bocheński C., Janiszewski T.: Diagnostyka silników wysokoprężnych. Warszawa 1996.
- [2] Kluj S.: Diagnostyka urządzeń okrętowych. WSM Gdynia 1992.
- [3] Witkowski K.: Stan Diagnozowania Okrętowych Silników Spalinowych i Możliwości Rozwoju Algorytmów Diagnostycznych. Zeszyty naukowe WSM w Gdyni, październik 1994.
- [4] Włodarski J. K.: Wybrane problemy metodyki badań diagnostycznych wolno i średnioobrotowych silników spalinowych o zapłonie samoczynnym. „Silniki Spalinowe”, nr 1-2/1987.

- [5] Krzyżanowski J., Kiciński J.: Komputerowy inteligentny system diagnostyki turbozespółów energetycznych. Instytut Maszyn Przepływowych P.A.N. Gdańsk.
- [6] Kiciński J.: Symptomy diagnostyczne turbozespółów energetycznych określone metodą komputerowej i analogowej symulacji ich defektów. Instytut Maszyn Przepływowych P.A.N. Gdańsk.
- [7] Włodarski J. K.: Ograniczenia w rozwoju diagnostyki na statkach morskich. TGM 3/89.
- [8] Drozdowski J.: Diagnostyka eksploatacyjna systemu wtryskowego silników okrętowych. „Budownictwo Okrętowe”, nr 1/87.
- [9] Sitkowski J.: Współczesne metody diagnostyki okrętowych silników spalinowych. „Budownictwo Okrętowe”, 2/76.
- [10] Tadeusiewicz R.: Elementarne wprowadzenie do techniki sieci neuronowych z przykładowymi programami. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1998.
- [11] Korbicz J., Obucowicz A., Uciński D.: Sztuczne Sieci Neuronowe Podstawy i Zastosowania. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1994.
- [12] Tadeusiewicz R.: Sieci Neuronowe. Akademicka Oficyna Wydawnicza RM, Warszawa 1993.



Mgr inż. **Rafał Pawletko** jest asystentem w Katedrze Siłowni Okrętowych Wydziału Mechanicznego Akademii Morskiej w Gdyni.

W pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami oceny stanu technicznego okrętowych silników spalinowych.

ROZRUCH SILNIKA TŁOKOWEGO JAKO PROCES DIAGNOSTYCZNY

Józef PSZCZÓLKOWSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny
ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, fax.: (022) 683 97 96, e-mail: jpszczola@wme.wat.waw.pl

Streszczenie

Scharakteryzowano rozruch tłokowego silnika spalinowego jako proces diagnostyczny. Przedstawiono model diagnostyczny rozruchu silnika i wskazano parametry wyjściowe procesu, które mogą być wykorzystane jako parametry diagnostyczne, ponieważ mają cechy tego typu wielkości. Wskazano elementy systemu i ich właściwości, które mogą być obiektami diagnozy na podstawie oceny parametrów przebiegu rozruchu. Scharakteryzowano zasady budowy modeli diagnostycznych poszczególnych elementów systemu pozwalających na wnioskowanie o ich stanie na podstawie zmierzonych wielkości podczas rozruchu. Przedstawiono wstępny algorytm diagnozowania silnika i elementów elektrycznego układu rozruchowego.

Słowa kluczowe: tłokowe silniki spalinowe, rozruch w niskiej temperaturze, diagnostyka techniczna

PISTON ENGINE START-UP AS A DIAGNOSTIC PROCESS

Summary

Piston combustion engine start-up as a diagnostic process is characterised. Engine start-up diagnostic model is presented and output process parameters are shown, which can be used as diagnostic parameters because they have such quantities features. System elements and their properties are pointed which can be diagnosis objects on the basis of start-up course parameters evaluating. The principles of diagnostic models developing of individual system elements, which will let come to conclusions on their state with the help of measured quantities under engine starting. A preliminary diagnostic algorithm is presented for engine and electric starting system testing.

Key words: piston engine, low temperature start-up, technical diagnostics

1. WPROWADZENIE

Każde urządzenie techniczne, w fazie jego produkcji uzyskuje określoną strukturę zapewniającą mu możliwość realizacji zadań, do których wypełniania zostało zaprojektowane. W trakcie trwania eksploatacji elementy i układy urządzenia podlegają różnego rodzaju oddziaływaniom, związanym zarówno z jego funkcjonowaniem, jak też pochodzącymi ze środowiska zewnętrznego. Samo urządzenie również wykazuje oddziaływania na środowisko, celowe, związane z wykonywaniem funkcji jak też uboczne, najczęściej niepożądane. Wskutek tych oddziaływań zachodzą procesy zużycia i starzenia elementów powodujące na ogół niekorzystną zmianę jego parametrów efektywnych. Dla utrzymania ich wartości w określonych granicach, narzuconych przez system eksploatacji, konieczne jest, najczęściej okresowe przywracanie stanu pierwotnego elementów urządzenia, a ostatecznie jego likwidacja. Ten zakres działań eksploatacyjnych dotyczących utrzymania lub przywracania stanu nazywany jest obsługiwaniem.

Ostatnie dziesięciolecia charakteryzuje istotna zmiana zasad eksploatacji maszyn. Dotyczy ona

głównie metody realizacji działań obsługowych. Planowo – zapobiegawcza metoda obsługiwanego i napraw charakteryzuje się występowaniem stałych przedziałów czasowych lub czasowo – przestrzennych, w których dokonywane są pewne czynności na urządzeniu przewidziane przez producenta lub system eksploatacji. Drugą istotną cechą tej metody jest cykliczność zakresu wykonywanych czynności co oznacza hierarchizację działań (zakres czynności obsługiwanego tzw. wyższego rzędu obejmuje zakres rzędu niższego) oraz okresowe powtarzanie cyklu. Metoda ta ma niewątpliwie szereg zalet, ale z pewnością nie jest efektywna – wielkość poniesionych nakładów nie jest współmierna do uzyskanych, lub możliwych do uzyskania efektów.

Dlatego coraz częściej podejmowane są działania wdrażania metody obsługiwanego dynamicznego lub według stanu technicznego. W tym przypadku zakres działań obsługowo – naprawczych jest (powinien być) ściśle związany z rzeczywistym stanem urządzenia i istniejącymi w tym zakresie potrzebami. Zasadność tego typu działań jest zależna od dokładnego rozpoznania stanu urządzenia, a zwłaszcza prognozy przyszłych zmian stanu.

Obydwie z wymienionych funkcji spełnia diagnostyka techniczna.

Diagnostyka odgrywa coraz większą rolę w systemach eksploatacji urządzeń technicznych umożliwiając znaczne zwiększenie ich niezawodności, a szczególnie gotowości do wypełniania odpowiednich funkcji. Intensywny rozwój diagnostyki technicznej związany jest z rozwojem środków pomiaru i rejestracji parametrów procesów roboczych maszyn oraz metod opracowania danych z zastosowaniem techniki komputerowej. W związku z tym dla celów diagnostycznych wykorzystuje się coraz więcej parametrów procesów wyjściowych maszyn mogących pełnić funkcję symptomów stanu.

Wzrost roli diagnostyki w eksploatacji maszyn wynika przede wszystkim z:

- potrzeb racjonalnej eksploatacji, której głównymi kryteriami są minimalizacja kosztów eksploatacji i przestojów urządzeń. Stąd powszechne jest dążenie do “przeniesienia” czynności naprawczych do cyklu procesów obsługowych – wykonywanych odpowiednio wcześniej zabiegów profilaktycznych. Skutki uszkodzeń i koszty przestojów są często wielokrotnie większe od kosztów planowej wymiany zespołów;
- wzrostu możliwości zarówno technicznych jak i metodologicznych diagnostyki związanych z intensywnym rozwojem tej dziedziny wiedzy (środków i metod diagnozowania). Rozwój środków i metod diagnozowania powoduje, że dla celów diagnostyki możliwe jest użycie wielu nowych parametrów diagnostycznych (symptomów stanu) wykorzystujących nie stosowane dotychczas cechy procesów roboczych, dla których zwiększa się dostępność diagnostyczna, a więc i możliwości ich zastosowania;
- zmiany cech obiektów eksploatacji, dla których dzięki stosowaniu nowych materiałów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych oraz technologii produkcji, uzyskuje się ich zwiększoną trwałość. Ponadto współczesne obiekty wyposażone są w dużą ilość różnego rodzaju układów pomiarowych wielkości, które pełniąc inne funkcje w urządzeniu, mogą być również wykorzystywane dla celów diagnostyki. Dla przykładu, pojazdy mechaniczne wyposażano pierwotnie jedynie w trzy proste układy pomiarowe: ciśnienia oleju, poziomu paliwa i temperatury płynu chłodzącego. Wraz z wystąpieniem wymagań w zakresie emisji, pojawieniem się elektronicznego sterowania zapłonem i wtryskiem paliwa, zaczęto stosować nowe czujniki dla ścisłego sterowania pracą silnika i emisją spalin. W nowoczesnych pojazdach trudno określić ważniejsze zespoły, w których nie stosowano by różnego rodzaju układów pomiarowych [1]. Te czynniki powodują, że zwiększają się potrzeby i wzrasta

opłacalność stosowania środków diagnozy, zwłaszcza pokładowych, których istnienie powoduje istotne przeniesienie procesu diagnostycznego z podsystemu obsługiwanego do podsystemu użytkownika urządzeń;

- rozwoju metod rejestracji i przetwarzania sygnałów diagnostycznych, szczególnie w związku z wykorzystaniem techniki cyfrowej (komputerowej) do tych celów. Szybkość przetwarzania sygnałów powoduje, że znacznie zwiększa się ilość informacji wtórnej na podstawie zmierzonych wartości sygnałów diagnostycznych. Nowe jakościowo możliwości diagnostyczne pojawiają się w związku z rozwojem sztucznej inteligencji i stosowaniem w diagnostyce komputerowych systemów doradczych lub ekspertowych. Przykładem nowych możliwości diagnostycznych jakie pojawiły się dzięki zastosowaniu technik cyfrowych mogą być komputerowe systemy diagnostyczne [2] wykorzystujące do oceny stanu silnika tzw. jego charakterystykę dynamiczną.

Wymienione czynniki powodują również, że istnieją możliwości wykorzystania dla celów diagnostyki parametrów rozruchu silnika w niskiej temperaturze otoczenia.

2. DIAGNOSTYCZNE ASPEKTY PROCESU ROZRUCHU SILNIKA

Rozruch tłokowego silnika spalinowego jest okresem inicjowania jego samodzielnej pracy i warunkuje możliwość jego celowego wykorzystania. W celu zainicjowania pracy silnika niezbędne jest dostarczenie energii z zewnętrznego źródła poprzez napędzanie przez układ rozruchowy, najczęściej elektryczny, wału korbowego z określoną prędkością obrotową. Układ rozruchowy składa się z silnika prądu stałego szeregowego lub szeregowo-bocznikowego i elementu przekładniowego, który umożliwia zmniejszenie momentu sił rozrusznika potrzebnego do rozruchu, jak również optymalizację wymiarów i masy układu rozruchowego. Źródłem energii zasilającym silnik elektryczny jest najczęściej akumulator ołowiowo-kwasowy. W trudnych warunkach rozruchu układ rozruchowy powinien zapewnić odpowiednią wartość prędkości obrotowej wału korbowego silnika w dostatecznie długim czasie. Wartość tych dwu parametrów jest zależna od cech wszystkich elementów systemu silnik – układ rozruchowy. Wielkościami charakteryzującymi elementy systemu, które wpływają na wartości parametrów wyjściowych są:

- moment oporu silnika;
- rzeczywista moc mechaniczna rozrusznika;
- pojemność akumulatora kwasowego;
- przełożenie między wieńcem koła zamachowego a zębniakiem rozrusznika.

Parametry pracy rozrusznika są zależne od napięcia na zaciskach obciążonego akumulatora, a stąd bezpośrednio od jego temperatury i natężenia prądu. Podczas rozruchu silnika wprowadzenie w ruch obrotowy wału korbowego wymaga pokonania oporów: statycznych (tarcia), bezwładności elementów ruchomych oraz oporów sprężania ładunku w cylindrach silnika.

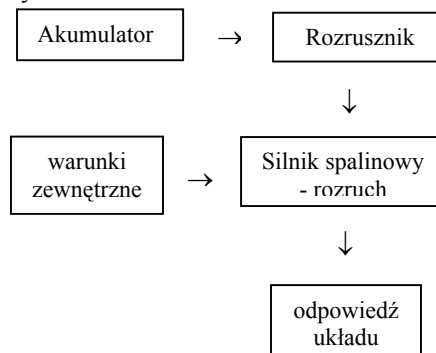
W diagnostyce pojazdów mechanicznych, zwłaszcza silników, znaczne rezerwy możliwości rozpoznania stanu występują w wykorzystaniu procesów rozruchowych silnika, które dotychczas nie są w dostatecznym stopniu stosowane. Już sam rozruch silnika (łatwość podjęcia samodzielnej pracy) jest dobrym testem poprawności działania dla wszystkich układów wpływających na wartość wymuszanej przez rozrusznik prędkości obrotowej wału korbowego oraz tworzenie i zapłon mieszaniny paliwowo-powietrznej. Wykazywany przez silnik poziom właściwości rozruchowych zawiera informacje o stanie technicznym tych układów lub urządzeń wspomagających rozruch. Jednakże taka, choć precyzyjna, ocena stanu ogólnego wszystkich układów silnika byłaby procesem pracochłonnym i kosztownym, gdyż wymagałaby realizacji rozruchu według procedur właściwych dla tego typu badań silników.

Drugim ważnym diagnostycznym aspektem rozruchu jest fakt, że podczas jego realizacji ujawnia się największa liczba uszkodzeń układów silników. Jest to bezpośrednio związane z dużą czułością przebiegu procesów rozruchowych od warunków ich realizacji – wymuszeń zewnętrznych dla przebiegu procesów tworzenia, zapłonu i spalania mieszaniny paliwowo-powietrznej. Dla przykładu, realizowane w warunkach normatywnych badania granicznej temperatury rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym wykazują przeciętnie jej wzrost o około 2 stopnie po zastosowaniu akumulatora wychłodzonego do temperatury badania (ok. $-10 \div -15$ °C) zamiast akumulatora o temperaturze dodatniej ok. $+18$ °C oraz dodatkowo 2 stopnie, jeżeli akumulator zostanie wstępnie rozładowany do stanu 70% pojemności znamionowej.

Cechy diagnostyczne procesu rozruchu silnika spalinowego można rozważyć na podstawie prostego modelu diagnostycznego, który przedstawiono na rys.1. Obiektem diagnozy jest układ: silnik spalinowy – rozrusznik – akumulator rozruchowy, gdyż współpraca i cechy wszystkich elementów decydują o przebiegu rozruchu i generowaniu sygnałów diagnostycznych. Podstawowym parametrem wejściowym wymuszającym procesy rozruchowe silnika jest temperatura. W głównym stopniu charakteryzuje ona warunki zewnętrzne, w których realizowany jest rozruch silnika, zwłaszcza przy założeniu, że układ pozostaje w stanie równowagi cieplnej z otoczeniem.

Stan obiektu diagnozy charakteryzowany jest przez następujący zbiór parametrów:

- pojemność rzeczywista lub zdolność rozruchowa akumulatora kwasowego przy danym jego stanie technicznym i termicznym;
- zbiór charakterystyk rozrusznika: momentu siły, prędkości obrotowej i mocy;
- wartość oporów ruchu silnika spalinowego zależna od jego cech konstrukcyjnych i parametrów stanu, w szczególności od lepkości oleju smarującego i ciśnienia sprężania ładunku w cylindrach.



Rys. 1. Diagnostyczny model rozruchu silnika spalinowego

Istotą diagnostyki jest, że wartości wymienionych cech układu powinny być określone na podstawie wartości cech sygnałów wyjściowych – odpowiedzi układu na wymuszenia zewnętrzne, do których można zaliczyć:

- czas rozruchu silnika lub graniczną temperaturę rozruchu – jak podkreślono wyżej byłyby to parametry zawierające największą ilość informacji o stanie układów silnika, jednakże koszty procesu diagnozowania byłyby nadmierne, jak również możliwości diagnozy szczegółowej znacznie ograniczone,
- natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik – jako parametr diagnostyczny zawiera największą ilość informacji o stanie układu realizującego rozruch. Charakteryzuje zarówno zdolność akumulatora do oddawania prądu w warunkach obciążenia rozruchowego, zależy od stanu rozrusznika charakteryzując związek między poborem prądu a wytworzonym momentem siły, zawiera informacje o wielkości momentu oporów ruchu silnika spalinowego, jeżeli charakterystyki rozrusznika są znane (zgodne z określonymi przez producenta),
- napięcie na zaciskach obciążonego akumulatora (lub rozrusznika) – zawiera informacje diagnostyczne o stanie źródła energii zasilającego rozrusznik. Napięcie jest wielkością zależną od pojemności znamionowej, natężenia pobieranego prądu, temperatury oraz stanu akumulatora (jego stopnia naładowania i stanu zużycia),
- prędkość obrotowa wału korbowego wymuszana przez rozrusznik – jest wypadkową cech elementów biorących udział w rozruchu: silnika jako obiektu reprezentowanego przez

moment oporów ruchu, elektromechanicznych charakterystyk rozrusznika i zdolności rozruchowej akumulatora.

3. PARAMETRY ROZRUCHU SILNIKA I ICH CECHY DIAGNOSTYCZNE

Natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik, napięcie na zaciskach akumulatora i prędkość obrotowa wału korbowego stanowią odpowiedź układu silnik – rozrusznik – akumulator rozruchowy na wymuszenie, jakim jest realizacja rozruchu silnika spalinowego. Aby te wielkości mogły pełnić funkcje parametrów diagnostycznych, powinny spełniać warunki wymagane dla tego typu wielkości. Jako najważniejszy należy wymienić warunek informatywności. W przypadku natężenia prądu pod tym względem można wskazać dwa obiekty oceny diagnostycznej na podstawie tego parametru. Przy założeniu, że charakterystyki rozrusznika są zgodne z podanymi przez producenta, wytwarzany przez niego moment siły zależy tylko od natężenia pobieranego prądu (zmiany charakterystyk w funkcji temperatury można pominąć).

Drugim obiektem oceny jest silnik spalinowy, w aspekcie jego rozruchowych oporów ruchu. Warunkiem właściwej ich oceny jest równowaga termiczna silnika – pomiędzy jego elementami nie mogą występować gradienty temperatury. Ponieważ moment oporu silnika zależy od lepkości oleju smarującego, która jest funkcją temperatury, to jej wartość powinna być ściśle określona. Składowa zmienna momentu oporu silnika podczas napędzania wału korbowego przez rozrusznik zależy głównie od ciśnienia sprężanego w cylindrach silnika ładunku powietrza. Stąd też na podstawie parametrów sygnałów wyjściowych procesu rozruchu można określić wartość tego parametru. Aktualnie natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik jest wykorzystywane w diagnostyce silnika do oceny jakościowej ciśnienia sprężania w cylindrach, tj. oceny równomierności sprężania w poszczególnych cylindrach. Nie wyznacza się natomiast na tej podstawie wartości ciśnień. Przeprowadzono badania wstępne korelacji ciśnień sprężania powietrza i amplitudy składowej zmiennej natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik. Stwierdzono istnienie korelacji w warunkach danej próby rozruchowej, natomiast nie istnieje ona w przypadku porównywania wyników pomiarów w różnych warunkach zewnętrznych: różnych temperaturach otoczenia i silnika lub zmiennej mocy układu rozruchowego. Dlatego dla celów diagnostycznego wykorzystania tego parametru konieczna jest budowa modeli matematycznych obiektów diagnozowanych. Podkreślić natomiast należy, że różnice ciśnień sprężania ładunku w cylindrach są znacznie bardziej uwidaczniane podczas napędzania wału korbowego silnika w warunkach obniżonych temperatur – dla silnika wychłodzonego.

Napięcie na zaciskach charakteryzuje zdolność akumulatora kwasowego do oddawania energii. Przy danym natężeniu pobieranego prądu napięcie na

zaciskach akumulatora zależy także od jego pojemności znamionowej Q , temperatury elektrolitu T oraz stanu naładowania k , który może być utożsamiany ze stanem technicznym źródła energii. Stwierdzono, że zależność napięcia na zaciskach akumulatora U od parametrów charakteryzujących jego stan (stopień naładowania) i obciążenie może być przyjęta jako funkcja liniowa typu (ostateczna postać tej zależności zostanie przyjęta po opracowaniu bazy danych o rozruchu silników spalinowych):

$$U = U(Q, I, T, k) \quad (1)$$

Wartość prędkości obrotowej wału korbowego silnika napędzanego przez układ rozruchowy może służyć do wyznaczenia mocy rzeczywistej rozrusznika, jeżeli na podstawie wartości natężenia prądu określona zostanie wartość jego momentu siły. Moc rozrusznika w danych warunkach pracy stanowi podstawowy parametr oceny jego stanu technicznego (musi być ona odniesiona do jego rzeczywistej charakterystyki mocy).

Łatwo można wykazać, że diagnostyczne sygnały procesu rozruchu spełniają także pozostałe warunki dla parametrów diagnostycznych: jednoznaczności, czułości i stabilności. Warunek jednoznaczności oznacza, że zależność określonego parametru stanu obiektu diagnozowanego jest funkcją monotoniczną parametru diagnostycznego. Na podstawie analizy znanych charakterystyk momentu siły rozrusznika i napięcia akumulatora od natężenia prądu można stwierdzić, że są to funkcje monotoniczne. Również w sposób monotoniczny moment oporu silnika zależy zarówno od lepkości oleju smarującego, jak też i prędkości obrotowej wału korbowego. Składowa stała i zmienna momentu oporu zależne są również od jego stanu technicznego, a w szczególności od wartości ciśnienia sprężania ładunku powietrza w cylindrze. Stąd też pomiar natężenia prądu rozrusznika pozwala na jednoznaczną ocenę składowych momentu oporu silnika.

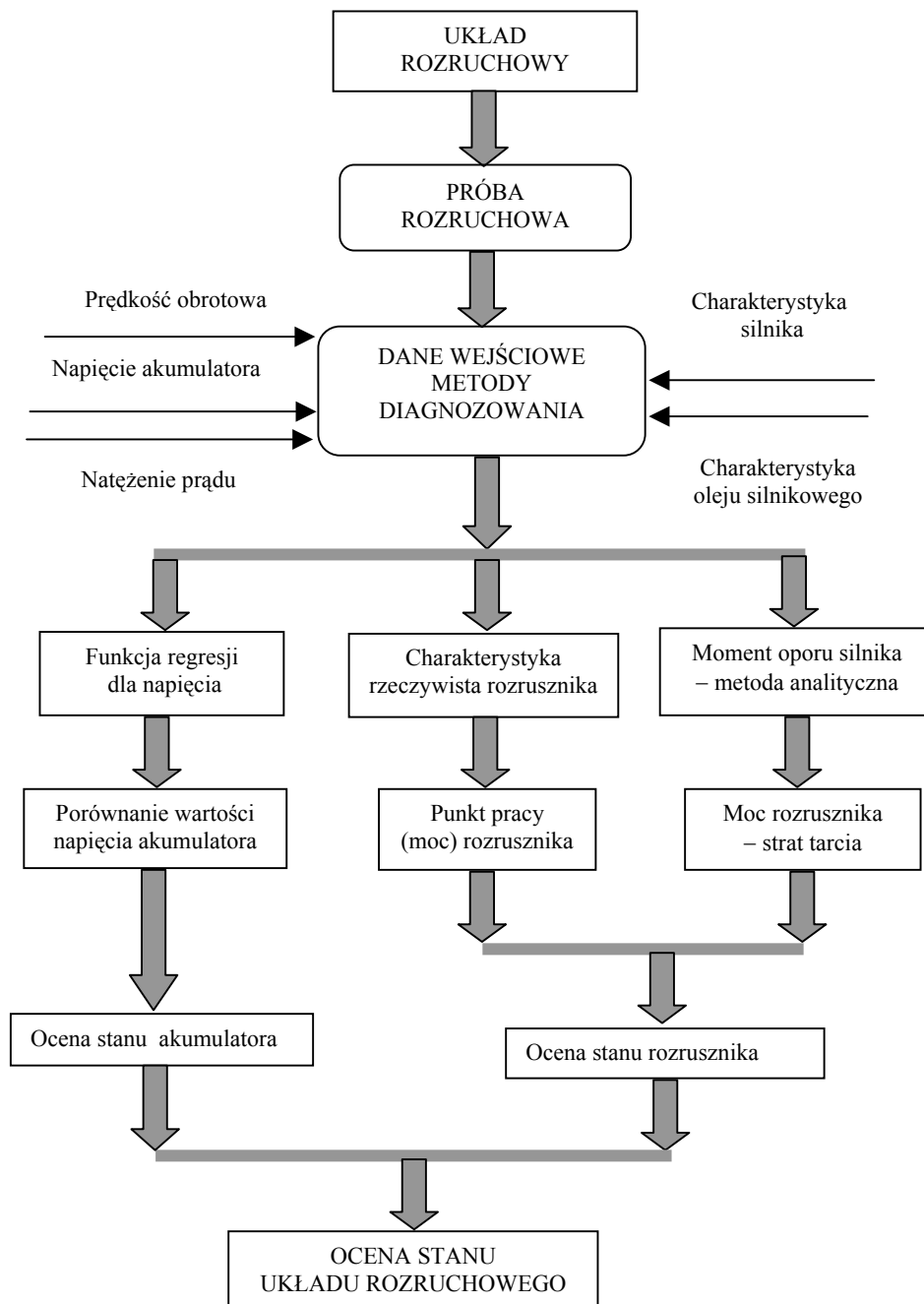
Czułość danego parametru diagnostycznego stosowanego do określenia konkretnego parametru stanu wyraża się stosunkiem ich gradientów. Subiektywna ocena czułości jest związana z czułością aparatury pomiarowej i zależy również od wiarygodności modelu diagnostycznego, wyrażającego związek parametru stanu i parametru diagnostycznego. Współczesne metody pomiaru wymienianych wyżej parametrów wyjściowych procesu rozruchu pozwalają na osiągnięcie wystarczająco dużych dokładności pomiaru, a stąd i oceny czynników wpływających na ich zmiany. Warunek stabilności oznacza nie istnienie lub pomijalny wpływ nieznanymi czynników losowych na mierzone wartości parametrów diagnostycznych. W przypadku pomiarów sygnałów wyjściowych procesów rozruchu błędy losowe są pomijalnie małe, istnieje zaś duży wpływ parametrów stanu układu na wartości tych sygnałów. Dlatego też problemy diagnostycznego wykorzystania procesu rozruchu

tłokowego silnika spalinowego będą stanowiły przedmiot dalszych badań i analiz.

4. ALGORYTM DIAGNOZOWANIA SILNIKA

Opracowano wstępny algorytm diagnozowania układu rozruchowego silnika (rys. 2) na podstawie parametrów procesu jego rozruchu. Bazę do oceny stanu układu rozruchowego (również silnika) stanowi wynik przeprowadzonej próby rozruchowej silnika (napędzania wału korbowego przez

rozrusznik) w warunkach równowagi termicznej z otoczeniem. Jako dane wejściowe metody służą zmierzone parametry diagnostyczne oraz określone charakterystyki silnika (parametry geometryczne) i oleju smarującego. Ocena stanu akumulatora rozruchowego może być dokonana wprost poprzez porównanie wartości zmierzonej napięcia na jego zaciskach z wartością wynikającą z omawianej wyżej funkcji regresji (1) dla danych warunków realizacji próby rozruchowej.



Rys. 2. Algorytm diagnozowania układu rozruchowego silnika

Dla dokonania oceny stanu rozrusznika elektrycznego niezbędna jest znajomość momentu oporu silnika, zarówno wyznaczona na podstawie wyników pomiaru natężenia prądu i charakterystyki

rozrusznika oraz wyznaczona metodami analitycznymi, traktowana jako wzorcowa dla danego silnika smarowanego olejem o znanej lepkości. Rozruchowy moment oporu silnika, jak

zaznaczono wyżej, jest wielkością zależną przede wszystkim od jego cech konstrukcyjnych, lepkości oleju smarującego oraz prędkości obrotowej napędzania wału korbowego. Określenie analityczne jego wartości na podstawie analizy cech skojarzeń tribologicznych jest praktycznie niemożliwe.

Istnieją formuły empiryczne pozwalające na wyznaczenie jego przybliżonej wartości. Ich postać ogólna jest następująca:

$$M_o = kA v^a n^b \quad (2)$$

gdzie: k , a , b – parametry stałe, A – parametr uwzględniający wymiary powierzchni trących silnika, v – lepkość kinematyczna oleju, n – prędkość obrotowa wału korbowego.

W pracy [3] scharakteryzowano znane tego typu zależności literaturowe i podano współczynniki pozwalające na zwiększenie dokładności obliczeń dla współczesnych silników spalinowych.

Podstawowe znaczenie w proponowanej metodzie oceny stanu rozrusznika ma wyznaczenie jego rzeczywistej charakterystyki mocy oraz jej charakterystyki normowanej. Sposób ich określenia podano w pracy [4]. Przebieg charakterystyk mocy rozrusznika zbliżony do paraboli wskazuje na możliwość ich opisu za pomocą wielomianu drugiego stopnia w zależności od natężenia prądu. Przyjęto funkcję regresji postaci:

$$P = aI^2 + bI + c \quad (3)$$

gdzie: P – moc rozrusznika, [kW] lub [KM]; a , b , c – współczynniki funkcji regresji; I – natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik [A].

Stan techniczny silnika w aspekcie jego oporów rozruchu może być określony poprzez porównanie wartości momentu oporu wyznaczonego w wyniku przeprowadzonego eksperymentu (napędzania wału korbowego) oraz na podstawie wymienionych wyżej formuł analitycznych. Składowa zmienna natężenia prądu rozrusznika (momentu oporu) może stanowić przesłankę do wyznaczenia wartości ciśnienia sprężania powietrza w cylindrach silnika. Dla tego celu konieczne jest zbudowanie modelu rozruchu silnika umożliwiającego skorelowanie wartości ciśnienia i natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik. Opracowano wstępny model procesu sprężania powietrza w cylindrach silnika w warunkach rozruchu silnika spalinowego [5].

5. PODSUMOWANIE

Istotną cechą współczesnej eksploatacji maszyn jest stałe, systematyczne zwiększanie roli diagnostyki technicznej, szczególnie w zakresie stosowania pokładowych systemów diagnostycznych. Szerokie możliwości jej stosowania wynikają zarówno ze zmiany cech obiektów eksploatacji, w tym pojazdów mechanicznych oraz rozwoju metod i środków diagnostowania wykorzystujących techniki rejestracji i przetwarzania cyfrowego. W diagnostyce silników spalinowych niedostateczne jest wykorzystanie jako parametrów diagnostycznych cech procesów

roboczych i towarzyszących podczas ich rozruchu. Jako rozruchowe parametry diagnostyczne silnika mogą być traktowane: natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik, napięcie na zaciskach akumulatora lub rozrusznika oraz prędkość obrotowa wału korbowego wymuszana przez rozrusznik w fazie wstępnej rozruchu (lub bez podania paliwa do cylindrów silnika o zapłonie samoczynnym). Na podstawie wartości tych parametrów może być dokonywana ocena stanu akumulatora, rozrusznika, a przede wszystkim silnika, w aspekcie oceny czynników wpływających na jego moment oporu – lepkości oleju smarującego, ciśnienia sprężania ładunku powietrza i ogólnego zużycia zespołów.

Metoda diagnozowania może być opracowana na bazie empirycznych i modelowych zależności charakteryzujących właściwości elementów systemu rozruchu, wśród których podstawowe znaczenie ma wyznaczenie ciśnienia sprężania ładunku powietrza w cylindrze silnika i charakterystyk rozrusznika w rzeczywistych warunkach pracy. Zbiór charakterystyk rozrusznika elektrycznego wykazuje zależność przebiegu od właściwości źródła energii – akumulatora kwasowego. Skutkiem tego jest, że szczególnie charakterystyka mocy ma różny przebieg w zależności od temperatury akumulatora oraz jego obciążenia prądowego. W rzeczywistych warunkach rozruchu silnika spalinowego parametry charakterystyki mocy rozrusznika różnią się znacznie od jej parametrów nominalnych, podanych przez producenta.

LITERATURA

- [1] Holt. D.: Sensors and the automobile. Automotive Engineering, No 9, 1998
- [2] Piętaś. A.: Problems of the diagnosis of diesel engines. II International Scientifically-Technical Conference Explo-Diesel And Gas Turbine '01, Międzyzdroje 2001
- [3] Dziubak T., Pszczółkowski J.: Rozruchowy moment oporu silników spalinowych. Biuletyn WAT Nr 8–9, Warszawa, 1999
- [4] Pszczółkowski J.: Metoda wyznaczania charakterystyki mocy rozrusznika elektrycznego. Biuletyn WAT Nr 9, Warszawa, 2001
- [5] J. Pszczółkowski: Termodynamiczne parametry obiegu silnika w warunkach rozruchu. VIII Ogólnopolskie Sympozjum Naukowe nt. Rozruch silników spalinowych, SYMROZ 2002, Szczecin, 2002



Dr inż. Józef Pszczółkowski,
adiunkt w Instytucie
Pojazdów Mechanicznych
Wojskowej Akademii
Technicznej w Warszawie.

ZASTOSOWANIE ESTYMATORÓW PUNKTOWYCH I ICH DYSKRYMINANT W OCENIE POPRAWNOŚCI WYKONANIA I MONTAŻU SAMOCHODOWYCH SKRZYŃ PRZEKŁADNIOWYCH*

Arkadiusz BOCZKOWSKI

Politechnika Śląska, Katedra Podstaw Systemów Technicznych
Zabrze, ul. Roosevelta 26, e-mail: arekb@polsl.gliwice.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań mających na celu opracowanie prostej i skutecznej metody oceny poprawności wykonania i montażu samochodowych skrzyń przekładniowych w warunkach produkcyjnych, której zaletą winna być odpowiednio wysoka wrażliwość diagnostyczna, pewność i szybkość diagnozy, porównywalność wyników oraz mała wrażliwość na zakłócenia zewnętrzne. W tym celu podjęto próbę opracowania metody badań stanowiskowych, bazujących na analizie sygnałów wibroakustycznych rejestrowanych w czasie pracy skrzynki na stanowisku kontrolnym. Ponadto wykazano możliwość zastosowania estymatorów punktowych i dyskryminant amplitudowych jako kryterium oceny jakości w kategoriach: dobra-zła.

Słowa kluczowe: skrzynie przekładniowe, wibroakustyka, ocena jakości

THE APPLICATION OF POINT ESTIMATORS AND THEIR DISCRIMINANTS IN QUALITY ASSESSMENT OF PRODUCTION AND ASSEMBLING AUTOMOTIVE GEARBOXES

Summary

In the article the results of the tests, whose purpose is to work out simple and effective methods of the quality assessment of the performance and the assembling of automotive gearboxes in production conditions have been presented. The advantage of the method should be appropriate high diagnosis sensitivity, solid and fast diagnosis, comparison of results and low sensitivity to outside disruptions. In this purpose it has been tried to apply the method of test basing on vibroacoustics signal analysis, being registered while gear was testing on the control stand. Moreover the possibility of the application of point estimators and amplitude discriminants as a criterion of quality assessment in categories: good – bad was also pointed out.

Key words: automotive gearboxes, vibroacoustics, quality assessment

1. WSTĘP

Samochodowe skrzynie przekładniowe powinny charakteryzować się odpowiednio wysoką trwałością i niezawodnością działania w stosunkowo długim okresie eksploatacji. Na określone kształtowanie tych cech znaczący wpływ ma nie tylko sam proces projektowania i konstruowania skrzyń przekładniowych, ale również proces wykonania poszczególnych detali (koła zębate, wałki, łożyska, korpus) oraz ich montaż. W czasie szeroko rozumianego procesu produkcji mamy do czynienia z pojawianiem się różnego rodzaju błędów wykonawczych i montażowych, które są najczęstszą przyczyną znacznego zmniejszenia trwałości skrzynki, a co za tym idzie - jej jakości. Typowymi uszkodzeniami występującymi w czasie produkcji skrzyń są: uszkodzenia ewolwenty zębów,

zagniecenia zębów na miękko, skrzywienia zębów powstałe w procesie obróbki cieplno-chemicznej, złe ustawione luzy międzyzębne, skrzywienia i błędy wykonawcze wałków, wady łożysk tocznych, przekroczone odchyłki nieosiowości i prostopadłości gniazd łożyskowych w korpusie itp. Gwarancją wysokiej jakości skrzyń przekładniowych może więc być tylko szczegółowa i bardzo dokładna ostateczna kontrola jakości, mająca na celu wykrycie ewentualnych wad powstałych w czasie produkcji lub montażu.

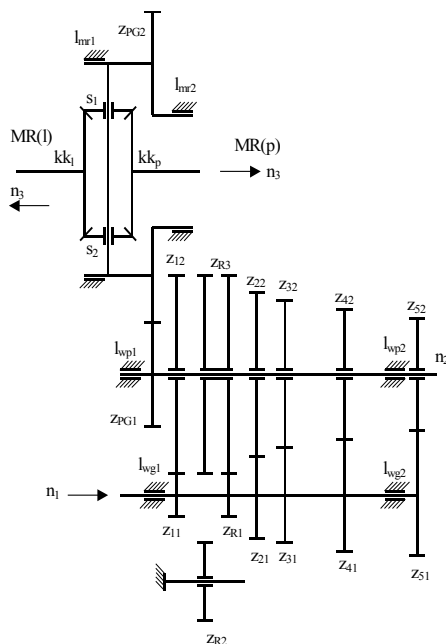
W przemyśle samochodowym ostateczna ocena poprawności wykonania i montażu samochodowych skrzyń przekładniowych odbywa się przeważnie przy zastosowaniu metod organoleptycznych, polegających na odsłuchu i obserwacji pracy skrzyni na poszczególnych biegach przez pracownika - eksperta. Jest to jednak metoda subiektywna,

* Niniejsze praca realizowana jest w ramach grantu promotorskiego 8T07B00721 finansowanego przez KBN

charakteryzująca się małą porównywalnością wyników, dużą czasochłonnością oraz małą dokładnością. Dlatego też, celem prowadzonych badań jest znalezienie prostej a zarazem skutecznej metody oceny poprawności wykonania i montażu samochodowych skrzyń przekładniowych w warunkach produkcyjnych, której zaletą winna być odpowiednio wysoka wrażliwość diagnostyczna, pewność i szybkość diagnozy, porównywalność wyników oraz mała wrażliwość na zakłócenia zewnętrzne.

2. OBIEKT BADAŃ

Obiektem badań są produkowane w Polsce nowe skrzynie przekładniowe, których schemat kinematyczny przedstawiono na rys.1. Jest to skrzynia 6.-biegowa o przełożeniu przekładni głównej 16/57 z mechanizmem różnicowym umieszczonym we wnętrzu korpusu skrzyni. Skrzynie te w procesie produkcyjnym podlegają 100% kontroli jakości na stanowisku testowym, polegającej na odsłuchu pracy na każdym biegu przy ustalonej testowej prędkości obrotowej oraz pod zadanym obciążeniem.

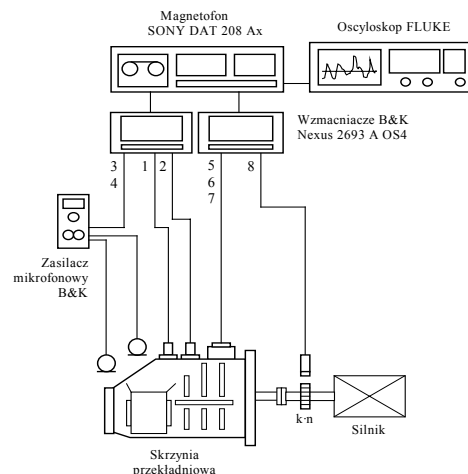


Rys.1. Schemat kinematyczny badanych skrzyń przekładniowych.

Realizacja pomysłu zastąpienia dotychczas stosowanej metody badań kontrolnych – badaniami wibroakustycznymi, w pierwszej kolejności wymagała przeprowadzenia badań uczących, w wyniku których można było poznać charakterystykę pracy przekładni oraz określić relacje *stan-symptom-wartość symptomu*. W tym celu zarejestrowano na nośniku magnetycznym DAT przebiegi czasowe sygnałów wibroakustycznych uszkodzonych skrzyń przekładniowych oraz dla porównania - skrzyń dobrych. Selekcja konkretnych egzemplarzy skrzyń dla potrzeb badań uczących rozpoczęła się ok.

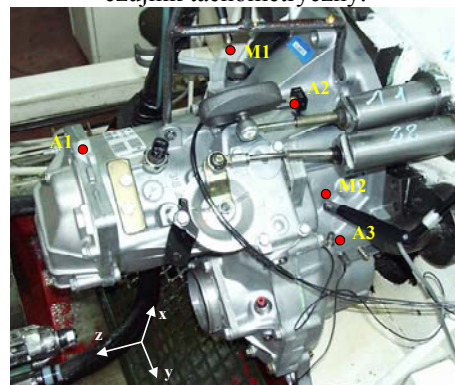
jednego miesiąca wcześniej. Zatem przygotowano do badań rzeczywiście uszkodzone lub źle zmontowane skrzynie, które zostały poddane ocenie jakości wg standardowych procedur w zakładzie. Dla każdej skrzyni określono rodzaj usterki oraz jej przyczynę. Część usterek, których nie udało się wychwycić w toku procesu produkcyjnego w omawianym okresie, została zasymulowana - np. niewłaściwy (brudny) montaż, skrzywienie wałka głównego, zagniecenie zębów na miękko, itp.

Łącznie (w eksperymencie czynnym) badaniom poddano 21 skrzyń przekładniowych z różnymi typami uszkodzeń oraz 4 skrzynie uznane jako wzorcowe. Dla każdej ze skrzyń przeprowadzono rejestrację przebiegu przyspieszeń drgań w trzech kierunkach X,Y,Z (pomiar na korpusie skrzynki) oraz sygnału akustycznego w polu bliskim. Pomiary przeprowadzono w czasie pracy skrzynki na każdym biegu przy stałej prędkości obrotowej (3500 obr/min dla biegu 4 i 5) oraz przy stałym obciążeniu. Dodatkowo wykonano rejestrację sygnałów wibroakustycznych w czasie rozruchu i wybiegu. Schemat toru pomiarowego przedstawiono na rys.2, natomiast lokalizację punktów pomiarowych na rys.3.



Rys.2. Schemat toru pomiarowego zastosowanego w trakcie doświadczalnych badań skrzyń:

1,2 – akcelerometry jednoosiowe; 3,4 – dwa mikrofony; 5,6,7 – akcelerometr trójosiowy; 8 – czujnik tachometryczny.



Rys.3. Rozmieszczenie punktów pomiarowych: M1,M2 – mikrofonów, A1,A2 – akcelerometru trójosiowego, A3 – akcelerometrów jednoosiowych.

3. KONCEPCJA DIAGNOSTYCZNEGO SYSTEMU OCENY JAKOŚCI SKRZYŃ

Przez diagnostyczny system oceny poprawności (jakości) wykonania i montażu samochodowych skrzyń przekładniowych należy rozumieć taki system, który na podstawie analizy wyników testu wibroakustycznego konkretnego egzemplarza skrzynki dokona klasyfikacji typu: *dobra* – *zła*. W przypadku uzyskania wyniku pozytywnego system kończy test i jest gotowy do oceny następnej skrzynki. Z kolei w przypadku klasyfikacji „*produkt zły*” wytwórca powinien uzyskać bardziej szczegółową informację o przyczynach niepoprawnego funkcjonowania konkretnego egzemplarza skrzynki, np. numer uszkodzonego koła zębatego, typ i miejsce wystąpienia uszkodzenia, itd. Raport generowany przez system powinien mieć następującą postać:

- o klasyfikacja: *uszkodzona (zła)*
- o objaw: *stuki na biegu*
- o miejsce: *koło 5 biegu*
- o lokalizacja: *na wałku pośrednim*
- o przyczyna: *uszkodzony ząb*

Ponadto przemysłowy system oceny jakości skrzyń przekładniowych powinien charakteryzować się:

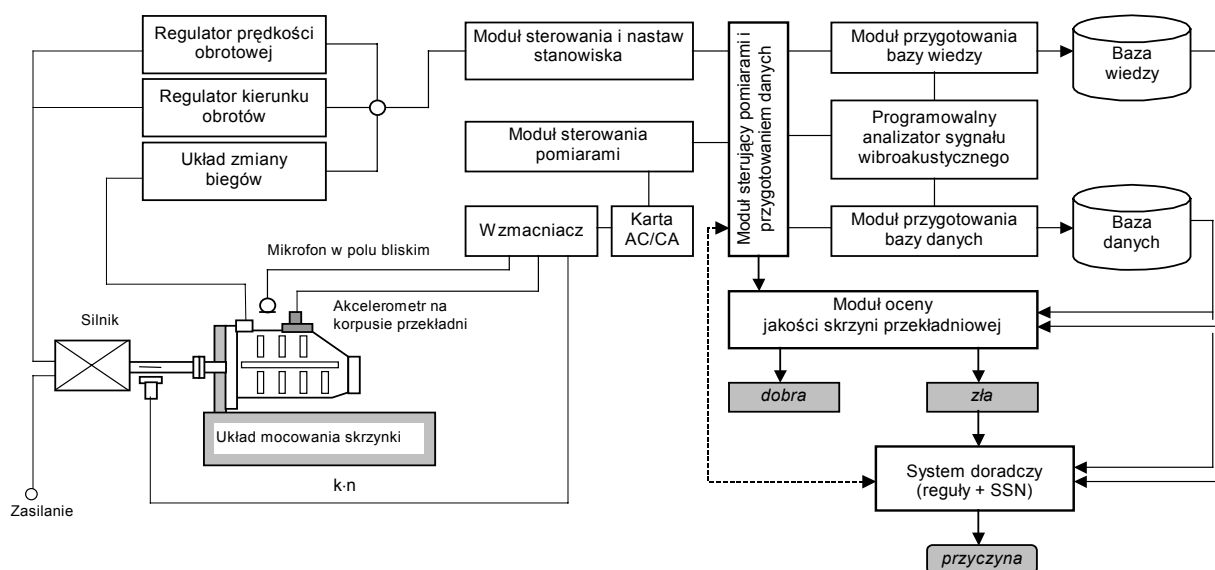
- odpowiednio dużą szybkością realizacji procedur testowych (badane jest 100% skrzyń),
- wysoką skutecznością i porównywalnością uzyskiwanych ocen,
- wysoką niezawodnością działania oraz precyzją lokalizacji usterek.

Opisane działanie systemu jest możliwe poprzez zintegrowanie środowiska programowego analizatora sygnału diagnostycznego ze specjalistycznym oprogramowaniem - systemem doradczym, dysponującym rozbudowaną bazą

wiedzy o konkretnych indywidualnych przypadkach, odpowiednim zbiorem stwierdzeń i reguł decyzyjnych oraz mechanizmem wnioskowania i objaśniania. Duże możliwości w tej dziedzinie stwarza zastosowanie sztucznych sieci neuronowych SSN, zwłaszcza w procesie klasyfikacji uszkodzeń, czy też redukcji zakłóceń. Ideę integracji oraz współdziałania programu analizatora z systemem doradczym oraz stanowiskiem testowym przedstawiono na rys.4. Jest to zarazem koncepcja budowy przemysłowego stanowiska odbiorczego służącego przedmiotowym badaniom.

W toku realizacji eksperymentu, na podstawie badań własnych oraz rozmów z pracownikami (ekspertami), ustalono, że optymalne warunki dla potrzeb szybkiej identyfikacji zdecydowanej większości uszkodzeń skrzyń przekładniowych występują w czasie testu skrzyni na biegu 5. Przyjęto zatem, że podstawowa klasyfikacja jakości skrzynki odbędzie się w czasie pracy na biegu 5, a jej wynik stanowić będzie podstawę oceny: *dobra* – *zła*. Ujawnianie się większości uszkodzeń w czasie testu na 5 biegu, związane jest z faktem pozostawiania przez cały czas w zażebieniu par kół nie przenoszących momentu obrotowego oraz ze znaczną prędkością obrotową wału wejściowego skrzynki, tj. 3500 obr/min. Dodatkowe testy na pozostałych biegach mogą służyć potwierdzeniu poprawności dokonanej klasyfikacji lub próbie precyzyjnego określenia przyczyny uszkodzenia. Opracowanie sposobu oceny jakości skrzyń przekładniowych w pierwszej kolejności wymaga jednak przeprowadzenia analizy wrażliwości diagnostycznej wybranych cech sygnałów wibroakustycznych, a tym samym określenia ich przydatności do detekcji błędów wykonania i montażu.

W pierwszej kolejności postanowiono więc zbadać wrażliwość diagnostyczną podstawowych ocen



Rys.4. Koncepcja stanowiska diagnostycznego dla potrzeb oceny poprawności wykonania i montażu samochodowych skrzyń przekładniowych na podstawie analizy sygnału wibroakustycznego.

punktowych wyznaczonych na bazie sygnałów wibroakustycznych w dziedzinie czasu oraz ich dyskryminant amplitudowych.

4. WRAŻLIWOŚĆ DIAGNOSTYCZNA WYBRANYCH OCEN PUNKTOWYCH I DISKRYMINANT

4.1. Definicje zastosowanych estymatorów i ich dyskryminant

Dla potrzeb przeprowadzenia eksperymentu wykorzystano następujące definicje estymatorów liczbowych:

- wartość średnia bezwzględna X_{AVE} :

$$X_{AVE} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |x(t)| dt \quad (1)$$

- wartość skuteczna X_{RMS} :

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t) dt} \quad (2)$$

- wartość międzyszczytowa X_{p-p} :

$$X_{p-p} = X_{PEAK+} - X_{PEAK-} \quad (3)$$

oraz dyskryminant bezwymiarowych:

- współczynnik kształtu K:

$$K = \frac{X_{RMS}}{X_{AVE}} \quad (4)$$

- współczynnik szczytu C:

$$C = \frac{X_{PEAK}}{X_{RMS}} \quad (5)$$

- współczynnik impulsowości I:

$$I = \frac{X_{PEAK}}{X_{AVE}} \quad (6)$$

- kurtoza k:

$$k = \frac{\mu_x^4}{(\mu_x^2)^2} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T x^4(t) dt}{\left(\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \right)^2} \quad (7)$$

- skośność γ (współczynnik asymetrii):

$$\gamma = \frac{\mu_x^3}{\sigma_x^3} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \mu_x]^3 dt}{X_{RMS}^3} \quad (8)$$

- współczynnik luzu L

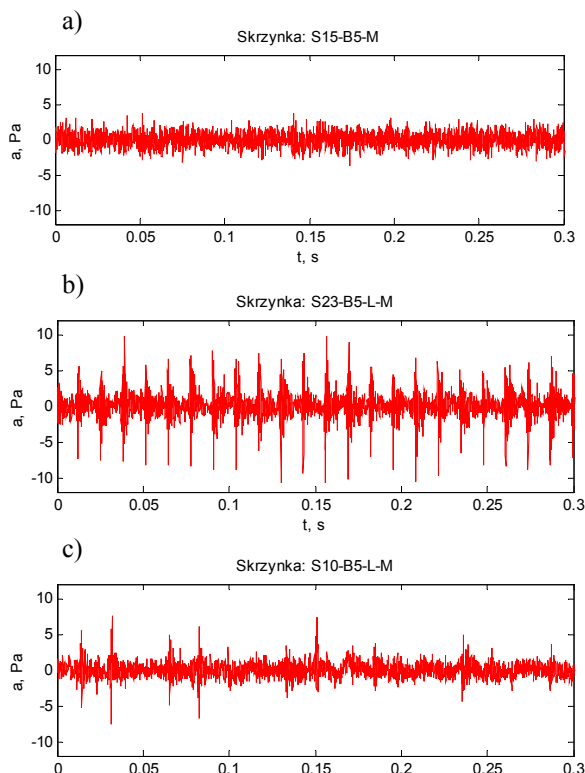
$$L = \frac{X_{AVE}}{\left(\frac{1}{T} \int_0^T |x(t)|^{1/2} dt \right)^2} \quad (9)$$

4.2. Analiza sygnałów WA

Obliczenia wartości wymienionych w pkt. 4.1 ocen punktowych i dyskryminant przeprowadzono dla sygnałów zarejestrowanych przy pracy skrzynki na każdym biegu (1-5, R) oraz dla pracy mechanizmu różnicowego (MR). W każdym przypadku dokonano rejestracji sygnałów drganiowych w paśmie do 6,4 kHz oraz sygnału akustycznego w paśmie do 10 kHz. Zarejestrowane sygnały zostały poddane dalszej obróbce cyfrowej w środowisku MATLABA oraz w programie DIAG_C526, przygotowanym specjalnie dla celów wspomagania diagnostyki skrzyń.

Jak wcześniej wspomniano duże nadzieje wiąże się z możliwością obserwacji większości usterek skrzyń przekładniowych w czasie testu na biegu 5. Prawdopodobne wnioskowanie na podstawie ww. wyników znacznie skróciłoby jednostkowy czas potrzebny do sprawdzenia jakości skrzyni, a co za tym idzie ograniczyło koszt produkcji. Dlatego też w dalszej części pracy szczególną uwagę poświęcono możliwości detekcji błędów wykonania i montażu skrzyń na biegu piątym. Na rys.5 przedstawiono przykładowe przebiegi czasowe sygnału ciśnienia akustycznego zarejestrowanego w czasie pracy skrzyni na piątym biegu. Rys.5a przedstawia przebieg czasowy zarejestrowany dla skrzynki przekładniowej uznanej jako dobra. Na rys.5b można zaobserwować efekt uszkodzenia pojedynczego zęba wirującego koła wstecznego biegu, z kolei na rys.5c widoczne są efekty objawiania uszkodzonego koła biegu 3 podczas pracy skrzynki na 5 biegu. Efekty te pojawiają się nieregularnie, co jest związane z powstawaniem drgań „luźnych” kół zębatych (nie przenoszących momentu obrotowego).

Analizując przedstawione przebiegi czasowe można stwierdzić, że ww. uszkodzenia winny mieć również odzwierciedlenie w wartościach wyznaczonych ocen punktowych oraz ich dyskryminant. Jednak już w pierwszej fazie badań zaobserwowano, że jednoznaczna ocena jakości skrzyni przekładniowej za pomocą pojedynczego parametru jest praktycznie niemożliwa, z uwagi na znaczny rozrzut wyników rejestrowanych dla obiektów należących do tej samej klasy (zbiory wartości różnych klas posiadają części wspólne). Dlatego też, celem dalszych badań jest znalezienie takich ocen punktowych lub funkcyjnych, których obserwacja da największe prawdopodobieństwo trafnej klasyfikacji i ewentualnie umożliwi wnioskowanie o przyczynie uszkodzenia.



Rys.5. Przykładowe przebiegi czasowe sygnału akustycznego:

a) skrzynka dobra, b) stuki na biegu, c) obijanie.

4.3. Wyniki badań

Przed wykonaniem obliczeń przeprowadzono filtrację zarejestrowanych sygnałów, której celem było odizolowanie bezużytecznego diagnostycznie zakresu wyższych częstotliwości. Ostateczne obliczenia wykonano dla szerokopasmowego sygnału przyspieszenia drgań korpusu skrzyni (od 1 Hz do 5 kHz) mierzonego w trzech kierunkach x, y, z oraz dla sygnału akustycznego M w paśmie od 20 Hz do 5 kHz. Przykładowe wyniki w postaci wyznaczonych ocen punktowych w czasie pracy skrzynki na 5 biegu przedstawiono w tablicy 1 – dla sygnału przyspieszenia drgań korpusu skrzynki, natomiast w tablicy 2 – dla sygnału ciśnienia akustycznego w polu bliskim.

Następnie określono wartości klasyfikatora stanu, porównując uzyskane wyniki dla skrzyń dobrych i złych oraz obliczono poprawność klasyfikacji stanu (wyrażoną w procentach jako *trafność oceny*) w funkcji rodzaju estymatora oraz sygnału źródłowego. Kolorem szarym w tablicach 1 i 2 zaznaczone te wartości cech liczbowych, które przekraczają przyjętą wartość odpowiedniego klasyfikatora stanu.

Z uwagi na ograniczoną objętość artykułu pozostałe wyniki obliczeń nie będą prezentowane w sposób szczegółowy. Natomiast na rys.6. przedstawiono w sposób graficzny ostateczny rezultat statystycznej obróbki wyników obliczeń.

Tablica 1. Wyniki analizy sygnału przyspieszenia drgań (a , m/s^2) w kierunku X , na biegu 5.

Nr skrz	X AVE	X RMS	P-P	K	C	I	k	Rodzaj uszkodzenia
1	30,4	39,4	373	1,29	4,38	5,66	3,88	uzębienie 2 biegu
2	36,6	46,9	410	1,28	4,31	5,53	3,44	bicie koła (57) prz. gl.
3	34,8	45,0	401	1,29	4,19	5,42	3,72	uzębienie 4 biegu
4	34,0	44,0	432	1,29	4,36	5,64	3,72	łożysko kulkowe
5L	29,1	43,4	554	1,49	5,90	8,80	9,31	uzęb. koła prz. gl. (16)
6	44,4	59,0	582	1,33	4,86	6,46	4,60	wadliwy montaż stosu
7	28,5	38,5	543	1,35	5,93	8,02	6,03	wadliwy montaż MR
8	31,8	41,3	507	1,30	4,52	5,88	4,64	bicie koła 5 biegu
9	31,9	42,1	489	1,32	4,78	6,31	4,65	wadliwy montaż MR
10L	22,4	30,9	443	1,37	6,81	9,38	6,74	uzębienie 3 biegu
11	40,4	53,3	653	1,31	6,17	8,13	4,70	bicie koła 1 biegu
12	32,1	40,9	365	1,27	4,11	5,25	3,67	uzębienie 1 biegu
13	36,5	46,2	368	1,26	3,73	4,71	3,13	łożysko stożkowe MR
14	28,9	36,8	319	1,27	3,88	4,95	3,48	brak
15	24,3	31,4	336	1,29	5,29	6,83	3,94	brak
16	22,9	29,0	286	1,26	4,93	6,25	3,40	brak
17	20,3	26,6	301	1,31	5,82	7,62	4,08	brak
18	26,2	34,5	354	1,31	4,84	6,38	4,84	skrzyw. wał. 0,2mm
19	24,8	31,6	315	1,27	4,49	5,71	3,49	skrzyw. wał. 0,45mm
20	30,2	39,2	360	1,30	4,97	6,46	3,96	uzębienie 5 biegu
21	31,9	43,6	552	1,36	6,58	8,99	6,11	bicie tulei I/II biegu
22	26,2	33,8	267	1,29	3,78	4,88	3,53	łożysko kulkowe
23L	41,2	66,2	958	1,60	6,87	11,02	10,7	uzębienie koła RM
24	35,9	46,2	433	1,28	4,76	6,13	3,87	uzębienie tulei I/II
25L	29,3	42,2	527	1,44	6,11	8,79	6,88	uszk. 2 zęby koła 5 b.
	30,0	39,0	350	1,35	6,00	8,00	4,50	wart. klasyfikatora

Tablica 2. Wyniki analizy sygnału ciśnienia akustycznego (p , Pa) zarejestrowane na biegu 5.

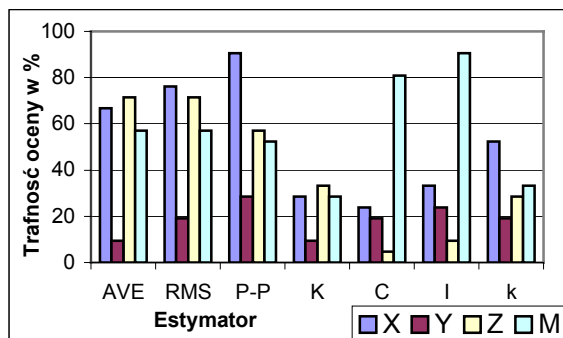
Nr	X AVE	X RMS	P-P	K	C	I	k	
1	0,99	1,25	10,5	1,26	4,55	5,76	3,21	uzębienie 2 biegu
2	0,99	1,25	11,8	1,26	4,65	5,87	3,29	bicie koła (57) prz. gl.
3	0,92	1,17	9,0	1,27	3,69	4,68	3,26	uzębienie 4 biegu
4	0,86	1,07	8,4	1,25	4,01	4,99	2,99	łożysko kulkowe
5L	1,29	1,81	22,9	1,40	6,26	8,78	6,86	uzęb. koła prz. gl. (16)
6	1,14	1,46	12,4	1,28	4,56	5,83	3,46	wadliwy montaż stosu
7	1,07	1,34	12,9	1,28	4,91	6,29	3,69	wadliwy montaż MR
8	1,25	1,58	15,9	1,27	4,43	5,63	3,49	bicie koła 5 biegu
9	0,88	1,12	8,9	1,27	4,12	5,23	3,27	wadliwy montaż MR
10L	0,78	1,05	15,1	1,34	7,17	9,60	6,58	uzębienie 3 biegu
11	1,20	1,52	13,4	1,26	4,76	6,01	3,31	bicie koła 1 biegu
12	1,08	1,36	11,1	1,25	4,57	5,74	3,08	uzębienie 1 biegu
13	0,78	0,98	7,9	1,26	4,17	5,26	3,16	łożysko stożkowe MR
14	0,61	0,77	6,0	1,25	3,74	4,69	3,04	brak
15	0,82	1,03	7,8	1,25	3,63	4,54	3,02	brak
16	0,94	1,18	9,7	1,26	3,77	4,76	3,23	brak
17	0,95	1,23	10,1	1,28	3,82	4,89	3,55	brak
18	1,15	1,45	11,4	1,27	3,97	5,03	3,23	skrzyw. wał. 0,2mm
19	1,08	1,37	11,6	1,27	3,95	5,01	3,24	skrzyw. wał. 0,45mm
20	0,97	1,26	12,9	1,30	5,85	7,61	4,08	uzębienie 5 biegu
21	1,10	1,43	15,9	1,30	5,91	7,67	4,10	bicie tulei I/II biegu
22	0,74	0,94	7,20	1,26	3,97	5,01	3,07	łożysko kulkowe
23L	1,12	1,66	24,2	1,48	7,75	11,5	9,80	uzębienie koła RM
24	1,04	1,35	12,3	1,29	5,05	6,54	3,85	uzębienie tulei I/II
25L	1,19	1,78	21,7	1,50	6,00	9,01	9,19	uszk. 2 zęby koła 5 b.
	1,00	1,30	12,0	1,30	4,00	5,00	3,80	wart. klasyfikatora

Obserwując zmiany wartości międzyszczytowej X_{P-P} przyspieszeń drgań w kierunku X oraz współczynnika impulsowości I wyznaczonego z sygnału akustycznego zarejestrowanego w polu bliskim można prawidłowo przeprowadzić ocenę wstępną aż 90 % badanych skrzyń.

Uznano również, że na uwagę zasługują te wartości estymatorów, które charakteryzują się ponad 50% wykrywalnością złego stanu skrzynki, a więc:

- wartość średnia X_{AVE} , skuteczna X_{RMS} oraz kurtoza k sygnału drganiowego w kier. X ,
- wartość średnia X_{AVE} , skuteczna X_{RMS} oraz międzyszczytowa X_{P-P} sygnału drganiowego w kier. Z ,
- wartość średnia X_{AVE} , skuteczna X_{RMS} , międzyszczytowa X_{P-P} oraz współczynniki szczytu C sygnału akustycznego w polu bliskim.

Wrażliwość diagnostyczna pozostałych estymat jest zbyt niska, by można było na ich podstawie dokonać klasyfikacji typu: *skrzynka dobra lub zła*.



Rys.6. Poprawność klasyfikacji skrzynek *dobra-zła* w zależności od wybranego estymatora liczbowego, prowadzonej w czasie testu na biegu 5:

AVE – wartość średnia, RMS – wartość skuteczna, P-P – wartość międzyszczytowa, K – wsp. kształtu, C – wsp. szczytu, I – wsp. impulsowości, k – kurtoza

X, Y, Z – obserwacja sygnału przyspieszenia drgań odpowiednio w kierunku x, y i z, M – obserwacja przebiegu ciśnienia akustycznego.

5. PODSUMOWANIE

Obserwując wartości opisanych w rozdziale 4.3 estymatorów punktowych wyznaczonych z szerokopasmowych przebiegów czasowych badanych sygnałów wibroakustycznych można z dużym prawdopodobieństwem właściwie określić poprawność wykonania i montażu skrzyń w warunkach produkcyjnych. Przedstawiony sposób oceny jakości skrzyń może okazać się zupełnie wystarczający dla potrzeb dokonania klasyfikacji: *produkt dobry* - *produkt zły*. Należy jednak pamiętać, że generowany przez skrzynkę przekładniową sygnał wibroakustyczny jest sumą efektów jednoczesnej pracy wielu elementów (koła zębate, wałki, łożyska), które dodatkowo wzajemnie się zakłócają. Dlatego też w niektórych przypadkach ocena taka może być nieprawidłowa. Wydaje się więc konieczne dalsze poszukiwanie innych, bardziej zaawansowanych metod analizy sygnałów, które znacznie zwiększą dokładność oceny i jednocześnie umożliwią wnioskowanie o przyczynach wystąpienia usterki. Aktualnie trwają prace nad wykorzystaniem takich technik jak:

- analiza funkcji korelacji własnej i wzajemnej,
- analiza częstotliwościowa,
- analiza obwiedni sygnału w połączeniu z fft,
- analiza cepstrum sygnału,
- analiza sygnałów w pasmach częstotliwości zorientowanych uszkodzeniu.

6. LITERATURA

- [1]. Boczkowski A.: *Sposób oceny jakości wykonania samochodowych skrzyń przekładniowych w warunkach przemysłowych*. Materiały IV Szkoły Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji. Jurata 15-19 maja 2000. Str. 355-361.
- [2]. Boczkowski A.: *Analiza wrażliwości diagnostycznej wybranych ocen sygnałów wibroakustycznych w dziedzinie czasu na przykładzie samochodowych skrzyń przekładniowych*. Materiały XI Konferencji „Diagnostyka Maszyn Roboczych i Pojazdów” i „III Forum Młodych 2002”. Bydgoszcz – Borówno, 13-15 czerwca 2002.
- [3]. Cempel Cz.: *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*. WNT Warszawa 1982.
- [4]. Kaźmierczak J., Boczkowski A. (Silesian Technical University, Gliwice), Świerczek T., Cichowski A. (Fiat Auto Poland S.A., Bielsko Biala): *A conception of the method of testing gears for the automotive industry*. 32nd ISATA Conference. 14-18 June 1999 Vienna.
- [5]. Żółtowski B., Ćwik Z.: *Leksykon diagnostyki technicznej*. Wydawnictwa uczelniane ATR Bydgoszcz. Warszawa 1996.



Mgr inż. Arkadiusz Boczkowski w roku 1999 ukończył studia dzienne na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej i został zatrudniony jako asystent w Katedrze Podstaw Systemów Technicznych na Wydziale Organizacji i Zarządzania Politechniki

Śląskiej w Gliwicach. Jego zainteresowania naukowe skupiają się wokół takich zagadnień jak: metody diagnostyki wibroakustycznej maszyn i urządzeń, ochrona środowiska przed drganiami i hałasem oraz miernictwem i systemami pomiarowymi. Na Wydziale Organizacji i Zarządzania prowadzi działalność dydaktyczną i naukową. Mgr inż. Boczkowski jest autorem ponad 20 publikacji naukowych prezentowanych na konferencjach krajowych i zagranicznych oraz w czasopiśmie fachowych, jest współautorem książki wydanej przez WNT z serii CAD/CAM pt. *Wspomaganie konstruowania układów biernej redukcji drgań i hałasu maszyn* oraz współautorem blisko 10 ekspertyz i prac badawczych dla przemysłu. Posiada otwarty przewód doktorski na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo Hutniczej w Krakowie.

ROZPROSZONE SYSTEMY MONITORINGU W DIAGNOSTYCE MASZYN*

Tadeusz Uhl¹, Artur Hanc²

¹ Akademia Górniczo – Hutnicza w Krakowie

² Energocontrol sp.z o.o, Kraków

Streszczenie

W pracy przedstawiono nowe rozwiązania sprzętowe - programowe w diagnostyce obiektów technicznych w oparciu o technologię rozproszonych układów pomiarowych. Podstawową jednostką takiego systemu jest układ zbierania i rejestracji danych do którego dostęp zapewniony jest poprzez przeglądarkę stron internetowych. Przedstawione zostanie praktyczne rozwiązanie zaproponowanego systemu do realizacji diagnostyki maszyn wirnikowych.

Summary

In the paper a new concept of monitoring system based on distributed measuring systems technology. Hardware and software solutions applied in the monitoring system are detail discussed. The basic unit in proposed system is embedded measuring system with direct interface to Internet. Embedded home page microserver build in the system gives possibility to access to the data from Internet Explorer or Netscape without any application software. Implementation of distributed system for rotating machinery diagnostics is described.

1 Wstęp

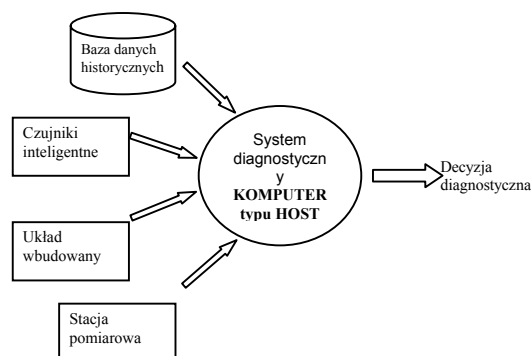
W ostatnim okresie czasu obserwuje się dynamiczny rozwój informatycznych systemów pomiarowych, a przede wszystkim systemów sieciowych opartych na technologiach internetowych. Związane jest to głównie z rozwojem sprzętu i oprogramowania oraz powszechnością występowania infrastruktury komunikacyjnej oraz aplikacji związanych z dostępem do zasobów sieci. W szczególności należy zwrócić uwagę na bardzo dynamiczny rozwój systemów z wbudowanymi serwerami WWW które, jak wykazują badania rynku, w najbliższym czasie zdominują urządzenia podłączane do sieci komputerowych [2]. Ma to bezpośredni wpływ na kierunki rozwoju systemów pomiarowych, sterujących i diagnostycznych. Wprowadzenie nowo dostępnych technik informatycznych do systemów monitoringu stwarza nowe możliwości ich realizacji, a przede wszystkim obniża ich koszt. Obniżenie kosztu realizacji systemów monitorowania i diagnostyki maszyn może spowodować upowszechnienie ich stosowania, co będzie miało bezpośredni związek z możliwością obniżenia kosztów eksploatacji maszyn, dla których największe znaczenia ma możliwość wcześniejszego przewidywania możliwych awarii i przestojów oraz wcześniejszego określania zakresu planowanego remontu.

Podstawową wiedzę o obiektach dla celów realizacji współczesnej diagnostyki dostarczają zarówno systemy sterowania jak i specjalizowane systemy

monitorowania. W pierwszym przypadku wykorzystuje się zmienne procesowe, w drugim wyniki pomiarów specjalnych, najczęściej procesów resztkowych takich jak drgania, czy hałas. Sam proces diagnostyki w większości znanych autorom rozwiązań jest realizowany w sposób off-line na komputerze typu *host*, integrującym poprzez sieć komunikacyjną wszystkie elementy dostarczające informacje umożliwiające wygenerowanie poprawnej decyzji diagnostycznej.

Takimi danymi są: dane o historii eksploatacji z uwzględnieniem występujących wcześniej awarii, dane bieżące o procesach technologicznych i procesach resztkowych.

Ogólny schemat systemu diagnostycznego przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Schemat systemu diagnostycznego

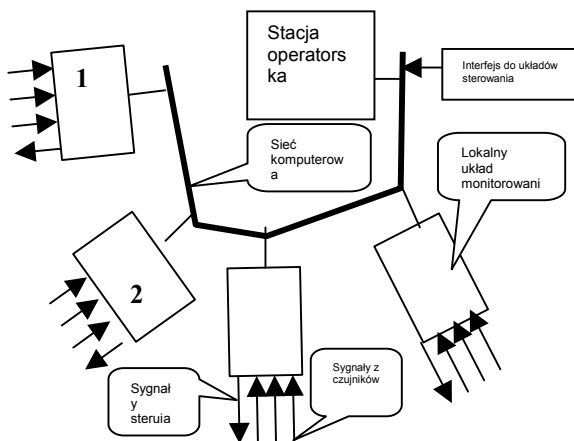
* Pracę zrealizowano w ramach projektu celowego KBN nr 6T07 049 2001C/5528

Dane o historii awarii i remontów dostarczają bardzo istotnych z punktu widzenia diagnostyki informacji przede wszystkim dotyczących oceny ryzyka awarii oraz ustalenia koniecznych do realizacji pomiarów w czasie monitorowania. Jedną z technik analizy danych historycznych w procesie diagnozowania są techniki RCM (ang. Reliability Centered Maintenance) [6,7], które umożliwiają prowadzenie analiz i ułatwiają podejmowanie decyzji diagnostycznych na podstawie zebranych wcześniej doświadczeń eksploatacyjnych [7]. Jednym ze związanych z tym zagadnień jest zagadnienie przeszukiwania baz danych pod kątem określania relacji diagnostycznych pomiędzy stanami procesu, zdarzeniami eksploatacyjnymi oraz stanem obiektu. Algorytmy te są w literaturze nazywane algorytmami „data mining” [8]. Inne podejście do diagnostyki oparte jest na analizie bieżących danych z pomiarów pewnych wielkości fizycznych niosących informacje o stanie maszyny. Danych tych dla systemów diagnostycznych dostarczają układy ciągłego monitorowania.

Jak widać na rysunku 1 układy takie zawierają stacje pomiarowe. Jako stacje pomiarowe mogą być zastosowane zarówno komputery przemysłowe jak i czujniki inteligentne wyposażone w procesory komunikacji sieciowej oraz lokalne wbudowane układy monitorowania zawierające zarówno interfejsy do czujników jak i interfejsy sieciowe umożliwiające integrację poszczególnych układów lokalnych i utworzenie w oparciu o łącza komunikacyjne rozproszonego układu monitorowania. Rozwój tych ostatnich układów w chwili obecnej jest najszybszy, ze względu na możliwość implementacji w nich serwerów Internetowych co ułatwia dostęp do zbieranych z czujników informacji i ich wstępnego przetwarzania lub też archiwizacji.

Systemy oparte o stacje procesowe w postaci komputerów przemysłowych mają wiele implementacji, jedną z nich w zastosowaniu do systemu monitorowania turbin wykonał zespół Katedry Robotyki i Dynamiki Maszyn AGH [12]. Opracowany system (rys.2) składa się z dwóch zasadniczych elementów: stacji pomiarowej, której konstrukcja oparta jest na komputerze z magistralą VME, odpowiednich kart wejścia / wyjścia umożliwiających zbieranie informacji z czujników, systemu automatyki oraz układów zabezpieczeń oraz stacji operatorskiej zawierającej odpowiednie graficzne interfejsy użytkownika, aplikacje wspomagające decyzje diagnostyczne, aplikacje bazo-danowe oraz aplikacje zarządzające zebraną informacją diagnostyczną. Oprogramowanie zaimplementowane na stacji procesowej jest najczęściej oprogramowaniem czasu rzeczywistego, natomiast oprogramowanie stacji operatorskiej jest w chwili obecnej implementowane w systemie MS WINDOWS ze względu na jego powszechność i łatwość obsługi. W wielu przypadkach systemów do monitorowania procesów wolnozmiennych stosuje się MS WINDOWS jako system operacyjny w stacjach

procesowych, procesowych przypadkach procesów dla których wymagana jest duża prędkość przetwarzania sygnałów oraz muszą być zachowane ściśle reżimy czasowe stosuje się systemy operacyjne czasu rzeczywistego takie jak OS-9, VxWorks, QNX lub też nakładki czasu rzeczywistego na system MS WINDOWS (jednym z produktów jest RTX) lub LINUX (RT LINUX). Jak wykazały testy przeprowadzone przez zespół Katedry Robotyki i Dynamiki Maszyn AGH [5] w przypadku systemu monitorowania drgań turbin wystarczającą wydajność dla celów zbierania i przetwarzania sygnałów ma nakładka czasu rzeczywistego RTX. Opisany wyżej system charakteryzuje się tym, że procesor centralny stacji procesowej przetwarza i zbiera sygnały, co w wielu przypadkach ogranicza bądź to możliwości implementacji specjalnych algorytmów diagnostycznych, bądź też ogranicza liczbę możliwych do podłączenia kanałów pomiarowych.



Rys.2. Scentralizowany układ monitorowania o architekturze stacji procesowej- stacji operatorskiej.

Inne własności mają rozproszone systemy monitorowania, zbudowane w oparciu o lokalne układy wbudowane, z których każdy jest wyposażony w odpowiedni procesor (układ System On Chip). Konstrukcja systemów rozproszonych ma architekturę modułową umożliwiającą dowolne konfigurowanie systemu monitoringu, a ich integracja jest realizowana najczęściej przez łącza teleinformatyczne wyposażone odpowiedni protokół transmisji danych. Schematycznie rozproszony system monitorowania przedstawiono na rysunku 3.

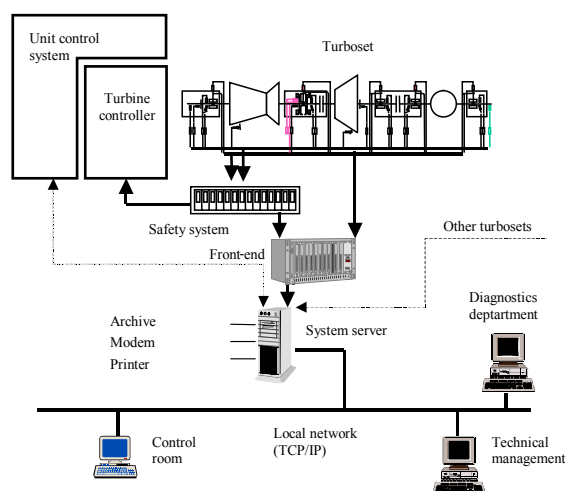
Podstawowym zadaniem lokalnego układu monitorowania jest zasilanie czujnika, wstępne przetwarzanie sygnału, wyznaczenie estymatora wymaganego dla oceny stanu oraz rejestracja w pamięci danych w czasie realizacji pomiarów.

W wielu rozwiązaniach układ wbudowany posiada możliwość programowania sesji pomiarowej oraz zakresu z zewnętrznego komputera stacji operatorskiej. Programowanie parametrów pomiaru lub przetwarzania sygnałów może być zrealizowane poprzez sieć komputerową wykorzystując mechanizmy TCP/IP lub łącza szeregowego.

Jeśli system monitorowania ma pracować w czasie rzeczywistym w zakresie wszystkich kanałów

pomiarowych jednocześnie (przy wstępnej obróbce sygnałów przez układy lokalne), wtedy wymagane jest zastosowanie przemysłowych interfejsów sieciowych opartych o złącza szeregowo (np. MODBUS, PROFIBUS, itp.).

Tylko w tym przypadku można uzyskać determinizm działania całego systemu monitorowania. Z drugiej strony zastosowanie złącza TCP/IP stosowanego w typowych sieciach komputerowych, najczęściej już istniejących w danym zakładzie, w którym instaluje się system monitoringu umożliwia łatwiejszy dostęp do danych gromadzonych w lokalnych układach monitoringu danych przez wielu użytkowników jednocześnie.



Rys.3. Schemat rozproszonego układu monitorowania

Pojedynczy moduł tak zaprojektowanego układu może lokalnie stanowić system zabezpieczeń monitorowanej konstrukcji. Sygnał przekroczenia określonego progu wartości mierzonej może być włączony w układ zabezpieczeń monitorowanej maszyny. Zarejestrowane wielkości mogą być odczytane, najczęściej poprzez złącze szeregowo do komputera w celu dokonania analizy trendów. Analiza trendów jest podstawowym i najprostszym narzędziem diagnostycznym stosowanym w praktycznych rozwiązaniach układów monitorowania w systemach diagnostyki wibroakustycznej. Dla jej realizacji w lokalnym układzie monitorowania konieczna jest rejestracja sygnałów. Z punktu widzenia konstrukcji sprzętu architektura lokalnego układu monitorowania jest modułowa, a poszczególne kanały wejściowe z czujników są obsługiwane poprzez odpowiednie nakładki. Na bazie lokalnych układów monitorowania można budować duże rozproszone układy monitorowania, a ilość możliwych do włączenia lokalnych modułów zależy od zastosowanych standardów złącza komunikacyjnego. Wiele z dostępnych na rynku układów posiada wbudowane wyjście analogowe dla celów realizacji specjalistycznych analiz sygnału w chwili wykrycia uszkodzenia monitorowanego obiektu. Analizy te

ułatwiają określenie przyczyny wystąpienia uszkodzenia. Bardziej zaawansowane systemy zawierają procesor sygnałowy umożliwiający realizację złożonych analiz sygnałów.

Zupełnie nowe możliwości stwarza technologia mikroserwerów WWW, często w literaturze nazywanych nano- lub piko-serwerami. Wbudowanie tego typu serwera do lokalnego układu monitorowania umożliwia umieszczanie w sieci danych bieżących o stanie monitorowanego obiektu. Tego typu układy nazywane są internetowymi systemami monitorowania i w najbliższej przyszłości nastąpi ich znaczny rozwój. W niniejszej pracy opisany zostanie internetowy system monitorowania stanu maszyn którego konstrukcja oparta jest na nanoserwerach WWW. W połączeniu z technikami telefonii komórkowej stworzy możliwości powszechnego zastosowania telediagnostyki.

2. Koncepcja rozproszonego systemu monitorowania

Internetowy system monitorowania składa się z trzech podstawowych podsystemów:

- stacje klienckie,
- system komunikacyjny,
- serwer danych (WWW, PPP, FTP).

Schemat zaprojektowanego układu monitorowania przedstawiono na rysunku 4.

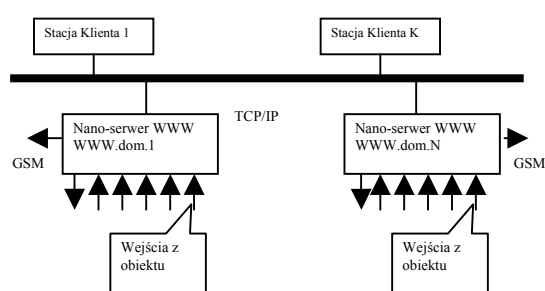
Jako stacje klienckie mogą być zastosowane dowolne komputery posiadające kartę sieciową umożliwiającą podłączenie komputera do Internetu wraz z unikalnym numerem IP oraz oprogramowaniem w postaci przeglądarki stron internetowych np. MS Internet Explorer, NETSCAPE. Przy użyciu tego oprogramowania użytkownik (o odpowiednich prawach dostępu) ma możliwość dostępu do danych zmierzonych na monitorowanym obiekcie oraz możliwość oddziaływania na zakres pomiaru lub w niektórych przypadkach bezpośrednio na obiekt. W systemie tym informacje pomiarowe są przesyłane pomiędzy nanoserwerem WWW a stacją kliencką klientką postaci tekstowych stron WWW napisanych w języku HTML. System komunikacyjny oparty jest na protokole TCP/IP.

Najważniejszym elementem proponowanego rozwiązania jest wbudowany nanoserwer WWW. Część sprzętowa internetowego serwera wbudowanego oparta jest na specjalizowanym układzie typu *System On Chip* wyposażonym w sterowniki obsługi protokołów sieci Ethernet, zewnętrzną pamięć typu DATAFLASH oraz układy komunikacji z układem czujników lub innymi źródłami danych. W przypadku zaprojektowanego systemu jako układy komunikacji z czujnikami wykorzystano standardowe złącze szeregowo.

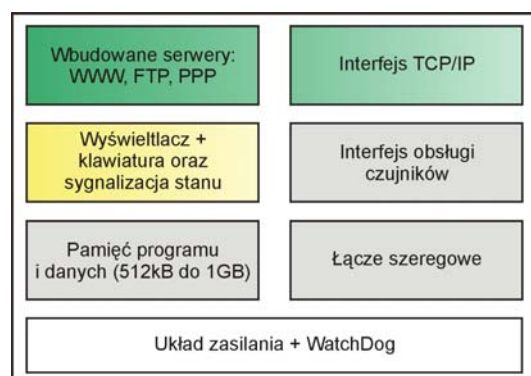
W systemie przewidziano dwa takie niezależne złącza: jedno do zbierania danych z czujnika, drugie natomiast do podstawowej konfiguracji systemu oraz ewentualnego połączenia modemu GSM.

Wykorzystując tego typu modem można bądź to wysyłać informacje na wybrany numer telefonu komórkowego postaci tekstowej typu SMS lub też umożliwić bezprzewodowe połączenie się z komputerem klienckim poprzez usługę GPRS.

Ze względu na ograniczenia sprzętowe, wbudowane serwery WWW realizują tylko wybrane funkcje stosu TCP/IP oraz w zaprojektowanym układzie nie realizują żadnych dodatkowych funkcji przetwarzania zbieranych danych pomiarowych. Do zbierania danych pomiarowych wykorzystywany jest moduł przetwarzania sygnałów wyposażony w procesor sygnałowy co umożliwia realizację nawet złożonych procedur przetwarzania sygnałów. Schemat zaproponowanego rozwiązania przedstawiono na rysunku 5.



Rys.4. Schematyczne przedstawienie zaprojektowanego internetowego układu monitorowania



Rys.5. Schemat zaprojektowanego układu monitorowania z serwerem www

W przedstawionym rozwiązaniu poszczególne moduły stanowią oddzielne elementy konstrukcyjne o standardowych interfejsach, taka architektura umożliwia łatwą zmianę funkcji poprzez wymianę poszczególnych modułów. W szczególności w praktyce bardzo przydatna jest możliwość wymiany modułów obsługi czujników, co daje możliwości zastosowania układu do monitorowania dowolnej wielkości fizycznej (wejście dla dowolnego czujnika). Do najczęściej stosowanych standardów w tym zakresie należą sygnały napięciowe, prądowe, ICP oraz sygnały binarne.

Do przetwarzania rejestrowanych sygnałów zastosowano procesor sygnałowy, którego moc obliczeniowa pozwala na realizację dowolnej funkcji przetwarzania sygnałów zakresu akustycznego w czasie rzeczywistym. W układzie zapewniona jest możliwość zewnętrznego programowania procesora poprzez złącza komunikacyjne. Standardowo procesor realizuje wyznaczanie wartości szczytowej i skutecznej sygnału oraz oblicza jego widmo. Zastosowane przetworniki analogowo cyfrowe pozwalają na programowanie częstotliwości próbkowania w zakresie od 1kHz do 20 kHz.

Układ posiada również lokalny interfejs użytkownika umożliwiający wprowadzanie danych kalibracyjnych oraz alarmowych poziomów dla mierzonych sygnałów oraz sygnalizację przekroczenia wartości alarmowej i odczyt wartości bieżącej wyznaczonej estymaty sygnału oraz .

Projektowany układ posiada wbudowane wyjścia sygnalizacji stanu, możliwe do wykorzystania w systemach zabezpieczeń (wyjścia binarne, stykowe), lub w układach automatyki (wyjścia stykowe, analogowe wyjścia prądowe). Ta ostatnia funkcja umożliwia rekonfigurację układu w przypadku stwierdzenia uszkodzenia oraz uwzględnienia aktualnego stanu obiektu w realizacji sterowania obiektem.

W projektowanym układzie monitorowania bardzo ważną rolę odgrywa oprogramowanie, które wizualizuje wyniki monitorowania na komputerze zdalnym, umożliwia zadawanie wartości alarmowych i wartości ostrzeżeń oraz informuje o ich przekroczeniu. Bardzo istotną funkcję w systemach monitorowania odgrywa baza danych historycznych. Opracowane oprogramowanie umożliwia tworzenie baz danych z wynikami pomiarów oraz umożliwia jej przeglądanie jak również analizę trendów, która w wielu przypadkach stanowi podstawowe narzędzie diagnostyczne.

W celu ułatwienia użytkownikom bardziej szczegółowych analiz w oprogramowaniu przewidziano opcję eksportu gromadzonych danych do arkusza kalkulacyjnego MS EXCEL®.

Interfejs użytkownika stacji operatorskiej pozwala na ustalanie jednostek wielkości pomiarowych, czułości zastosowanego czujnika, danych kalibracyjnych oraz progów alarmowych.

Oprogramowanie umożliwia również programowanie poszczególnych sesji pomiarowych poprzez eksport kodu programu dla procesora sygnałowego z komputera operatora do lokalnego układu monitorowania. Kod ten jest przygotowywany, kompilowany i testowany na stacji operatorskiej z wykorzystaniem środowiska TASKING. Gotowy kod binarny dedykowany dla zastosowanego procesora jest ładowany do jego pamięci (w przypadku opracowanego systemu do pamięci typu FLASH).

System monitorowania zbudowany według wyżej przedstawionych założeń jest bardzo elastyczny i może być stosowany dla potrzeb monitorowania różnych obiektów. Jego bardzo ważną cechą jest

możliwość realizacji zadań telediagnostyki poprzez wykorzystanie komercyjnie dostępnych złączy komunikacyjnych typu GSM.

Zaprojektowany w Katedrze Robotyki i Dynamiki Maszyn system monitorowania zaimplementowano i wdrożony w kilku rzeczywistych instalacjach przemysłowych.

3 Implementacja rozproszonego systemu monitorowania

Opracowany system nosi nazwę VIBCON (VIBration CONtrol) i jest w chwili obecnej dedykowany do realizacji telediagnostyki opartej o pomiary drgań i temperatury. Zastosowano w nim wiele nowatorskich z punktu widzenia konstrukcji układów monitorowania rozwiązań zarówno sprzętowych jak i programowych.

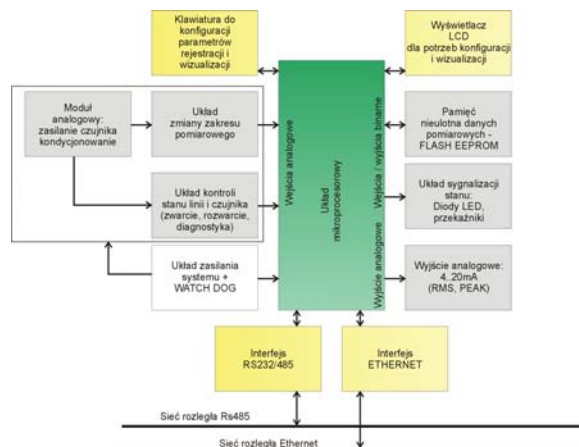
3.1 Rozwiązania sprzętowe

System wibrodiagnostyki maszyn i urządzeń został zaprojektowany i wykonany jako samodzielne urządzenie ciągłego monitorowania drgań (i temperatury). Urządzenie pozwala na jednoczesny pomiar wartości przyspieszeń i prędkości mierzonych drgań, oraz przeprowadza okresową analizę widma sygnału (na żądanie).

Urządzenie posiada wbudowane mechanizmy i wyjścia (LED i przekaźniki) do wykrywania i sygnalizacji stanu toru czujnika oraz przekroczeń określonych wartości drgań.

Dla potrzeb konfiguracji i wyświetlania układ wyposażono w klawiaturę i wyświetlacz LCD. Możliwe jest skonfigurowanie konwersji wartości RMS lub PEAK na wyjściowy prąd w zakresie 4...20mA.

Najważniejszą cechą układu jest możliwość komunikacji z wykorzystaniem interfejsów sieci rozległych: ETHERNET i RS485.

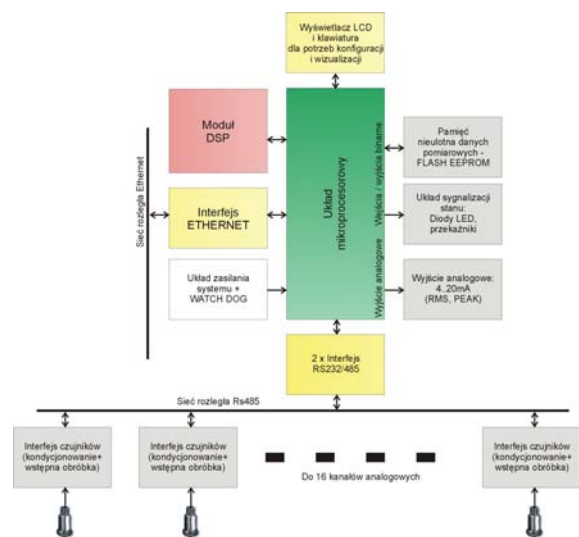


Rys.6 Dwukanałowy moduł diagnostyczny

Szczególnie możliwość włączenia urządzenia do rozległej sieci Internet daje nową jakość w dziedzinie mechatroniki. Na rysunku (6) przedstawiono blokowy schemat urządzenia dwukanałowego natomiast na rysunku (7) system z rozproszonymi czujnikami z komunikacją szeregową.

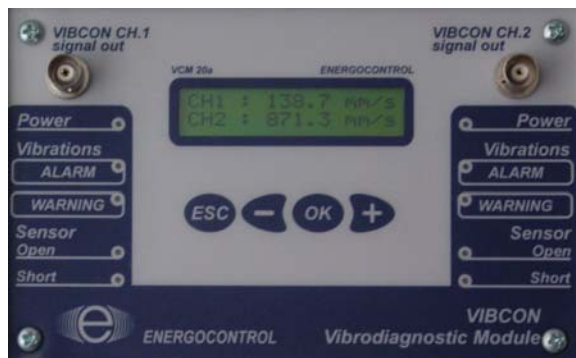
Cechy funkcjonalne modułu wibrodiagnostyki maszyn z wbudowany serwerem sieci są następujące:

- współpraca z czujnikami drgań umożliwiającą pomiar prędkości i przyspieszeń
- odczyt aktualnych wartości i ich rejestracja (RMS, PEAK) w wewnętrznej nieulotnej pamięci FLASH



Rys.7 System diagnostyczny VibNet z rozproszonymi modułami czujników

- wyświetlacz i klawiatura do konfiguracji parametrów pomiarów i rejestracji
- wyjścia sygnalizacji stanów alarmowych – przekroczenia progowych wartości drgań
- kontrola stanu obwodu czujnika
- bezpośrednie połączenie sieciowe TCP/IP umożliwiające zdalny monitoring oraz konfigurację parametrów
- obsługa z wykorzystaniem serwera WWW (przez stronę internetową)
- obsługa do 16 kanałów analogowych (częstotliwość próbkowania dla potrzeb obróbki do 20kHz)
- możliwość wykonywania analizy widmowej dla każdego z kanałów
- elastyczność funkcjonalna – prosta wymiana funkcji oprogramowania



Rys. 8. Widok dwukanałowego modułu wibrodiagnostycznego

Urządzenie jest w pełni programowalne, oprogramowanie można zmieniać poprzez sieć komputerową do której jest podłączone, jak również w ograniczonym zakresie z poziomu wbudowanej klawiatury.

3.2 Rozwiązania programowe

Oprogramowanie w rozproszonym systemie monitorowania składa się z dwóch modułów: moduł komputera operatora, moduł systemu wbudowanego. Bardzo istotną rolę w poprawnym funkcjonowaniu systemu odgrywa moduł oprogramowania komunikacyjnego.

3.2.1. Oprogramowanie komputera operatora

Dla potrzeb wizualizacji i kontroli pracy systemu Vibcon pracującego w sieci RS485, opracowane zostało dedykowane oprogramowanie pracujące na komputerze PC. Oprogramowanie to pozwala na wizualizację danych pomiarowych "On Line" z jednego bądź wszystkich urządzeń włączonych do sieci. Wbudowana przeglądarka danych historycznych umożliwia wizualizację oraz analizy rejestrowanych w modułach Vibcon danych. Z poziomu oprogramowania możliwa jest również pełna konfiguracja parametrów modułów diagnostycznych (poziomy alarmowe, zakresy pomiarowe, czas itp.) Na rys (9 i 10) przedstawiono widok przykładowych okien oprogramowania.

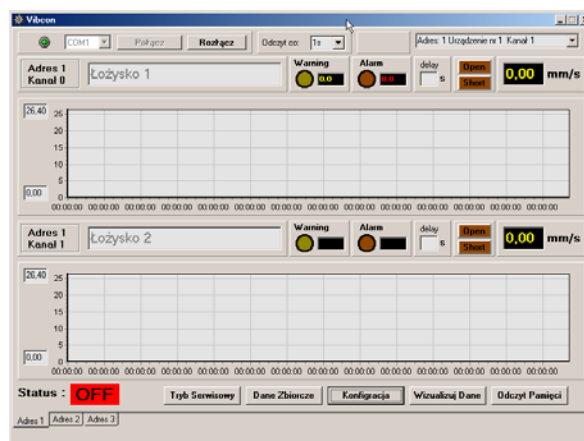
Nieco inną architekturę ma oprogramowanie realizujące dostęp do urządzenia pomiarowego z poziomu przeglądarki internetowej.

3.2.2. Maszyna jako serwer WWW

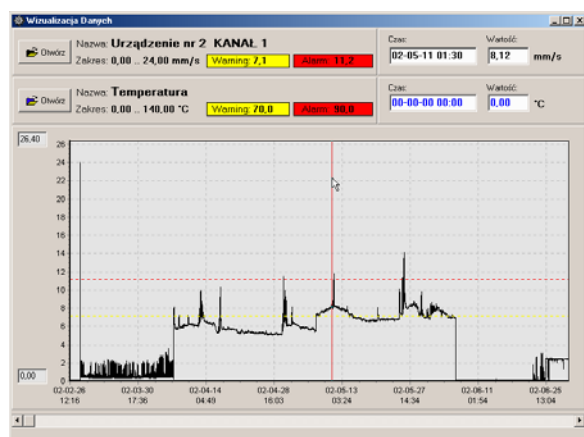
Możliwości zaprojektowanego urządzenia pozwalają na "serwowanie" danych o stanie i pracy maszyny w postaci strony internetowej WWW.

Możliwości te pozwalają na równoczesne i ciągle monitorowanie przez wielu użytkowników. Jednocześnie możliwa jest sygnalizacja przekroczenia stanów awaryjnych (poza standardowymi optycznymi polegającymi na zmianie koloru) poprzez wysłanie

informacji e-mailowych bądź SMS-owych do telefonu komórkowego



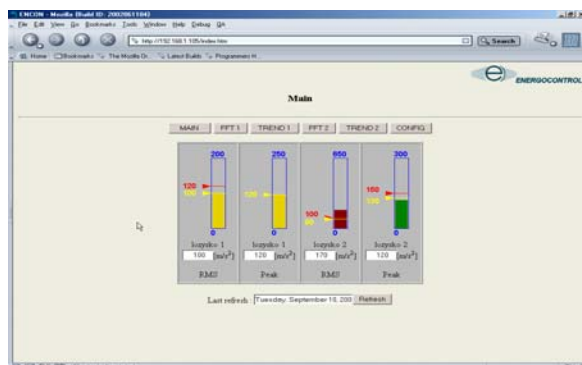
Rys. 9 Oprogramowanie współpracujące z modułami diagnostycznymi Vibcon z wykorzystaniem sieci RS485



Rys. 10 Widok przykładowego okna wizualizacji danych historycznych

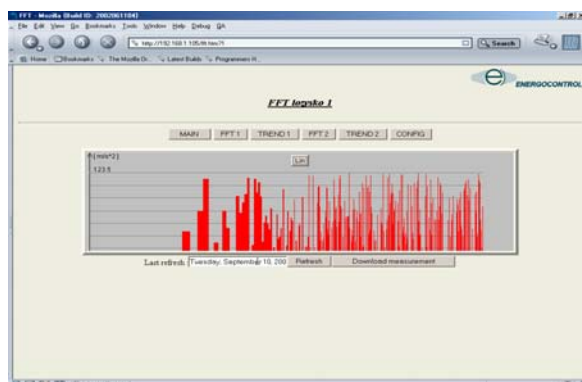
Podstawową zaletą tego rozwiązania jest możliwość korzystania przez użytkownika ze standardowej przeglądarki internetowej (MS Internet Explorer®, Netscape® itp.). Zwalnia to użytkownika z zakupu dodatkowego oprogramowania, a jednocześnie ułatwia "nawigację" po stronach z danymi diagnostycznymi serwowanymi przez moduły VibNet. Dodatkowym atutem jest automatycznie tworzona "baza danych" systemu diagnostycznego – każde kolejne urządzenie włączone w sieć i zarejestrowane w serwerze nazw, może być w prosty sposób wyszukiwane przez użytkownika poprzez nazwę. Prócz tego, stworzenie lokalnej listy występujących w danym systemie urządzeń w postaci strony HTML (na lokalnym serwerze WWW) upraszcza poruszanie się po złożonych systemach diagnostycznych i ich zarządzanie.

Na rysunku (11 i 12) przedstawiono przykładowe okna aplikacji w przeglądarce internetowej.



Rys.11 Przykładowy widok stanu drgań maszyny na stronie internetowej

Możliwość dołączenia do układu modułu DSP umożliwia wykonywanie dodatkowych obliczeń na sygnale czasowym bezpośrednio w urządzeniu, np. wykonanie analizy widmowej. Możliwe jest również proste dostosowanie oprogramowania DSP dla konkretnych potrzeb użytkownika i przesłania go z wykorzystaniem połączenia internetowego (FTP). Stanowi to o dużej elastyczności systemu, jak również o jego możliwościach rozwojowych.



Rys. 12 Przykładowy widok analizy widmowej sygnału drgań maszyny na stronie internetowej

4 Wnioski i uwagi końcowe

Możliwości współczesnych układów mikroprocesorowych, a w szczególności mikrosystemów wbudowanych pozwalają na ogromny wzrost możliwości systemów rozproszonych, zarówno sterowania jak i monitorowania. Wbudowanie protokołów sieciowych oraz serwerów internetowych (WWW, PPP, FTP i innych) sprawiają, że współczesne rozproszone systemy monitorowania stanowią coraz częściej stosowane w praktyce narzędzie ułatwiające diagnozowanie i monitorowanie eksploatowanej konstrukcji.

6 Literatura

1. Lutz, A.T., Using TCP/IP as an instrument interface, Sensors Magazine, no.6, 1999.

2. Pfeiffer O. Embedded Internet working with microcontrollers, Proc. of embedded system Conference, Chicago, IL, 2001.
3. Lee K.B., Scheeman R.D., Internet based Distributed Measuring systems and control applications, IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, pp.23-27, 1999.
4. Michta E., Technologie internetowe w sieciowych systemach pomiarowo sterujących, Auromecon, Poznań, 2001, s. 131-138.
5. Barszcz T., Uhl T., Informatyczne aspekty projektowania systemów monitorowania stanu maszyn – sprzęt i oprogramowanie, Diagnostyka no.2, 2001.
6. A.Pietrzyk, T.Uhl, Z. Piskorz, Wykorzystanie technik RCM w projektowaniu systemów monitorowania, ITE, Problemy Eksploatacji Maszyn, No.4, 2001, str. 273-279.
7. A. Pietrzyk, T.Uhl, Optymalizacja w eksploatacji maszyn i urządzeń, Diagnostyka, no.26, 2002.
8. Borglet C., Kruse R., Methods for data analysis and mining, J Wiley, Chichester, 2002.
9. Kruse R., Klose A., Information mining with fuzzy methods: Trends and current challenges, MMAR 2002, Szczecin, Sept. 2002, pp. 117-123.
10. Hanc A. Synergia Mechaniki i Elektroniki w projektowaniu mechatronicznym, Praca Doktorska AGH, 2002.
11. Uhl T., Trendy rozwojowe systemów monitorowania maszyn, PAK, no.4, 1999.
12. Barszcz T., System monitorowania stanu turbin-AIDA, Energetyka, no.4., 2001.

ZASTOSOWANIE ANALIZY OBRAZÓW W IDENTYFIKACJI ZMIAN CECH SYGNAŁÓW DIAGNOSTYCZNYCH

Anna TIMOFIEJCZUK

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Śląska
Ul. Konarskiego 18 a, 44-100 Gliwice, fax: 237 13 60, atimofiejczuk@kpkmt.polsl.gliwice.pl

Streszczenie

Wyniki analizy sygnałów drganiowych, rejestrowanych podczas badania maszyn wirnikowych w zmiennych warunkach działania, zapisywane są w postaci zbiorów cech będących podstawą diagnozowania o stanie obiektu. Najistotniejszym elementem interpretacji wyników tej analizy jest identyfikacja zmian cech sygnałów, które mogą być symptomem wystąpienia określonego zjawiska lub niesprawności. Interpretacja ta jest często trudna gdyż obserwowane zmiany mogą być wynikiem nie tylko zmiany stanu, ale także zjawisk związanych z działaniem obiektu zjawisk zachodzących w jego otoczeniu.

Referat dotyczy sposobu interpretacji wyników analizy sygnałów z zastosowaniem prostych metod analizy obrazów pozwalających na identyfikację zmian. Prezentowane zagadnienia są fragmentem badań związanych z opracowywanym systemem automatycznego diagnozowania.

Słowa kluczowe: diagnostyka techniczna, identyfikacja zmian, analiza obrazów

Application of image analysis for identification of changes in varying conditions of diagnostic signal features

Summary

Results of analysis of vibrations recorded during an observation of operation of rotating machinery in varying conditions are yielded in a form of sets of features. They are fundamental to diagnosing of the machinery state. The most important problem of an interpretation of the analysis results is identification of changes that can be symptoms of a phenomenon or malfunction occurrence. Since, observed changes can be not only considered as effects of phenomena related to the object but also as results of phenomena occurring in the object neighbourhood, the interpretation of the results is often difficult.

The paper deals with a way of the interpretation of the signal analysis results with the use of simple methods of an image analysis that make it possible to identify changes. Described problems are a part of research concerning a system of automatic diagnosing, which is worked out.

Key words: diagnostics, change identification, image analysis

1. WSTĘP

Nieniszczące badania diagnostyczne maszyn wirnikowych przeprowadzane podczas działania obiektu polegają na obserwacji i analizie sygnałów resztkowych, z których najczęściej obserwowane są drgania. Wyniki analizy sygnałów zapisywane są zwykle w postaci zbiorów cech (np. wartości średnich, wartości średniokwadratowych, widm mocy), które są podstawą do diagnozowania o stanie obiektu. Należy podkreślić, że sygnały rejestrowane w czasie działania maszyny wirnikowej są w większości przypadków niestacjonarne, co oznacza, że ich cechy statystyczne są funkcjami czasu [6] [15]. Sygnały takie, oprócz wymienionych wyżej cech, wymagają zastosowania specjalnych metod ich analizy, których wyniki prezentowane są głównie w postaci charakterystyk. Przykładem są

charakterystyki czasowo-częstotliwościowe (wynik krótkoczasowej analizy Fouriera, ang. STFT) [4] [9] [15].

Najistotniejszym elementem interpretacji wyników analizy sygnałów jest identyfikacja zmian, które mogą być rozpatrywane jako zmiany w czasie mikro (w ramach jednej realizacji sygnału) lub w czasie makro (zmiany zidentyfikowane na podstawie analizy kilku realizacji sygnałów). Zmiany amplitudy lub częstotliwości sygnału mogą być symptomem wystąpienia określonego zjawiska lub niesprawności, które mogą powodować zmianę stanu technicznego maszyny [4] [9] [15].

Ze względu na ilość uzyskiwanych informacji, jednymi z najbardziej interesujących rodzajów badań diagnostycznych są obserwacje obiektów podczas ich działania w zmiennych warunkach. Zaletą tych badań jest to, że nie wymagają one

stosowania zewnętrznych wzbudników drgań. Wzbudnikami drgań są w tym przypadku zawsze istniejące resztkowe niewyrównoważenia. [4] [9] [15]. Analiza sygnałów rejestrowanych podczas działania obiektu w zmiennych warunkach przy zastosowaniu metod pozwalających na jednoczesną identyfikację zmian w dziedzinach czasu i częstotliwości (np. analiza oparta na STFT) daje w większości przypadków bardzo złożone wyniki [9] [15]. Zbiór otrzymanych cech, a w szczególności obserwowane zmiany, są w tym przypadku nie tylko wynikiem zjawisk związanych z działaniem badanego obiektu ale także wynikiem zjawisk zachodzących w otoczeniu obiektu. Interpretacja takich wyników jest szczególnie trudna i jest obecnie przeprowadzana głównie w sposób wizualny.

Prezentowane w referacie badania są pierwszym etapem opracowywanego systemu automatycznego diagnozowania stanu maszyny opartego na koncepcji sceny dynamicznej [16] [17] [20]. Interpretacja wyników analizy sygnałów, w szczególności niestacjonarnych, polega w tym przypadku na zastosowaniu prostych metod przetwarzania i analizy obrazów pozwalających na identyfikację zmian analizowanych sygnałów drganiowych. W referacie opisano koncepcję sceny dynamicznej oraz wymieniono i krótko scharakteryzowano te metody analizy i przetwarzania obrazów, które mogą być przydatne dla opisywanych zagadnień. Kolejne etapy przetwarzania sygnałów i ich cech oraz identyfikacja zmian zostały pokazane na przykładzie wygenerowanych sygnałów testowych odpowiadających podstawowym rodzajom niestacjonarności sygnałów [4].

2. KONCEPCJA SCENY DYNAMICZNEJ

Podstawą opracowywanego systemu automatycznego diagnozowania stanu maszyn jest zastosowanie koncepcji sceny dynamicznej [16] [17] [20]. W potocznym rozumieniu, scena dynamiczna jest zbiorem obiektów, których cechy charakterystyczne takie jak: położenie, kolor, wielkość są funkcjami czasu. W opisywanych badaniach obiektami sceny są cechy sygnałów drganiowych rejestrowanych podczas działania maszyny. Przykładami takich obiektów sceny mogą być: przebieg w czasie wartości średniej, wartości średniokwadratowej, widmo mocy sygnału, zmiany temperatury czynnika roboczego, zmiany obciążenia czy charakterystyka rozruchowa lub wybiegowa. Należy zwrócić uwagę, że wymienione cechy są wyznaczane w różnych dziedzinach (funkcje różnych parametrów, czasu lub częstotliwości) i mogą być zapisywane jako macierze lub wektory o różnych rozmiarach. W przypadku omawianej problematyki, dotyczącej badania maszyn podczas ich działania w zmiennych warunkach, obiekty takie dostarczają zazwyczaj informacji dotyczącej nie tylko zmiennego działania maszyny ale określona

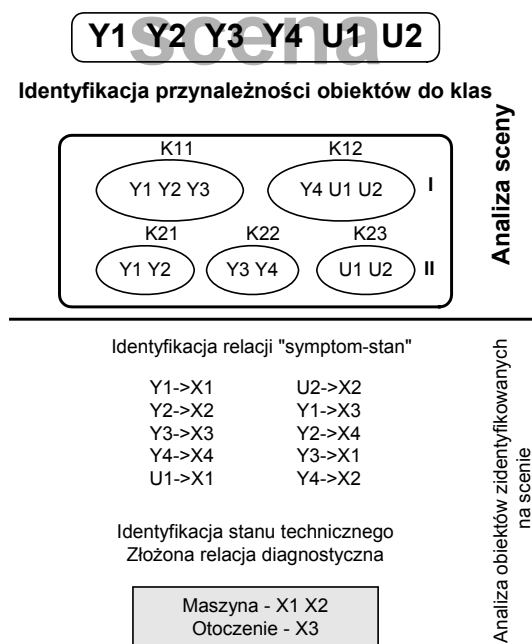
interpretacja ich zmian może także umożliwiać określenie oddziaływań zachodzących między maszyną i jej otoczeniem oraz zjawisk zachodzących w otoczeniu maszyny [9] [15] [16].

Opracowany sposób analizy sceny będącej zbiorem obiektów w postaci cech sygnałów diagnostycznych [18] oparto na analogii do analizy sceny w potocznym rozumieniu, która charakteryzuje się rozpatrywaniem obiektów z uwzględnieniem różnych grup kryteriów. Przykładem takiej interpretacji może być traktowanie pewnych obiektów jako pierwszoplanowych, innych jako drugoplanowych. Przejście do innej płaszczyzny spojrzenia na scenę pozwala na wyróżnienie kryterium związanego z identyfikacją ruchu obiektów czy przynależnością obiektów do zbiorów będących tłem, zakłóceniem lub zbiorem obiektów dostarczających określonych informacji. Rozważając rozpatrywanie sceny z uwzględnieniem różnych grup kryteriów, interpretacja sceny może być rozumiana jako podział obiektów na określone klasy. Kryteria należące do różnych grup (np. dotyczące ruchu obiektu, jego koloru) są całkowicie niezależne, co jest także charakterystyczne dla sceny dynamicznej rozumianej jako zbiór wyników analizy sygnałów drganiowych. Powyższe rozważania prowadzą do wniosku, że biorąc pod uwagę wszystkie możliwe płaszczyzny kryteriów rozpatrywania sceny, obiekty sceny mogą należeć do kilku klas jednocześnie. W ramach jednej grupy kryteriów obiekt należy zawsze do jednej klasy. Przynależność jednego obiektu do kilku klas w określonych przedziałach czasu jest pierwszą charakterystyczną cechą opisywanej koncepcji.

Ponadto, w przypadku opisywanych badań, scena jest dynamiczna, co oznacza, że jest zbiorem obiektów charakteryzujących się zmiennym opisem w funkcji czasu, a więc przynależność do określonych klas może ulegać zmianie. Pewne obiekty (cechy sygnałów) są w określonych przedziałach czasu traktowane jako elementy określonych klas, podczas gdy w kolejnych chwilach czasu te same cechy mogą należeć do innych klas. Taki sposób rozpatrywania elementów sceny pozwala przede wszystkim na identyfikację zmian, która może być interpretowana jako zmiana przynależności do klasy określonego obiektu (cechy sygnału). Zmiana jest zidentyfikowana, jeżeli możliwe jest podanie wartości jej zmiany (np. w poziomach amplitudy) i chwili czasu, w której ta zmiana wystąpiła. Zadanie to może być realizowane na kilka sposobów, a jednym z nich są zaprezentowane w punkcie 3. proste metody przetwarzania obrazów. Zastosowanie koncepcji sceny dynamicznej w procesie diagnozowania stanu pokazano na rys. 1.

Kolejne etapy analizy sceny związane są z wnioskowaniem diagnostycznym i mogą być także realizowane z zastosowaniem metod rozpoznawania obrazów, rozumianych w tym przypadku jako

metody rozpoznawania wzorców (ang. pattern recognition) [13].



Rys. 1. Schemat działania systemu automatycznego diagnozowania [16]

Na rys. 1 symbole Y1, Y2 Y3, Y4 odpowiadają cechom sygnałów. Symbole U1 i U2 oznaczają wartości innych parametrów (np. chwilową prędkość obrotową) zarejestrowanych podczas działania maszyny. Na rysunku wyróżniono dwie płaszczyzny rozpatrywania obiektów, z których pierwsza zawiera klasy K11 i K12, a druga K21, K22 i K23.

Celem drugiego etapu analizy sceny jest identyfikacja prostych relacji diagnostycznych. Na rys. 1 symbole X1, X2, X3 i X4 oznaczają stany jako wnioski określonych prostych (zawierających jedną przesłankę) relacji diagnostycznych. Przesłankami tych relacji są cechy, dla których określono czy wartość cechy w określonym przedziale czasu ulega zmianom. Trzeci etap polega na identyfikacji złożonego stanu technicznego na podstawie wcześniej zidentyfikowanych relacji prostych. Wyniki uzyskane w etapach pierwszym i drugim powinny umożliwiać sformułowanie diagnozy pozwalającej na rozróżnienie zmian związanych z badanym obiektem, zmian związanych ze zmiennymi warunkami działania obiektu oraz zmian zachodzących w otoczeniu obserwowanego obiektu.

3. WYBRANE METODY PRZETWARZANIA DANYCH OBRAZOWYCH

Działania wykonywane na danych obrazowych, ze względu na cel ich stosowania można podzielić na metody przetwarzania, analizy i rozpoznawania obrazów [12] [13] [21], a ze względu na sposób przeprowadzania tych operacji na metody jednopunktowe i metody semantyczne i syntaktyczne [5] [7] [13]. Podział ten nie jest pełny

i został przyjęty tylko dla potrzeb opisywanych badań.

Przetwarzaniem obrazu nazywa się metody, których wynikiem są również dane w formie obrazu [13]. Celem zastosowania tych metod jest: polepszenie jakości obrazu, wyostrenie lub detekcja określonych elementów obrazu (kątown, linii). Do metod przetwarzania obrazów należą filtracja, która polega głównie na usuwaniu zakłóceń, kwantyzacja polegająca na transpozycji poziomów szarości lub barw, wygładzanie obrazu, którego celem jest usunięcie szumu, wyostrenie i wykrywanie określonych elementów obrazu oraz binaryzacja polegająca na redukcji zakresu wartości parametrów opisujących obraz.

Analizą obrazu nazywa się operacje, które w wyniku dają opis obrazu [13]. Podstawową metodą analizy obrazu jest segmentacja, której celem jest oddzielenie i lokalizacja obiektów tworzących obraz. Segmentacja polega na nadaniu cechom charakteryzującym poszczególne obiekty unikalnych wartości. Celem segmentacji jest również identyfikacja ruchu, która jest rozpatrywana jako identyfikacja zmian zachodzących w obrazie.

Rozpoznawanie obrazu polega na określonej interpretacji opisu obrazu [13]. Celem metod rozpoznawania obrazów jest identyfikacja obiektów, które są elementami obrazu. Podstawą tego rodzaju metod nie jest obraz ale jego opis, będący wynikiem segmentacji. Uogólniając, rozpoznawanie obrazu można interpretować jako klasyfikację rozpatrywanych obiektów przy znanych klasach.

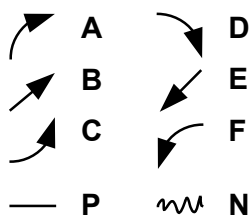
W opisywanych badaniach, analiza sceny została oparta na metodach należących do grup przetwarzania i analizy obrazów. Zastosowano dwa rodzaje algorytmów. Pierwszy bazuje na metodach „jednopunktowego” przetwarzania obrazów [10] [13] [14] [18] [19] a drugi na jego opisie semantycznym [11] [13] [14] [18] [19]. W obydwu przypadkach analiza zbioru cech sygnałów wymaga ich przekształcenia do postaci macierzy, które mogą być traktowane jak macierze odpowiadające obrazom zawierającym obiekty w postaci linii.

Metody jednopunktowego przetwarzania obrazów polegają na rozpatrywaniu kolejnych pojedynczych elementów macierzy i elementów je otaczających. Analiza określonego fragmentu macierzy związana jest z definicją tzw. maski, która jest macierzą kwadratową (zwykle 3x3 lub 4x4) określającą charakterystyczne, poszukiwane rozmieszczenie elementów macierzy. Zastosowanie maski związane jest z wyznaczeniem określonych współczynników, które pozwalają np. na identyfikację krawędzi czy narożników [13] [14]. Przykładem maski pozwalającej na identyfikację linii pionowych jest maska Sobela [13][21].

$$h4 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Z grupy metod jednopunktowego przetwarzania obrazów zastosowano algorytmy filtracji liniowej oraz metody gradientowe. Najlepsze wyniki uzyskano za pomocą zmodyfikowanego algorytmu filtracji liniowej [10].

Semantyczne metody analizy obrazów polegają na opisie obrazu za pomocą ciągu symboli. Analiza taka wymaga przyjęcia określonego zbioru symboli podstawowych, który jest traktowany jako alfabet [5] [7] [13]. Przykład alfabetu zdefiniowanego dla interpretacji wykresu funkcji pokazano na rys. 2 [5].



Rys. 2. Przykład alfabetu pozwalającego na interpretację wykresu funkcji [5]

Z grupy metod semantycznego opisu obrazu zastosowano metody oparte na kodzie łańcuchowym Freemana [7] [13]. Identyfikacja zmian polegała w tym przypadku na porównywaniu określonych sekwencji znaków. Metody te dały szczególnie dobre wyniki w przypadku analizy trajektorii np. ruchu środka czopa w łożysku hydrodynamicznym [11].

4. SCENA – ZBIÓR CECH SYGNAŁÓW

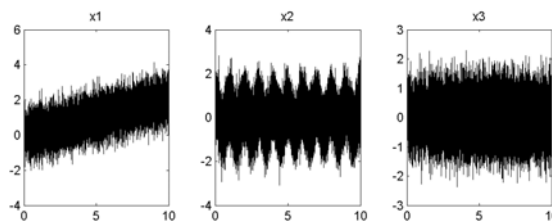
Identyfikacja zmian z zastosowaniem opisanych dwóch rodzajów metod została przeprowadzona w czterech krokach (rys.3) odpowiadających analizie sygnałów, ich przekształceniu, które polegało na operacjach analogicznych do kwantyzacji, zapisie elementów w postaci macierzy oraz zastosowaniu metod jednopunktowych lub metod semantycznego opisu obrazu [18].



Rys. 3. Etapy przetwarzania cech sygnałów

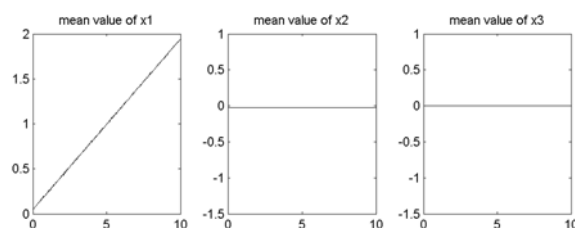
Kolejne etapy przetwarzania cech sygnałów pokazano na przykładzie wygenerowanych

sygnałów testowych, które odpowiadają trzem głównym rodzajom niestacjonarności sygnałów (rys.4).

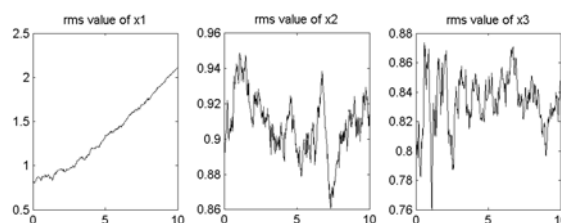


Rys. 4. Analizowane sygnały testowe

Analizowane sygnały charakteryzują się odpowiednio: $x1$ zmienną wartością średnią, $x2$ zmienną wartością średniokwadratową i $x3$ zmienną strukturą widmową (wartość częstotliwości zmienia się w czasie). Analiza sygnałów w dziedzinie czasu polegała na wyznaczeniu wartości średnich (rys.5) i wartości średniokwadratowych (rys.6).

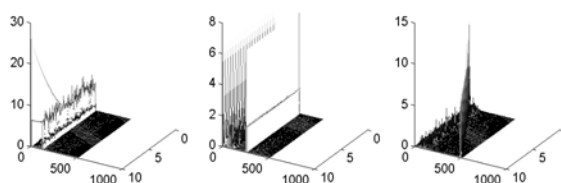


Rys. 5. Przebiegi wartości średnich wyznaczone dla sygnałów z rys. 4.



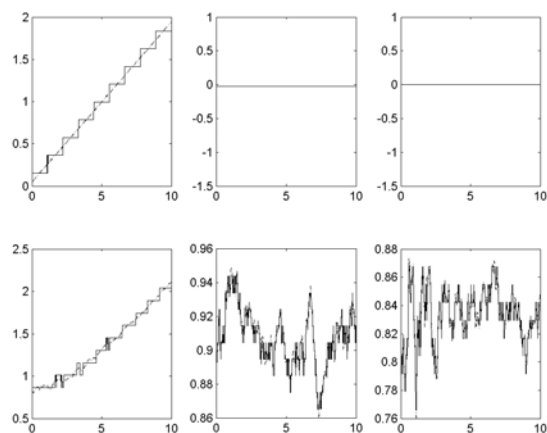
Rys. 6. Przebiegi wartości średniokwadratowych wyznaczone dla sygnałów z rys. 4

Analiza sygnałów w dziedzinie częstotliwości polegała na wyznaczeniu charakterystyk czasowo-częstotliwościowych (rys. 7) z zastosowaniem krótkoczasowego przekształcenia Fouriera (STFT).



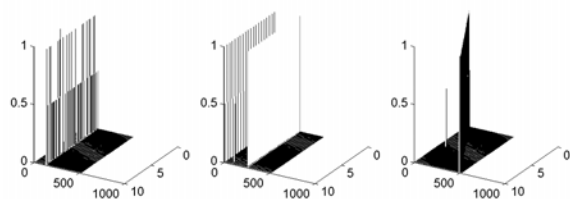
Rys. 7. Charakterystyki czasowo-częstotliwościowe wyznaczone dla sygnałów z rys. 4

Ze względu na szeroki zakres wartości wyznaczonych funkcji oraz na możliwość przekształcenia otrzymanych wykresów danych do postaci takich wykresów liniowych, które zawierają tylko poziome i pionowe odcinki prostych (względem układu współrzędnych) cechy sygnałów z rys. 5-7 poddano operacjom analogicznym do operacji kwantyzacji. Wyniki tych operacji dla cech wyznaczanych w dziedzinie czasu pokazano na rys.8.



Rys. 8. Wyniki operacji kwantyzacji dla cech wyznaczanych w dziedzinie czasu

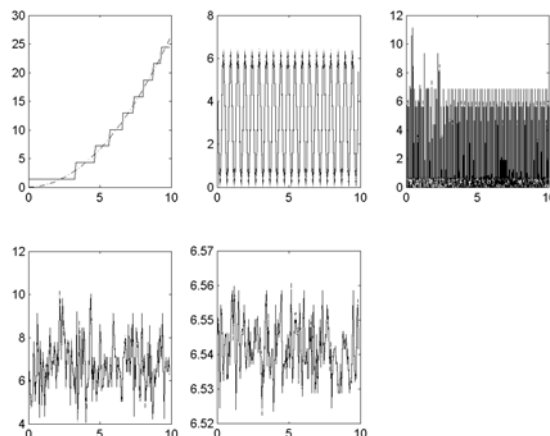
Charakterystyki pokazane na rys. 7 pozwalają na identyfikację zmian częstotliwości składowych harmonicznych sygnału oraz na określenie zmian amplitudy składowych. Taka interpretacja wymaga dwustopniowego rozpatrywania charakterystyki. Identyfikacja poszczególnych składowych oraz zmian ich częstotliwości polegała na przekształceniu wartości elementów macierzy odpowiadających charakterystyce do wartości 0 lub 1. Wartość 1 odpowiada składowej sygnału w danym paśmie częstotliwości (rys. 9).



Rys. 9. Identyfikacja składowych sygnału i zmian częstotliwości

Powyższy rysunek pokazuje, że sygnały x_1 i x_2 są kombinacjami liniowymi dwóch składowych harmonicznych o stałych częstotliwościach, sygnał x_3 zawiera jedną składową o zmiennej częstotliwości. Przekroje charakterystyk, odpowiadające składowym pozwalają na określenie zmian ich amplitudy. Na rys. 10 pokazano wynik takiego rozpatrywania składowych sygnałów. Wyodrębnione składowe poddano operacji

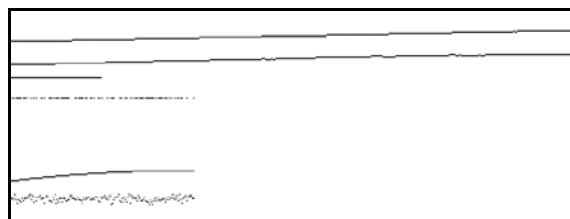
kwantyzacji wartości amplitud analogicznej do operacji przeprowadzonej dla cech wyznaczanych w dziedzinie czasu (rys. 8).



Rys. 10. Wyniki kwantyzacji składowych harmonicznych sygnału

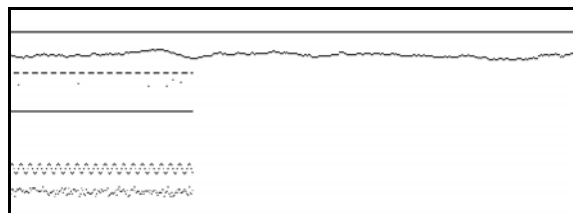
Wszystkie przekształcone cechy sygnałów mogą być zapisane w formie jednej macierzy, której elementy przyjmują wartości 0 lub 1. Macierz może być traktowana jak scena (obraz), której elementami są odpowiednio zapisane cechy sygnałów w postaci linii (rys. 11-13). Na rys. 11 i 12 widoczne są odpowiednio od góry przebiegi wartości średnich i średniokwadratowych, dwie składowe sygnału zidentyfikowane na podstawie charakterystyki czasowo-częstotliwościowej (częstotliwości składowych nie zmieniają się) oraz dwa „przekroje” charakterystyki odpowiadające składowym sygnałom, które umożliwiają obserwację zmian amplitudy składowych. Na rys. 13 widoczne są także przebiegi wartości średnich i średniokwadratowych, jedna zidentyfikowana składowa harmoniczna sygnału oraz odpowiadający jej „przekrój” charakterystyki. Częstotliwość składowej sygnału zmienia się w czasie.

Dla macierzy wyznacza się dodatkowo sygnatury będące wektorami wartości, które odpowiadają kolejnym chwilom czasu lub pasmom częstotliwości (numer kolumny w macierzy) i poziomom kwantyzacji wartości cech (numer wiersza w macierzy). Zmiany zachodzące w scenie mogą być rozpatrywane jako zmiany w czasie mikro i makro, gdzie czas mikro jest związany z rejestracją sygnału, a czas makro jest związany z czasem eksploatacji maszyny [15].

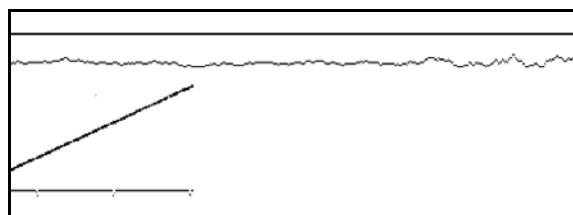


Rys. 11. Scena dynamiczna zawierająca cechy sygnału x_1

Zmiany w czasie w czasie mikro są identyfikowane na podstawie pojedynczej sceny (macierzy będącej wynikiem rejestracji i analizy jednej realizacji sygnału). Zmiany w czasie makro są wynikiem porównania kilku scen.



Rys. 12. Scena dynamiczna zawierająca cechy sygnału x_2



Rys. 13. Scena dynamiczna zawierająca cechy sygnału x_1

W referacie pokazano identyfikację zmian w czasie mikro z zastosowaniem metod przetwarzania i analizy obrazów.

Należy zwrócić uwagę, że prezentowany sposób zapisu cech sygnałów diagnostycznych jest jednym z wielu opisywanych w literaturze. Opisywana koncepcja zapisu wyników analizy sygnałów w formie obrazów została oparta na kilku znanych i opisanych koncepcjach macierzowego zapisu symptomów diagnostycznych. Cechy sygnałów diagnostycznych mogą być kodowane na kilka sposobów, czego przykładem jest zapis symptomów diagnostycznych w macierzach obserwacji interpretowanych z zastosowaniem metody SVD (ang. singular value decomposition) [1] [2] [3] lub w postaci binarnych macierzy diagnostycznych [8]. Celem opisywanych badań jest zastosowanie prostych metod interpretacji wyników analizy sygnałów diagnostycznych. Z wielu powodów zapis symptomów diagnostycznych w formie wymienionych macierzy nie nadaje się do zastosowania wraz z metodami analizy obrazów. Możliwość zastosowania opisu semantycznego cechy sygnału, bądź jej analiza za pomocą jednopunktowych metod przetwarzania obrazów wymaga przekształcenia zbioru cech sygnałów do postaci macierzy analogicznych do macierzy zawierających dane związane z potocznie rozumianym obrazem cyfrowym.

5. IDENTYFIKACJA ZMIAN

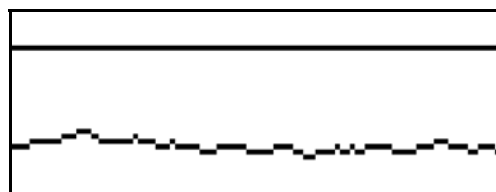
Identyfikacja zmian w czasie mikro została przeprowadzona za pomocą wybranych metod

z grupy jednopunktowej analizy obrazów [9] [18] i metod polegających na semantycznym opisie obrazu [10]. Należy zwrócić uwagę, że zadanie to jest znacznie uproszczone poprzez opisany w poprzednim punkcie sposób przekształcania cech sygnałów i ich zapis w jednej macierzy.

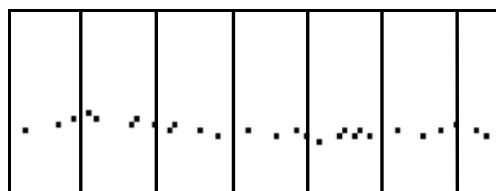
5.1. Zastosowanie metod jednopunktowych

Podczas badań zastosowano kilka metod jednopunktowej analizy obrazów wykorzystujących kilka różnych rodzajów masek [9] [18]. Metody polegające na wyznaczeniu gradientów i laplasjanu oraz ich modyfikacje nie dały poprawnych i jednoznacznych wyników [9]. Najlepsze wyniki uzyskano przy zastosowaniu metod polegających na filtracji. Wynik zastosowania algorytmu bazującego na filtracji liniowej pokazano na rys. 15 [9] [18]. Zastosowanie algorytmu pokazano dla fragmentu sceny, której obiektami są cechy sygnału x_3 . Scena została pokazana na rys. 13. Efektem zastosowania algorytmu filtracji liniowej, z wykorzystaniem maski Sobela (1) [9] [18] [21], jest obraz zawierający pojedyncze punkty odpowiadające chwilom czasu, w których poziom określonej wartości cechy uległ zmianie.

Elementy macierzy odpowiadającej takiemu obrazowi przyjmują wartość 0 lub 1, gdzie wartość 1 oznacza zmianę wartości określonej cechy wyrażaną w poziomach.



Rys. 14. Fragment sceny z rys. 13



Rys. 15. Zmiany cech sygnałów zidentyfikowane za pomocą filtracji liniowej

Zastosowanie metod bazujących na jednopunktowej filtracji liniowej obrazu pozwala na uzyskanie poprawnych i prostych wyników. Ich reprezentacja, w postaci macierzy z rys. 15 wymaga jednak dalszego przetwarzania. W opracowywanym systemie (rys. 1) założono, że danymi wejściowymi będą zidentyfikowane zmiany w postaci przesłanek odpowiednich relacji diagnostycznych. Przesłanka powinna zawierać informacje o chwili czasu, w której nastąpiła zmiana i o wartości tej zmiany.

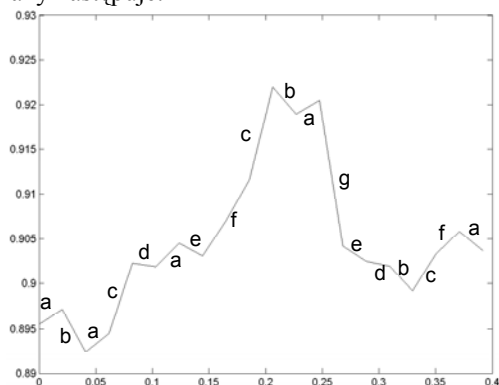
W celu uproszczenia wyników z rys. 15 zakłada się, że scena (macierz) będzie rozpatrywana w przedziałach czasu, w których określona zostanie zmiana wartości kolejnych cech. Na rysunku wyróżniono 7 przedziałów czasu, w których rozpatrywano zmiany dwóch cech: wartości średniej i średniokwadratowej. Określenie wartości zmiany polega na wyznaczeniu różnicy między pierwszym i ostatnim punktem na obrazie odpowiadającym zmianie cechy. Różnica jest wyrażana w liczbie poziomów. Wartości zmian wyznaczone dla fragmentu obrazu z rys. 14 zapisano w macierzy zmiany.

$$zmiany = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & -2 & -2 & -2 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Przyjmuje się, że chwila czasu odpowiadająca zmianie jest wyznaczana jako średnia z chwil początkowej i końcowej kolejnych przedziałów. Taki sposób wyznaczania zmian związany jest z kilkoma problemami. Obecne i przyszłe prace związane z ich rozwiązaniem zostały omówione we wnioskach.

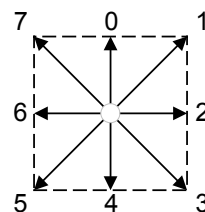
5.2. Zastosowanie metod semantycznych

Zastosowanie metod semantycznego opisu obrazu oparto na kodowaniu łańcuchowym, co związane było ze zdefiniowaniem odpowiedniego alfabetu. Symbolami zastosowanego alfabetu są litery [11] [18]. Alfabet może być zdefiniowany na kilka sposobów. Kolejne symbole alfabetu mogą odpowiadać określonym zmianom amplitudy obserwowanych wielkości lub określać charakter tych zmian, związany z kątem nachylenia linii reprezentującej obserwowane wielkości. Przykład zapisu fragmentu obrazu z rys. 13 (przebieg zmian wartości średniokwadratowej) pokazano na rys. 16. Zastosowany alfabet uwzględnia jedynie charakter zmian, bez uwzględniania wartości amplitudy i długości przedziału czasu, w którym dany rodzaj zmiany następuje.



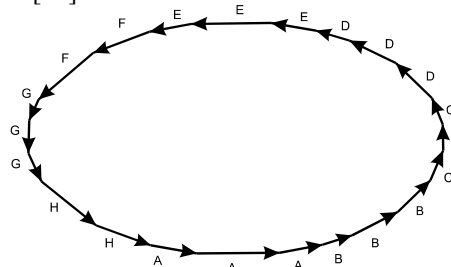
Rys. 16. Semantyczny zapis cechy

Opis obrazu pokazany na rys. 16 oparto na kodzie Freemana [7] (rys. 17), który stosowany jest od określania charakteru identyfikowanych zmian.



Rys. 17. Kod Freemana [7]

Alfabet tego rodzaju nie nadaje się do zastosowania wprost do opisu scen (obrazów) pokazanych na rys. 11-13 i wymaga pewnych modyfikacji, o których wspomniano we wnioskach. Oprócz opisu danych prezentowanych w postaci wykresów liniowych podjęto próbę zastosowania semantycznego opisu trajektorii ruchu środka czopa w łożysku. Przykład opisu trajektorii za pomocą alfabetu opartego na kodzie Freemana pokazano na rys. 18 [11].



Rys. 18. Przykład alfabetu stosowanego do opisu trajektorii [11]

Trajektorja pokazana na rys. 18 została wygenerowana na podstawie wygenerowanych sygnałów testowych. Zastosowanie semantycznego opisu trajektorii dało bardzo dobre wyniki, szczególnie w przypadku analizy „zapętleń” trajektorii obserwowanych podczas występowania niektórych niesprawności maszyn wirnikowych.

W tym przypadku także, podobnie jak przy zastosowaniu metod jednopunktowej analizy obrazów, ciąg uzyskanych symboli wymaga dodatkowego przetworzenia. Dobrym rozwiązaniem wydaje się być sposób opisany w [5] polegający na łączeniu symboli w słowa, co wymaga jednak określenia zbioru słów wzorcowych. Słowa zdefiniowane w określonych przedziałach czasu mogą stanowić dane wykorzystywane w przesłankach reguł diagnostycznych.

6. WNIOSKI

Opisane w referacie sposoby przetwarzania i interpretacji wyników analizy sygnałów o zmiennych w czasie cechach są fragmentem badań związanych z opracowaniem systemu automatycznie diagnozującego stan obiektu. Przewiduje się, że opisywane metody będą stosowane w przypadku złożonych danych, co związane jest z koniecznością rozwiązania kilku istotnych problemów.

W przypadku metod jednopunktowej analizy obrazów identyfikacja zmiany rozpoczyna się

właściwie od wyznaczenia liczby poziomów kwantowanej cechy, co może znacznie wpływać na poprawność otrzymanych wyników. Duże znaczenie ma także długość przedziału, w którym określana jest zmiana (rys. 15). Długość ta powinna być dobrana w taki sposób aby chwilowe zmiany nie wpływały znacząco na otrzymany wynik.

Najpoważniejszą wadą opisu semantycznego, o której nie wspomniano wcześniej, jest utrata informacji o wartościach amplitud, co jest związane z koniecznością zastosowania metod syntaktycznych. Poważną wadą zastosowanego alfabetu jest także brak przyjęcia przedziałów, w których wyznaczane są zmiany, co w skrajnym przypadku może prowadzić do opisu zmian jednej cechy za pomocą jednego symbolu (np., gdy wartości cechy wzrastają ze stałym krokiem lub są stałe w czasie).

7. LITERATURA

- [1] Cempel C., Signals, Symptoms, Faults Condition Oriented Multi Dimensional Monitoring of Systems in Operation, XXVIII Ogólnopolska Konferencja Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka 2001.
- [2] Cempel C., Reduction of Redundancy of Symptom Observation Space in Systems Condition Monitoring. Buletin of the Polish Academy of Sciences. Vol. 49, no. 2.
- [3] Cempel C., Multidimensional condition monitoring of systems in operation. 4th International Conference Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques, Compiègne 16-18 October, 2001, France.
- [4] Cempel C., Tomaszewski F. (red.), Diagnostyka maszyn. Zasady ogólne. Przykłady zastosowań. Międzyresortowe Centrum Naukowe Eksploatacji Majątku Trwałego. Radom 1992.
- [5] Chodasiewicz W., Analiza możliwości wykorzystania syntaktycznych metod rozpoznawania obrazów w diagnostyce wibroakustycznej maszyn. Praca NB-91/RMT-4/83. Politechnika Śląska Katedra PKM. Gliwice 1983.
- [6] Cholewa W., Moczulski W., Diagnostyka Techniczna Maszyn. Pomiary i analiza sygnałów. Skrypt Uczelniany Politechniki Śląskiej nr 1758. Gliwice 1993.
- [7] Fu K. S., Syntactic pattern recognition and applications. Purdue University West Lafayette, Indiana 1982.
- [8] Kościelny J., M., Diagnostyka automatycznych procesów produkcyjnych, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT 2001
- [9] Moczulski W., Metoda wibroakustycznych badań maszyn wirnikowych w warunkach rozruchu lub zatrzymania. Praca doktorska. IMiPKM Politechniki Śląskiej. Gliwice 1984.
- [10] Markiewicz K., Timofiejczuk A., Application of simple methods of image analysis in identification of changes of diagnostic signals
- [11] Molerus M., Timofiejczuk A., Application of semantic and syntactic description in identification of changes of diagnostic signals. 3th Symposjum on Artificial Intelligence Methods, Gliwice 2002.
- [12] Pavlidis T., Algorytmy przetwarzania grafiki i obrazów, WNT Warszawa 1987
- [13] Tadeusiewicz R., Systemy wizyjne robotów przemysłowych, WNT Warszawa 1992
- [14] Timofiejczuk A., Identyfikacja ruchu obiektów na podstawie szeregu jego obrazów. Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Śląska. Katedra PKM. Gliwice 1995.
- [15] Timofiejczuk A., Metoda badania maszyn wirnikowych w warunkach rozruchu, rozbiegu i wybiegu, Zeszyty Politechniki Śląskiej, nr 133, Gliwice 1999.
- [16] Timofiejczuk A., The conception of description of rotating machinery action in the form of dynamic scenes, II International Congress of Technical Diagnostics, 19-22.09.2000 Warsaw.
- [17] Timofiejczuk A., Dynamic scene: a basis of identification of a technical state of machinery, Conference on Component and Systems Diagnostics, Prognosis and Health Management, 16-17.04.2001, Orlando, proceedings of SPIE, s. 287- 196.
- [18] Timofiejczuk A., Zastosowanie metod analizy obrazów w identyfikacji zmian cech sygnałów diagnostycznych. XXIX Ogólnopolskie Sympozjum "Diagnostyka Maszyn", Węgierska Górka 04-09-03.2002, s. 339-344.
- [19] Timofiejczuk A., Methods of detection of changes of complex machinery states. 16th AeroSense Meeting on Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Control, Orlando, 01-05.04.2002, s. 110-121.
- [20] Timofiejczuk A., Application of diagnostic system based on dynamic scene identification. 16th AeroSense Meeting on Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Control, Orlando, 01-05.04.2002, s. 72-79.
- [21] Wróbel Z., Koprowski R., Przetwarzanie obrazów w programie MATLAB, Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2001.



Anna Timofiejczuk jest adiunktem w Katedrze PKM Politechniki Śląskiej. Jej naukowe zainteresowania to: metody analizy sygnałów niestacjonarnych, analiza i przetwarzanie obrazów, metody wnioskowania diagnostycznego.

ZASTOSOWANIE ANALIZY MODALNEJ W DIAGNOSTYCE STANU TECHNICZNEGO KONSTRUKCJI MASZTOWYCH DŹWIGÓW BUDOWLANYCH

Yevhen KHARCHENKO, Stefan SOBKOWSKI

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie. Katedra Edukacji Technicznej, Informatycznej i Fizyki Metali

10-266 Olsztyn, ul. Okrzei 1a kharchen@poczta.onet.pl, stsob@moskit.uwm.edu.pl

Streszczenie

W pracy rozpatruje się zagadnienie diagnostyki stanu technicznego konstrukcji nośnych o dużej wysokości. Na podstawie teorii belek S. Tymoszenki opracowano model matematyczny drgań swobodnych poprzecznych dźwigu budowlanego. Zbudowano algorytm obliczeń procesów drgających z wykorzystaniem metody parametrów początkowych. Zbadano wpływ zniszczenia kotw mocujących maszt ze ścianą budynku na częstotliwości i postaci drgań własnych układu mechanicznego. Pokazano możliwość zastosowania analizy modalnej w celach diagnostyki stanu technicznego konstrukcji masztowych dźwigów budowlanych.

Słowa kluczowe: dźwig budowlany, maszt, kotwienie, drgania własne, diagnozowanie

APPLICATION OF A MODAL ANALYSIS IN THE TECHNICAL DIAGNOSTICS OF THE TOWER CONSTRUCTIONS OF A BUILDING HOSTING EQUIPMENT.

Yevhen KHARCHENKO, Stefan SOBKOWSKI

Summary

The diagnostics problem of the technical state of a high load-carrying structure is considered in this work. The mathematical model of free transverse vibrations of the building hosting equipment's tower is developed on the basis of Timoshenko's girders theory. The algorithm of calculation of the vibrating processes is built using method of initial parameters. The destruction influence of the tower attachment points to the wall of construction on frequencies and forms of natural oscillations was investigated. The possibility of using the modal analysis in the diagnostics of technical state of the tower constructions of the building hosting equipment is shown.

1. WPROWADZENIE

Charakterystyki drgań własnych układów mechanicznych w dużym stopniu zależą od sztywności elementów konstrukcji. Podczas eksploatacji urządzeń technicznych ich parametry mechaniczne ulegają zmianom. Zniszczenie całkowite lub częściowe połączeń i podpór powoduje zmniejszenie częstotliwości oraz istotne zmiany postaci drgań własnych. W związku z tym analiza modalna jest często stosowana w diagnostyce maszyn i konstrukcji nośnych [1-3].

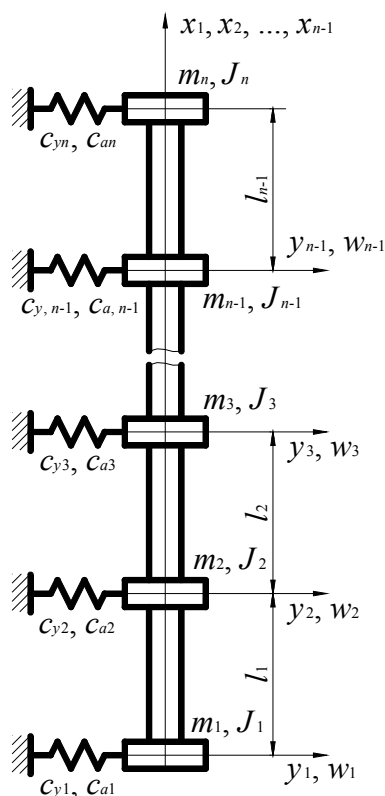
W niniejszej pracy rozpatruje się aktualne zagadnienie diagnostyki stanu technicznego konstrukcji masztowych o dużej wysokości, które znajdują zastosowanie w dźwigach budowlanych. Dla bezpiecznej i niezawodnej pracy dźwigu wymagane jest odpowiednie kotwienie konstrukcji do ściany budynku. Zmiana wartości częstotliwości i zmiana postaci drgań własnych konstrukcji w skutek zniszczenia kotw ujawniona podczas

okresowych badań doświadczalnych może być wykorzystana w celach diagnostycznych [4].

Dla określenia wpływu zniszczenia jednej lub kilku kotw na charakterystyki drgań własnych masztu opracowano model matematyczny procesów dynamicznych. Ruch konstrukcji masztowej opisuje się równaniami różniczkowymi cząstkowymi z uwzględnieniem odkształceń zginania i ścinania, działania sił wzdłużnych oraz inercji obracania przekrojów poprzecznych według teorii belek S. Tymoszenki [5-7]. Ze względu na dużą ilość kotwień algorytm obliczeniowy opracowano na zasadzie metody parametrów początkowych. Przeprowadzono obliczenia częstotliwości i postaci drgań własnych rozpatrywanych układów mechanicznych. Zbadano możliwość wykorzystania analizy modalnej w celach diagnostyki konstrukcji nośnych dźwigów budowlanych.

2. MODEL MATEMATYCZNY DRGAŃ WŁASNYCH POPRZECZNYCH KONSTRUKCJI MASZTOWEJ

Rozpatrzmy schemat obliczeniowy konstrukcji masztowej jako pionowego pręta o odcinkowo stałych parametrach sprężystości mocowanego na fundamencie (rys.1). Odcinki masztu mają długości $l_1, l_2, \dots, l_{n-1}$, i są połączone między sobą na sztywno. Końce odcinków połączone są sprężystości ze ścianą budynku. Sztywności sprężystych elementów (kotw) w poziomym i obrotowym kierunku oznaczamy jako c_{yi}, c_{ai} ($i = 1, 2, \dots, n$). Konstrukcja masztu połączona jest z ciałami twardymi o masach $m_1, m_2, \dots, m_n$ i momentach bezwładności $J_1, J_2, \dots, J_n$. Ciała twarde przedstawione na schemacie obliczeniowym to: pomosty transportowe, połączenia kotw z elementami masztu oraz podstawa masztu.



Rys 1. Schemat obliczeniowy konstrukcji masztowej.

Dla zapisania równań ruchu korzystamy z układów współrzędnych kartezjańskich x_i, y_i ($i = 1, 2, \dots, n-1$). Początki układów współrzędnych znajdują się w dolnych skrajnych przekrojach poprzecznych odcinków masztu. Poprzeczne przemieszczenia punktów osi pręta oznaczamy jako w_i ($i=1, 2, \dots, n-1$).

Zbudujemy model matematyczny procesów dynamicznych (drgań swobodnych) konstrukcji masztowej z uwzględnieniem odkształceń, zginania, ścinania oraz inercji postępowego i obrotowego ruchu przekrojów poprzecznych zgodnie z teorią belek S. Tymoszenki.

Równania drgań poprzecznych konstrukcji masztowej podajemy w postaci [5]:

$$\begin{aligned} \frac{EI_i}{l_i^2} \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial \xi_i^2} + \kappa_i G A_i \left(\frac{1}{l_i} \frac{\partial w_i}{\partial \xi_i} - \varphi_i \right) - \rho_i I_i \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial t^2} &= 0, \\ \kappa_i G A_i \left(\frac{1}{l_i^2} \frac{\partial^2 w_i}{\partial \xi_i^2} - \frac{1}{l_i} \frac{\partial \varphi_i}{\partial \xi_i^2} \right) - \frac{P_i}{l_i^2} \frac{\partial^2 w_i}{\partial \xi_i^2} - \rho_i A_i \frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2} &= 0 \\ (i = 1, 2, \dots, n-1), \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie E_i, G_i, ρ_i – moduły sprężystości i umowna gęstość materiału (wartość ρ_i określamy jako stosunek masy rozproszonej masztu μ_i do sumy powierzchni przekrojów poprzecznych rurowych elementów nośnych konstrukcji A_i), I_i – moment bezwładności przekroju poprzecznego masztu, κ_i – współczynnik określający odkształcenie ścinania, P_i – średnia wartość siły wzdłużnej danego odcinka masztu, φ_i – kąt nachylenia stycznej do odkształconej osi masztu uwzględniający momenty zginające, $\xi_i = x_i/l_i$ – względna współrzędna wzdłużna, t – czas.

Po wykluczeniu z równania (1) nieznannej funkcji φ_i , otrzymujemy:

$$\begin{aligned} \frac{EI_i}{l_i^4} \left(1 - \frac{P_i}{\kappa_i G A_i} \right) \frac{\partial^4 w_i}{\partial \xi_i^4} - \frac{\rho_i I_i}{l_i^2} \left(1 + \frac{E}{\kappa_i G} - \frac{P_i}{\kappa_i G A_i} \right) \times \\ \times \frac{\partial^4 w_i}{\partial \xi_i^2 \partial t^2} + \frac{P_i}{l_i^2} \frac{\partial^2 w_i}{\partial \xi_i^2} + \rho_i A_i \frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2} + \frac{\rho_i^2 I_i}{\kappa_i G} \frac{\partial^4 w_i}{\partial t^4} &= 0 \\ (i = 1, 2, \dots, n-1). \end{aligned} \quad (2)$$

W oparciu o zasadę d'Alemberta warunki brzegowe w dolnym końcu masztu zapisujemy w postaci:

$$\begin{aligned} m_1 \frac{\partial^2 w_1(0, t)}{\partial t^2} - Q_1(0, t) + c_{y1} w_1(0, t) - c_{ya1} \varphi_1(0, t) &= 0, \\ J_1 \frac{\partial^2 \varphi_1(0, t)}{\partial t^2} + M_1(0, t) - \\ - c_{ya1} w_1(0, t) + c_{a1} \varphi_1(0, t) &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Warunki brzegowe dla miejsc połączeń sąsiednich odcinków masztu określamy wyrażeniami:

$$\begin{aligned} m_i \frac{\partial^2 w_i(0, t)}{\partial t^2} - Q_i(0, t) + Q_{i-1}(1, t) + \\ c_{yi} w_i(0, t) - c_{ya1} \varphi_i(0, t) &= 0, \\ J_i \frac{\partial^2 \varphi_i(0, t)}{\partial t^2} + M_i(0, t) - M_{i-1}(1, t) - \\ - c_{ya1} w_i(0, t) + c_{ai} \varphi_i(0, t) &= 0, \\ w_i(0, t) = w_{i-1}(1, t), \quad \varphi_i(0, t) = \varphi_{i-1}(1, t) \\ (i = 2, 3, \dots, n-1). \end{aligned} \quad (4)$$

W sposób analogiczny zapiszemy warunki brzegowe dla górnego końca masztu:

$$\begin{aligned} m_n \frac{\partial^2 w_{n-1}(1, t)}{\partial t^2} + Q_{n-1}(1, t) + \\ - c_{yn} w_{n-1}(1, t) - c_{yan} \varphi_{n-1}(1, t) = P_{yn}, \\ J_n \frac{\partial^2 \varphi_{n-1}(1, t)}{\partial t^2} - M_{n-1}(1, t) - \\ - c_{yan} w_{n-1}(1, t) + c_{an} \varphi_{n-1}(1, t) = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Układ równań (2)–(5) całkowicie opisuje drgania poprzeczne swobodne masztu.

3. MACIERZE PRZEJŚCIOWE ELEMENTÓW UKŁADU MECHANICZNEGO

Rozwiązanie równania (2) w przypadku drgań harmonicznym przedstawiamy w postaci:

$$w_i = W_i(\xi_i) \sin \omega t \quad (i = 1, 2, \dots, n-1), \quad (6)$$

gdzie $W_i(\xi_i)$ – amplitudowa funkcja przemieszczeń poprzecznych przekrojów masztu.

Po podstawieniu wyrażeń (6) do równania (2) otrzymamy równanie funkcji amplitudowych

$$\frac{d^4 W_i}{d\xi_i^4} + b_i^2 \frac{d^2 W_i}{d\xi_i^2} - c_i^4 W_i = 0, \quad (7)$$

gdzie

$$\begin{aligned} b_i^2 &= \frac{\kappa_i G A_i l_i^2}{EI_i (\kappa_i G A_i - P_i)} \left[P_i + \rho_i I_i \omega^2 \left(1 + \frac{E}{\kappa_i G} - \frac{P_i}{\kappa_i G A_i} \right) \right], \\ c_i^4 &= \frac{\kappa_i G A_i l_i^4}{EI_i (\kappa_i G A_i - P_i)} \left(\rho_i A_i \omega^2 - \frac{\rho_i^2 I_i \omega^4}{\kappa_i G} \right). \end{aligned}$$

Zgodnie z metodą parametrów początkowych [7] rozwiązanie równania (7) przedstawiamy w postaci macierzowej:

$$Y_i(\xi_i) = S_i(\xi_i) Y_i(0), \quad (8)$$

gdzie

$$\begin{aligned} Y_i(\xi_i) &= \text{col}(W_i(\xi_i), W_i'(\xi_i), W_i''(\xi_i), W_i'''(\xi_i)), \\ S_i(\xi_i) &= \begin{pmatrix} \psi_{1i}(\xi_i) & \psi_{2i}(\xi_i) & \psi_{3i}(\xi_i) & \psi_{4i}(\xi_i) \\ \psi_{1i}'(\xi_i) & \psi_{2i}'(\xi_i) & \psi_{3i}'(\xi_i) & \psi_{4i}'(\xi_i) \\ \psi_{1i}''(\xi_i) & \psi_{2i}''(\xi_i) & \psi_{3i}''(\xi_i) & \psi_{4i}''(\xi_i) \\ \psi_{1i}'''(\xi_i) & \psi_{2i}'''(\xi_i) & \psi_{3i}'''(\xi_i) & \psi_{4i}'''(\xi_i) \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (9)$$

W macieże (9) $\psi_{1i}, \psi_{2i}, \psi_{3i}, \psi_{4i}$ – układ funkcji fundamentalnych rozwiązań równania (2), które są określone następującymi wyrażeniami:

$$\begin{aligned} \psi_{1i}(\xi_i) &= \frac{1}{\lambda_{1i}^2 + \lambda_{2i}^2} (\lambda_{2i}^2 \cos \lambda_{1i} \xi_i + \lambda_{1i}^2 \text{ch } \lambda_{2i} \xi_i), \\ \psi_{2i}(\xi_i) &= \frac{1}{\lambda_{1i}^2 + \lambda_{2i}^2} \left(\frac{\lambda_{2i}^2}{\lambda_{1i}} \sin \lambda_{1i} \xi_i + \frac{\lambda_{1i}^2}{\lambda_{2i}} \text{ch } \lambda_{2i} \xi_i \right), \\ \psi_{3i}(\xi_i) &= \frac{1}{\lambda_{1i}^2 + \lambda_{2i}^2} (-\cos \lambda_{1i} \xi_i + \text{ch } \lambda_{2i} \xi_i), \\ \psi_{4i}(\xi_i) &= \frac{1}{\lambda_{1i}^2 + \lambda_{2i}^2} \left(-\frac{1}{\lambda_{1i}} \sin \lambda_{1i} \xi_i + \frac{1}{\lambda_{2i}} \text{sh } \lambda_{2i} \xi_i \right), \end{aligned} \quad (10)$$

przy czym

$$\lambda_{1i} = \sqrt{-\frac{b_i^2}{2} + \sqrt{\frac{b_i^4}{4} + c_i^4}}, \quad \lambda_{2i} = \sqrt{\frac{b_i^2}{2} + \sqrt{\frac{b_i^4}{4} + c_i^4}}.$$

Przy uwzględnieniu zginających i tnących odkształceń masztu otrzymujemy wzory momentu zginającego i siły poprzecznej w postaci:

$$\begin{aligned} M_i &= -\frac{EI_i}{l_i} \frac{\partial \varphi_i}{\partial \xi_i}, \\ Q_i &= \frac{(\kappa_i G A_i - P_i)}{l_i} \frac{\partial w_i}{\partial \xi_i} - \kappa_i G A_i \varphi_i. \end{aligned} \quad (11)$$

Uwzględniając drugie równanie (1) i wyrażenia (6), (11) otrzymujemy:

$$\begin{aligned} \varphi_i &= \Phi_i(\xi_i) \sin \omega t, \quad M_i = M_{0i}(\xi_i) \sin \omega t, \\ Q_i &= Q_{0i}(\xi_i) \sin \omega t \quad (i = 1, 2, \dots, n-1), \end{aligned} \quad (12)$$

gdzie $\Phi_i(\xi_i)$, $M_{0i}(\xi_i)$, $Q_{0i}(\xi_i)$ – funkcja amplitudowa przemieszczenia obrotowego przekroju poprzecznego wskutek działania momentów zginających oraz funkcje amplitudowe momentu zginającego i siły tnącej.

Podstawiając wyrażenie (6) i pierwszą funkcję (12) do równań (1) otrzymamy:

$$\begin{aligned} \frac{EI_i}{l_i^2} \Phi_i'' + \kappa_i G A_i \left(\frac{1}{l_i} W_i' - \Phi_i \right) + \rho_i I_i \omega^2 \Phi_i &= 0, \\ \kappa_i G A_i \left(\frac{1}{l_i^2} W_i'' - \frac{1}{l_i} \Phi_i' \right) - \frac{P_i}{l_i^2} W_i'' + \rho_i A_i \omega^2 W_i &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Przekształcając wyrażenia (11) z uwzględnieniem (6), (12) otrzymujemy:

$$M_{0i} = -\frac{EI_i}{l_i} \Phi_i', \quad Q_{0i} = \frac{(\kappa_i G A_i - P_i)}{l_i} W_i' - \kappa_i G A_i \Phi_i. \quad (14)$$

Na zasadzie zależności (13), (14) układamy następujące równości macierzowe:

$$\begin{aligned} F_i(\xi_i) &= B_{1i} Y_i(\xi_i), \quad Y_i(\xi_i) = B_{2i} F_i(\xi_i) \\ (i &= 1, 2, \dots, n-1), \end{aligned} \quad (15)$$

gdzie

$$F_i(\xi_i) = \text{col}(W_i(\xi_i), \Phi_i(\xi_i), M_{0i}(\xi_i), Q_{0i}(\xi_i));$$

$$B_{li} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{22} & 0 & q_{24} \\ q_{31} & 0 & q_{33} & 0 \\ 0 & q_{42} & 0 & q_{44} \end{pmatrix};$$

$$B_{2i} = B_{li}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{22} & 0 & p_{24} \\ p_{31} & 0 & p_{33} & 0 \\ 0 & p_{42} & 0 & p_{44} \end{pmatrix}, \quad (16)$$

przy czym

$$q_{22} = \frac{\beta_i^2 + \alpha_i \gamma_i}{l_i \beta_i (\beta_i - \delta_i)}, \quad q_{24} = \frac{\alpha_i (\beta_i - P_i)}{l_i^3 \beta_i (\beta_i - \delta_i)},$$

$$q_{31} = -\frac{\alpha_i \gamma_i}{\beta_i}, \quad q_{33} = -\frac{\alpha_i (\beta_i - P_i)}{l_i^2 \beta_i},$$

$$q_{42} = -\frac{1}{l_i} \left[P_i + \frac{(\chi_i + \beta_i) \delta_i}{\beta_i - \delta_i} \right], \quad q_{44} = -\frac{\alpha_i (\beta_i - P_i)}{l_i^3 (\beta_i - \delta_i)},$$

$$p_{22} = \frac{l_i \beta_i}{\beta_i - P_i}, \quad p_{24} = \frac{l_i}{\beta_i - P_i},$$

$$p_{31} = -\frac{l_i^2 \gamma_i}{\beta_i - P_i}, \quad p_{33} = -\frac{l_i^2 \beta_i}{\alpha_i (\beta_i - P_i)},$$

$$p_{42} = -\frac{l_i^3 \beta_i}{\beta_i - P_i} \Gamma_i, \quad p_{44} = -\frac{l_i^3 \beta_i}{\beta_i - P_i} \Delta_i,$$

$$\alpha_i = EI_i, \quad \beta_i = \kappa_i GA_i, \quad \gamma_i = \rho_i A_i \omega^2,$$

$$\delta_i = \rho_i I_i \omega^2, \quad \chi_i = EA_i,$$

$$\Gamma_i = \frac{P_i (\beta_i - \delta_i)}{\alpha_i (\beta_i - P_i)} + \frac{\gamma_i (\chi_i + \beta_i)}{\chi_i (\beta_i - P_i)},$$

$$\Delta_i = \frac{\beta_i}{\alpha_i (\beta_i - P_i)} + \frac{\gamma_i}{\beta_i (\beta_i - P_i)}.$$

Podstawiając (6) i (12) do równań warunków brzegowych (3), (4) i (5) otrzymamy:

$$F_1(0) = H_1 F_0,$$

$$F_i(0) = H_i F_{i-1}(1) \quad (i = 2, 3, \dots, n-1),$$

$$F_n = H_n F_{n-1}(1), \quad (17)$$

gdzie

$$F_0 = \text{col}(W_1(0), \Phi_1(0), 0, 0),$$

$$F_n = \text{col}(W_{n-1}(1), \Phi_{n-1}(1), 0, 0),$$

$$H_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ c_{y\alpha 1} & -\Omega_{\alpha 1} & 0 & 0 \\ \Omega_{y1} & -c_{y\alpha 1} & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$H_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ c_{y\alpha i} & -\Omega_{\alpha i} & 1 & 0 \\ \Omega_{yi} & -c_{y\alpha i} & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$H_n = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ c_{y\alpha n} & -\Omega_{\alpha n} & 1 & 0 \\ \Omega_{yn} & -c_{y\alpha n} & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (18)$$

przy czym

$$\Omega_{yi} = c_{yi} - m_i \omega^2, \quad \Omega_{\alpha i} = c_{\alpha i} - I_i \omega^2 \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Otrzymane macierze przejściowe (9), (16), (18) oraz wyrażenia (8), (15), (17) dają możliwość zastosowania metody parametrów początkowych do obliczeń częstotliwości i postaci drgań własnych poprzecznych masztu. Dana metoda znacznie upraszcza i ułatwia przeprowadzenie analizy modalnej układów mechanicznych dyskretno-ciągłych.

4. ALGORYTM OBLICZEŃ CZĘSTOTLIWOŚCI I POSTACI DRGAŃ

Wykorzystując zależności (8), (15), (17), zapisujemy równość macierzową:

$$F_n = H_n \left\{ \prod_{j=n-1}^1 [B_{1j} S_j(1) B_{2j} H_j] \right\} F_0. \quad (19)$$

Reakcje trzeciego i czwartego elementu macierzy kolumnowej F_n na pojedyncze wartości $W_1(0)$ i $\Phi_1(0)$ określamy przy pomocy zależności (19) i oznaczamy odpowiednio jako $f_{jw}, f_{j\varphi}$ ($j = 3, 4$).

Rozpatrując drgania swobodne tworzymy jednorodny układ równań algebraicznych odnośnie parametrów początkowych $W_1(0), \Phi_1(0)$:

$$\theta V = 0, \quad (20)$$

gdzie

$$\theta = \begin{pmatrix} f_{3w} & f_{3\varphi} \\ f_{4w} & f_{4\varphi} \end{pmatrix}; \quad V = \text{col}(W_1(0), \Phi_1(0)).$$

Dla określenia częstotliwości drgań własnych masztu korzystamy z warunków, że wyznacznik układu równań (20) równy jest zero:

$$\det(\theta) = f_{3w} f_{4\varphi} - f_{3\varphi} f_{4w} = 0. \quad (21)$$

Z równań (20) określamy z dokładnością do stałego mnożnika parametry $W_1(0), \Phi_1(0)$, i obliczamy parametry początkowe odcinków masztu przy pomocy następujących zależności

$$F_1(0) = H_1 F_0,$$

$$F_i(0) = \left\{ \prod_{j=i}^2 [H_j B_{1,j-1} S_{j-1}(1) B_{2,j-1}] \right\} H_1 F_0$$

$$(i = 2, 3, \dots, n-1), \quad (22)$$

które otrzymaliśmy z wzorów (8), (15) i dwóch pierwszych równości (17).

Korzystając z zależności (8), (15), (22), określamy funkcje amplitudowe przemieszczeń i sił wewnętrznych

$$F_i(\xi_i) = B_{1i} S_i(\xi_i) B_{2i} F_i(0) \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (23)$$

Praktyczne znaczenie ma określenie kilku niższych częstotliwości drgań własnych masztu według wzoru (21) oraz odpowiadających im postaci zgodnie z wyrażeniem (23).

5. PRZYKŁADY OBLICZEŃ I WYNIKI BADAŃ

Rozpatrzmy wyniki obliczeń częstotliwości i postaci drgań swobodnych konstrukcji masztowej, parametry której podane są w tabeli 1. Częstotliwości drgań w płaszczyźnie równoległej do ściany budynku przedstawiono w tabeli 2, a w płaszczyźnie prostopadłej do ściany budynku w tabeli 3.

P_1	N	$3,95 \cdot 10^4$	$3,95 \cdot 10^4$
P_2	N	$3,51 \cdot 10^4$	$3,51 \cdot 10^4$
P_3	N	$3,13 \cdot 10^4$	$3,13 \cdot 10^4$
P_4	N	$2,75 \cdot 10^4$	$2,75 \cdot 10^4$
P_5	N	$2,49 \cdot 10^4$	$2,49 \cdot 10^4$
m_1	kg	200,0	200,0
$m_2, \dots, m_5$	kg	10,0	10,0
m_6	kg	35,0	35,0
J_1	kg·m ²	100,0	100,0
$J_2, \dots, J_5$	kg·m ²	1,0	1,0
J_6	kg·m ²	2,3	2,3
c_{y1}	N/m	$1 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^9$
$c_{y2}, \dots, c_{y5}$	N/m	$3,5 \cdot 10^6$	$4,4 \cdot 10^7$
c_{y6}	N/m	0	0
c_{a1}	N·m/rad	$1 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$
$c_{a2}, \dots, c_{a5}$	N·m/rad	$2,5 \cdot 10^3$	0
c_{a6}	N·m/rad	0	0

Tab. 2. Częstotliwość drgań swobodnych konstrukcji masztu w płaszczyźnie równoległej do ściany budynku

Numery brakujących kotw	Wartości częstotliwości				
	1	2	3	4	5
-	14,68	16,52	20,20	31,92	40,48
2	6,979	16,45	19,99	31,26	39,82
3	7,320	15,64	20,19	31,26	40,43
4	6,407	16,40	20,10	31,65	39,42
5	2,706	14,18	14,55	16,49	20,11
2,3	3,822	10,11	14,38	15,29	19,96
2,4	5,928	7,403	14,36	16,30	19,91
2,5	2,705	6,979	14,23	16,42	19,91
3,4	3,267	9,988	14,38	15,29	20,10
3,5	2,394	7,469	20,11	31,01	39,93
4,5	1,065	6,909	14,46	16,40	19,96

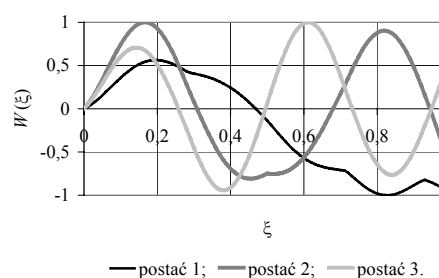
Tab. 3. Częstotliwość drgań swobodnych konstrukcji masztu w płaszczyźnie prostopadłej do ściany budynku

Numery brakujących kotw	Wartości częstotliwości				
	1	2	3	4	5
-	25,77	30,12	32,91	49,68	63,22
2	7,627	19,02	20,57	27,79	32,69
3	8,659	25,82	32,22	45,72	49,69
4	7,173	19,13	20,62	27,77	30,18
5	2,988	19,14	19,85	26,31	30,88
2,3	4,005	10,91	19,06	21,73	31,54
2,4	6,013	8,616	19,59	21,92	29,18
2,5	2,968	7,636	19,45	20,81	28,80
3,4	3,436	10,84	19,20	21,97	28,05
3,5	2,497	8,822	19,18	20,66	26,31
4,5	1,128	7,585	19,17	21,14	28,85

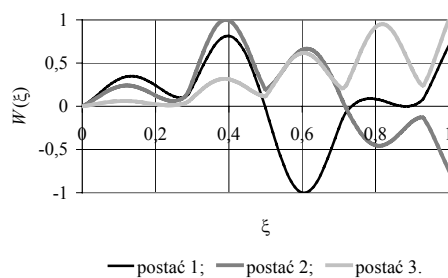
Tab. 1. Parametry konstrukcji masztu

Parametr	Jednostka	Wartości	
		W płaszczyźnie równoległej do ściany	W płaszczyźnie prostopadłej do ściany
l_1	m	12,00	12,00
$l_2, \dots, l_4$	m	9,00	9,00
l_5	m	3,00	3,00
$E_1, \dots, E_5$	N/m ²	$2,10 \cdot 10^{11}$	$2,10 \cdot 10^{11}$
$G_1, \dots, G_5$	N/m ²	$8,10 \cdot 10^{10}$	$8,10 \cdot 10^{10}$
$\rho_1, \dots, \rho_5$	kg/m ³	$1,25 \cdot 10^4$	$1,25 \cdot 10^4$
$A_1, \dots, A_5$	m ²	$3,34 \cdot 10^{-3}$	$3,34 \cdot 10^{-3}$
$I_1, \dots, I_5$	m ⁴	$3,26 \cdot 10^{-4}$	$3,26 \cdot 10^{-4}$
$\kappa_1, \dots, \kappa_5$	-	0,15	0,15

a)

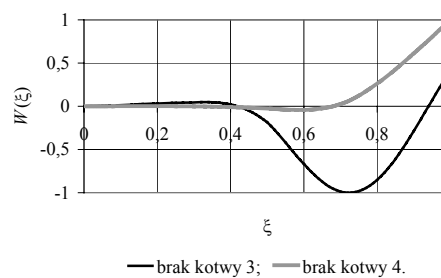


b)

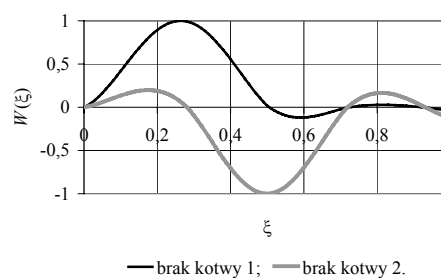


Rys. 2. Postacie drgań swobodnych masztu w płaszczyźnie równoległej (a) i prostopadłej (b) do ściany budynku.

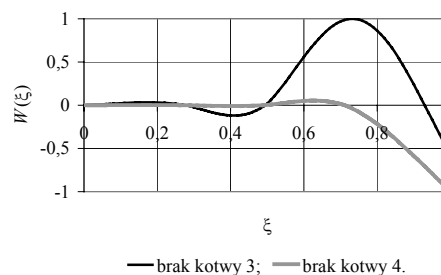
Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń, brak jednej lub dwóch kotw (zniszczone lub źle mocowane) we wszystkich przypadkach istotnie zmniejsza pierwszą częstotliwość drgań swobodnych danego układu mechanicznego. Brak jednej kotwy (za wyjątkiem ostatniej - piątej) prawie nie ma wpływu na drugą i następne częstotliwości drgań masztu w płaszczyźnie równoległej do ściany budynku. Brak dwóch kotw istotnie zmniejsza nie tylko pierwszą ale i wyższe częstotliwości.



c)



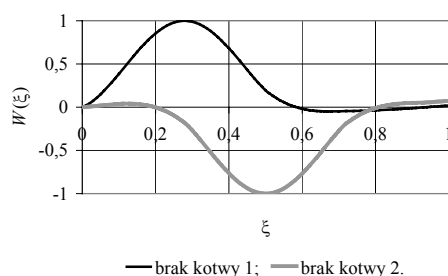
d)



Rys. 3. Pierwsze postacie drgań swobodnych masztu z jedną zniszczoną kotwą w płaszczyźnie równoległej (a, b) i prostopadłej (c, d) do ściany budynku.

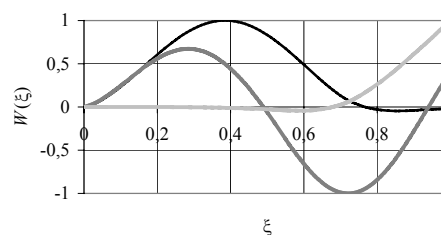
W płaszczyźnie prostopadłej do ściany budynku liniowa sztywność kotwien jest dużo większa w porównaniu z ich sztywnością w płaszczyźnie równoległej. W związku z tym zniszczenie jednej czy dwóch kotw istotnie wpływa na wartości wszystkich częstotliwości drgań własnych w danej płaszczyźnie.

a)

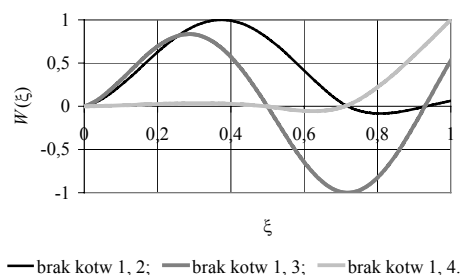


b)

a)



b)



Rys. 4. Pierwsze postacie drgań swobodnych masztu z dwiema zniszczonymi kotwami w płaszczyźnie równoległej (a) i prostopadłej (b) do ściany budynku.

Zwróćmy uwagę na to, że wartości pierwszej częstotliwości własnej konstrukcji masztu z jedną dowolną zniszczoną kotwą prawie się nie różnią i znajdują się w granicach 6,4 – 8,7 Hz, za wyjątkiem, gdy zniszczeniu ulega skrajna górna kotwa. Zniszczenie skrajnej górnej kotwy zmniejsza pierwszą częstotliwość własną do 2,7 Hz (w płaszczyźnie równoległej do ściany budynku) i do 3,0 Hz (w płaszczyźnie prostopadłej do ściany budynku). Dla wielu przypadków zniszczenia dwóch kotw wartości niższych częstotliwości własnych konstrukcji są zbliżone. Wobec tego dla diagnostyki stanu technicznego konstrukcji nośnej dźwigu budowlanego nie wystarczają znajomości częstotliwości własnych. Pełniejszą informację o zniszczonych, nieprawidłowo zamocowanych czy braku kotw można uzyskać analizując postacie drgań własnych.

Na rys. 2 przedstawiono po trzy pierwsze postacie drgań własnych konstrukcji w odpowiednich płaszczyznach w przypadku, gdy wszystkie kotwy są sprawne. Najwyraźniej zniszczenie kotw odbija się na pierwszej postaci drgań w płaszczyźnie równoległej lub prostopadłej do ściany budynku (rys. 3, 4). Jeżeli zniszczeniu uległa jedna kotwa, to około miejsca jej rozmieszczenia funkcja amplitudowa ma maksimum. W przypadkach zniszczenia dwóch kotw postacie uzyskują inny kształt (rys. 4), charakteryzujący stan techniczny konstrukcji masztowej.

5. PODSUMOWANIE

Otrzymane wyniki badań wykazują, że zniszczenie jednej lub kilku kotw powodują istotne zmiany charakterystyk widma częstotliwościowego oraz postaci drgań swobodnych konstrukcji masztowej dźwigu budowlanego. Na podstawie

wspólnej analizy zmian częstotliwości i postaci drgań własnych masztu w procesie eksploatacji można określić stan techniczny kotwien. Praktyczne zastosowanie przedstawionej metody diagnostycznej przewiduje teoretyczne lub doświadczalne badanie drgań swobodnych konstrukcji.

Model matematyczny zjawisk dynamicznych w konstrukcjach nośnych o dużej wysokości opracowany z uwzględnieniem odkształceń zginania i ścinania, inercji postępowego i obrotowego ruchu przekrojów poprzecznych oraz podatności sprężystych podpór daje możliwość dokładnego określenia częstotliwości i postaci drgań swobodnych rozpatrywanego układu mechanicznego.

Przedstawiona metoda analizy modalnej może być stosowana w diagnostyce stanu technicznego konstrukcji masztowych.

6. LITERATURA

- [1] Morel J. *Drgania maszyn i diagnostyka ich stanu technicznego*, Warszawa, Polskie Towarzystwo diagnostyki technicznej, 1992.
- [2] Osiński Z. *Teoria drgań*, Warszawa, PWN, 1978.
- [3] Uhl T. *Zastosowanie analizy modalnej w diagnostyce maszyn*, Diagnostyka, vol 23, 2000, pp. 87-92.
- [4] Kharchenko Y., Sobkowski S. *Modelowanie matematyczne drgań swobodnych konstrukcji masztowych dźwigów budowlanych*, biuletyn konferencyjny, *Modelowanie i symulacja komputerowa w technice*, st. 169-173, Łódź 2002
- [5] Tymoszenko S., Jang D. X., Uliwer U. *Kolebania w inżynierom diele*, Moskba, Mir, 1985.
- [6] Giergiel J. *Drgania układów mechanicznych*, Kraków, AGH, 1980.
- [7] Biderman W. L. *Teoriya mekhanicheskikh kolebanij*, Moskwa, Wysszaja shkola, 1980.



Prof. dr hab. inż. Yevhen Kharchenko – prof. nadzwyczajny Katedry Edukacji Technicznej,

Informatycznej i Fizyki Metali Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. W pracy naukowej zajmuje się problemami dynamiki i wytrzymałości maszyn. Prowadzi badania z zakresu teorii drgań nieliniowych układów

RISK BASED INSPECTION METHODOLOGY OVERVIEW

Przemysław DROŻYNER

University of Warmia and Mazury, Chair of Vehicle and Machine Operation
Poland, 10-736 Olsztyn, ul. Oczapowskiego 11, pdrozyner@yahoo.com

Eric VEITH

Bureau Veritas Abu Dhabi, Technical Centre
United Arab Emirates, Abu Dhabi, PO Box:26264, eric.veith@ae.bureauveritas.com

Summary

The paper presents general methodology of Risk Based Inspection. The method concerns the estimation of frequency and scope of inspection of static equipment, which operates in oil & gas industry. About 80% of risk of equipment's failure is associated with only 20% of equipment quantity so it becomes very important to establish a prioritised list of carried out inspections. In RBI method this priority is established as function of risk of equipment failure and consequences of such failure. In the paper the definition of risk in RBI aspect and way of its assessment are given.

Keywords: inspection, risk, inspection program

INSPEKCJA W OPARCIU O RYZYKO – PRZEGLĄD METODY

Streszczenie

W artykule przedstawiono ogólne założenia metody RBI ustalania częstotliwości i zakresu przeprowadzania inspekcji urządzeń eksploatowanych w przemyśle naftowym. Literatura podaje, że około 80% ryzyka związanego z uszkodzeniami tych urządzeń związane jest z około 20% ich liczby, ważne jest zatem ustalenie priorytetu wykonywanych inspekcji. W metodzie RBI priorytet ten ustala się w zależności od ryzyka wystąpienia uszkodzenia jak i jego skutków. W artykule podano określenie ryzyka w ujęciu metody RBI jak również sposób jego szacowania.

Słowa kluczowe: inspekcja, ryzyko, program inspekcji

1. INTRODUCTION

In the nineteen's, the American Petroleum Institute (API) initiated a RBI project with a sponsor group composed of petroleum industries, dedicated to refineries. The aim of project was to elaborate the method to direct inspection resources to the areas of a plant where there is the greatest risk-reduction and cost savings potential. Other facility types could be covered by a RBI methodology. The main principles remain unchanged, only the detailed methodology has to be customised according to the activities under consideration.

2. WHAT RBI IS

RBI is a method for using risk as a basis for prioritising and managing the effort of an inspection program to rationally allocate inspection resources. The term of "inspection" is understood as a systematic procedure used to assess equipment technical conditions. It is usually performed on a fixed periodical basis. In a operating plant or installation, a relatively large percentage of risk is associated with a small percentage of the equipment items. Typically, about 80% of risk of equipment's

failure is associated with only 20% of equipment (fig. 1). RBI allows shifting inspection and maintenance resources to provide a higher level of coverage on the high-risk items and an appropriate effort on lower risk equipment.

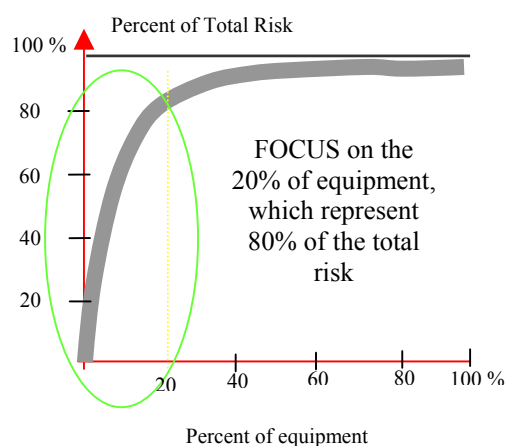


Fig. 1. Typical risk plot "total risk vs. quantity of equipment"

The RBI method defines the risk of operating equipment as the combination of two separate terms: the likelihood of an undetected failure and the consequence of such a failure. It is worth to notice, that such approach of term "risk" is also

used in safety standards as well as in other disciplines [3].

The assessment of failure consequences follows these steps:

- Scenarios definition in which failure (i.e.: leak) progress into undesirable events
- Estimation of the physical effect of each scenario
- adverse effect on people, equipment, environment, productivity as a result of the outcome.

The likelihood of failure assessment takes into consideration such criteria as :

- the damage mechanisms applicable to the item analysed
- the inspection history of the item
- the effectiveness of the previous inspection

The detailed method to assess consequence and likelihood depends directly upon the facility type. Furthermore, the level of detail of the method is fitted to the future use of the result, the available data for the analysis, the need of accuracy of the result: a range of probability/consequences or a formal probability/consequences.

In general, main steps of RBI study are as follow:

- preliminary analysis,
- failure probability assessment,
- consequence evaluation,
- risk ranking,
- inspection program

3. RISK ASSESSMENT - QUALITATIVE AND QUANTITATIVE APPROACH

Talking about the risk assessment as part of an RBI study, basically two approaches are possible:

- Qualitative
- Quantitative.

Qualitative approach is effective mainly for preliminary screening and to justify a hierarchy within the equipment criticality (=prioritisation). Qualitative method is based on factor ranking from expert judgement. Such prioritisation allows a rational allocation of inspection resource. However, it is usually difficult to assess precisely the impact of an inspection strategy on the risk with a qualitative approach.

Quantitative approach allows an accurate appraisal of the impact of an inspection strategy on the risk. A detailed quantitative approach is used for the most critical equipment resulting from the screening stage. Risk assessment uses statistical data and damage mechanism modelling.

The choice of the analysis level depends on the knowledge of risk level associated to the installation. However, the detailed specification of the method has to be fully designed to:

- The final need of its user,

- The required accuracy in the result,
- The availability of the data,
- The actual practices.

3.1. Qualitative approach

In the qualitative approach, which could concern units, systems or items, different likelihood and consequence factors are assessed. Each factor is rated within a pre-defined scale or framework. Weight of each factor and their combination to obtain the global likelihood/consequence factor have to be defined. Ranking is based on expert judgement.

Likelihood assessment - factors

- The equipment factor is related to the number of components in the unit that have the potential to fail.
- The damage factor is a measure of the risk associated with known damage mechanisms in the unit. These mechanisms include levels of general corrosion, fatigue cracking, low temperature exposure, high temperature exposure
- The process factor is a measure of the potential for abnormal operations or upset conditions to initiate a sequence leading to a loss of containment. It is a function of the number of shutdowns or process interruptions (planned or unplanned), the stability of the process and the potential for failure of protective devices because of plugging or other causes.
- The mechanical design factor measures the safety factor within the design of the unit: whether it is designed to current standards, and how unique, complex or innovative the unit design is.
- The inspection factor provides a measure of effectiveness of the current inspection program and its ability to identify the active or anticipated damage mechanisms in the unit. It examines the types of inspections, their thoroughness and the management of the program
- The condition factor accounts for the physical condition of the equipment from a maintenance and housekeeping perspective. A simple evaluation is performed on the apparent condition and upkeep of the equipment from a visual examination.

The likelihood factor is a combination of these factors. A likelihood category will correspond to the likelihood factor. The likelihood category gives the vertical position of the item in the risk matrix.

Consequence assessment - factors

The consequence factor is the highest factor between the damage factor and the health factor.

- The damage factor

The damage factor is derived from a combination of five sub-factors that determine the magnitude of a fire or explosion hazard:

- the chemical and quantity factor represents a chemical's inherent tendency to ignite (this is derived as a combination of the material's Flash factor and its reactivity factor) and the largest amount of material that could reasonably be expected to be released from a unit in a single event

- the state factor is a measure of how readily a material will flash to a vapor when it is released to the atmosphere. It is determined from a ratio of the average process temperature to the boiling temperature at atmospheric pressure

- the pressure factor is a measure of how quickly the fluid can escape.

- the credit factor is determined to account for the safety features engineered into the unit. These safety features can play a significant role in reducing the consequences of a potentially catastrophic release

- the degree of exposure is represented by the damage potential factor. This is accomplished by a rough estimate of the value of equipment near large inventories of flammable or explosive materials.

- The health factor

The health factor is a combination of four sub-factors :

- the toxic quantity factor is a measure of both the quantity and the toxicity of a material. (the toxicity is found using NFPA toxicity factor

- the dispersibility factor is a measure of the ability of a material to disperse. It is determined directly from the normal boiling point of material. The higher the boiling point, the less likely a material is to disperse

- the credit factor is determined to account for the safety features engineered into the unit

- the population factor is a measure of the number of people that can potentially be affected by a toxic release event.

A consequence category will correspond to a consequence actor. The highest one is plotted in the horizontal axis of the risk matrix.

3.2. The quantitative approach

The RBI programme is not a full risk analysis, but a hybrid technique between risk analysis and mechanical integrity. In its elemental form, a risk analysis is comprised of five tasks:

- System definition
- Hazard identification
- Consequence assessment
- Probability assessment
- Risk results.

Depending on the nature of the process and the detail of the study, a risk analysis may include thousands of different scenarios. The risk analysis would evaluate both the likelihood and the consequence of the set of events in each scenario.

For RBI, likelihood and consequence are also evaluated, but for a carefully defined and limited number of scenarios.

3.2.1. Preliminary analysis

In the system definition phase of the analysis, the ground rules are established and all pertinent information is collected. In fact, to be able to assess the likelihood and the consequences required for the risk assessment, some preparatory work has to be carried out more or less accurately according to the level chosen for the analysis :

- the design analysis
- the process and flow analysis
- the identification of damage mechanisms and evaluation of their kinetics

3.2.2. Consequence of failure

The failure of pressure –containing equipment and subsequent release of hazardous materials can lead to many undesirable effects. The RBI programme has condensed these effects into four basic risk categories:

Flammable events can cause damage in two ways : thermal radiation and blast overpressure

Toxic releases, in the RBI approach are only addressed when they affect personnel. These release can cause effects at greater distances than flammable events. And unlike flammable releases, toxic releases do not require an additional event (ex. : ignition) to cause an undesirable event.

Environmental risks are an important component to any consideration of overall risk in a processing plant. Environmental damage can occur with the release of many materials: the predominant risk comes from the release of large amounts of liquid hydrocarbons outside the bounds of the plant.

Business interruption can often exceed the costs of equipment and environmental damage and, therefore, should be accounted for in the RBI programme. Equipment replacement costs can be trivial compared to the business loss of a critical unit for an extended period of time.

Various scenarios are then developed to show how leaks may occur and how they can progress into undesirable events. They are four defining factors in a leak scenario :

- the size of the hole in the equipment
- the fluid properties : in equipment and at ambient conditions
- the total mass available for release
- the mitigation systems

The risk calculation is performed for each scenario (hole size), for all four risk categories, if desired. The risk for each equipment is then found by summing the individual risk components from each scenario calculation.

In a practical manner, a discrete set of hole sizes must be used. It would be impractical to perform risk for a continuous spectrum of hole sizes. Experience has shown that limiting the number of hole sizes allows for an analysis that is manageable yet still reflects the range of possible outcomes. The RBI method uses a predefined set of hole sizes representing small, medium, large and rupture case, with associated probability of occurrence. This approach provides reproducibility and consistency between studies; and it increases the ease with which the process can be automated with software. Finally, the three main steps of the consequence analysis are by order :

- The scenarios definition in which leaks may progress into undesirable events (a set of hole size)
- The estimation of the physical effect of each scenarios
- The adverse effects on people and equipment as a result of the outcome

But as the consequence analysis aims at aiding in establishing a relative ranking of equipment items on the basis of risk, the consequence measures usually presented are intended as simplified methods for establishing relative priorities for inspection programs. If more accurate consequence estimates are needed, the analyst could refer to more rigorous analysis techniques, such as those used in Quantitative Risk Analysis, and after could re-inject his result in the consequence analysis.

3.2.3. Likelihood of failure

The likelihood analysis begins with a database of generic failure frequencies for the specific equipment types. Examples of so called generic failure frequencies are presented in table below. For the sake of simplicity it is assumed that, in any case, the final failure mode is a breach of conventional size (1/4", 1", 4", 16" or rupture).

	1/4"	1"	4"	rupture
Column	$8 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-6}$
Filter	$9 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
piping.(8")	$3 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$
vessel	$4 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$

These generic frequencies are then modified by two terms, the Equipment Modification Factor (F_E) and the Management System Evaluation Factor (F_M):

$$\text{Frequency}_{\text{adjusted}} = \text{Frequency}_{\text{generic}} * F_E * F_M \quad (1)$$

The database of generic failure frequencies is based on a compilation of available records of equipment failure histories. The records can come from a variety of sources. Generic failure

frequencies have been developed for each equipment and each diameter of piping. If enough data were available for given equipment item, true failure probabilities could be calculated from actual observed failures.

The generic failure frequencies are built using records from all plants within a company or from various plants within an industry, from literature sources, past reports, and commercial databases. Therefore, the generic values represent an industry in general and do not reflect the true failure frequencies for a specific plant or unit.

The RBI method requires that the analyst use a generic failure frequency to "jump start" the probability analysis.

Equipment Modification Factor

The Equipment modification factor reflects the specific operating conditions of each item. It evaluates two categories of information linked to the equipment item:

- damage rate of the equipment item's material of construction, resulting from its operating environment.
- effectiveness of the facility's inspection program to identify and monitor the operative damage mechanisms prior to failure.

The RBI approach considers by definition that items are monitored and if an inspection points out a critical state for an item, preventive measures are systematically taken (repaired, changed...). So we don't consider only the failure likelihood but the likelihood that an undetected damage state becomes critical.

In fact, the equipment modification factor takes into account both the failure likelihood of the item, P_f , and the likelihood to detect the real damage state, P_{dp} . This second factor varies according to the inspection results in accordance to the Bayes principle.

As a consequence, the non detected failure probability is symbolically written as:

$$P_f * P_{dp} = F_{\text{Generic}} * F_E \quad (2)$$

The failure likelihood for each equipment item is calculated from structural integrity method where the damage mechanism kinetics is taken into account.

Management System Evaluation

Management Systems Evaluation Factor is derived from the results of an evaluation of a facility or operating unit's management systems that affect plant risk to adjust generic failure frequencies for differences in Process Safety Management systems. The factor is applied equally to all equipment items within the study and as a result, it does not change the order of the risk-based ranking of the equipment items. As an information, the management systems evaluation covers a wide range of topics like leadership and administration, process safety information, process hazard analysis, management of change, operating procedures, safe work practices, training, mechanical integrity, pre-startup safety review, emergency response, incident investigation, contractors, audit.

4. CRITICALITY ASSESSMENT AND ACCEPTANCE CRITERIA

The risk assessment produces, as result, item per item, a likelihood of failure and a consequence of failure, which are reported on a matrix representing a risk level (fig. 2). Each item is located on such a matrix to have a global representation of the risk.

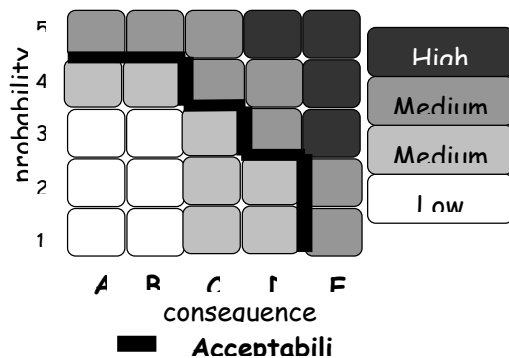


Fig. 2. Example of risk matrix

The definition of the matrix (usually 5X5 or 3X3), definition of each level and definition of acceptance criteria are set up case by case and depend on standard practices and industry practices.

As for example, in the matrix on figure 2, the black line figures a possible acceptability limit to be adjusted case by case:

High: it is likely that the failure occur more than once before next inspection - so criticality has imperatively to be reduced

Medium-high: it is likely that the failure occurs once - it needs corrective actions

Medium: it is unlikely that the failure occurs - it is an acceptable risk

Low : it is very unlikely that the failure occurs - does not need specific actions.

Then it is essential to define where is the acceptability limit.

For an item in the unacceptable part of the matrix, the risk has to be reduced. Given that the risk of an accident has two components, likelihood and consequence, to limit risk, one must reduce one or both of the risk components (fig. 3). In fact inspection only affects the likelihood factor. In order to reduce consequence, the design have to be reviewed (adding mitigation systems, distancing equipment...), and this is not within the RBI scope. The objective of RBI is to issue an inspection programme. So, the mitigation measures will consist in defining an inspection strategy to get more information on the condition of the equipment to better control it.

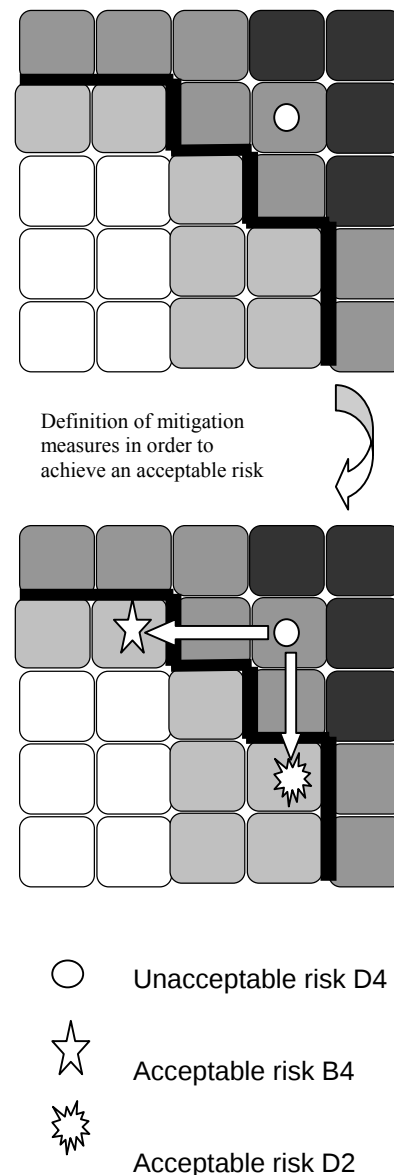


Fig. 3. Reducing risk components

For acceptable risk, one should not avoid to define mitigation actions as far as it won't cost: benefit planned inspection to extend the scope at quasi zero cost.

If no inspection strategy is able to make the risk acceptable a "run, repair, replace" decision has to

be defined. This action “RRR” is usually not considered are being included in an RBI process.

5. INSPECTION PROGRAMMING

This step contains two major points :

- development of inspection programmes addressing the types of damage that inspection should detect, and the appropriate inspection techniques to detect the damage
- reducing risk through inspection discusses the application of RBI tools to reduce risk and optimise inspection programmes.

Inspection influences risk, primarily by reducing the probability of failure. Many conditions (design errors, fabrication flaws, malfunction of control devices) can lead to equipment failure but in-service inspection is primarily concerned with the detection of progressive damage. The probability of failure due to such damage is a function of four factor.

- damage mechanism and resulting type of damage,
- rate of damage progression,
- probability of detecting damage with inspection techniques and predicting future damage states,
- tolerance of the equipment to the type of damage.

The purpose of an inspection programme is to define and perform those activities necessary to detect in-service deterioration of equipment before failures occur. An inspection programme is developed by systematically identifying:

- What type of damage to look for,
- Where to look for,
- How to look for the damage (inspection techniques),
- When or how often to look for.

As the risk is set for a given inspection strategy: it is a risk at a given date in the future with a given inspection effectiveness.

The comparison of the risks linked to several inspection strategies will provide a framework for decision. Operators can prefer to maintain the risk as low as possible even if the associated costs are higher, or to limit their expenses as much as possible without, of course, over passing their acceptability limit of risk.

So, taking into account several strategies and analysing their likelihood variation with time, we could choose the best one according our objectives and priorities. Fig 4. tries to localise the inspection plan elaboration through the entire methodology.

6. CONCLUSIONS

Risk Based Inspection allows inspection, test, and maintenance efforts to focus on the most important pieces of equipment. By using the RBI method it is possible to rank all process components according

to risk, to indicate the time to next inspection and to perform a cost optimization based on risk.

The likelihood (estimation of the likelihood of a functional failure of the equipment item) and consequence (estimation of the impact or cost of the failure) rankings are determined independently, and then are used to establish criticality assessment. Knowing criticality allows maintenance strategies to be developed which focus appropriate effort on all equipment items. Here are some examples of applications of Risk Based Inspection Programs implemented by BV Abu Dhabi in oil & gas industry on the Middle East.

7. EXAMPLES

7.1. QATAR PETROLEUM (Formerly QGPC)

QP conducts oil & gas exploration, development and production operations offshore Qatar on production platforms Maidan Mahzan (PS2), Bul-Hanine (PS3). Crude oil is transported via pipe lines to the crude oil terminal situated on Halul Island.

QGPC ordered for an inspection strategy for the static equipment on the above mentioned locations to be set up. This strategy was to indicate the intervals between inspections, techniques to be used as alternative method of inspection and monitoring to eliminate the unnecessary cost while preserving the asset integrity.

BUREAU VERITAS services included:

- the study of past inspection and equipment failures, plant design and business of facility
- the performance of complete criticality assessment for all equipment
- the production and submission of inspection schedules including proposed inspection methods and non-intrusive inspection techniques

A complete Computerised RBI system was developed in-house to manage the large quantity of data.

The Project was completed in 2 years, and delivered to QP in summer 2000.

7.2. OCCIDENTAL OF QATAR

After taking over from QGPC the PS-1 production station, which consists of a number of oil process, gas process, utilities and accommodation jackets interconnected to bridges, Occidental Petroleum of Qatar decided to implement a Risk Based approach for the scheduling of inspections of their production process and piping. The aim was to identify critical items and obtain a user friendly tool allowing to follow-up and monitor the shape of the installations, while implementing a cost effective yet more efficient inspection strategy. One additional objective for OXY was to be able to report the actions and inspections carried out on their installations to QGPC at the end of the leasing period in a clear and straight forward manner.

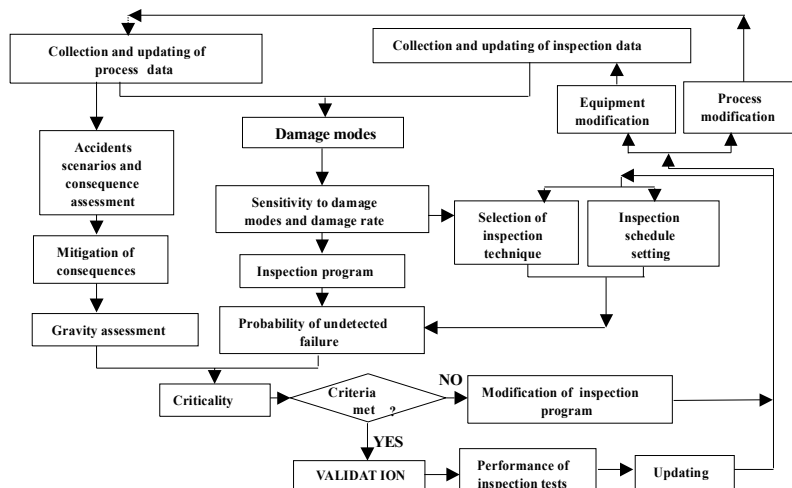


FIG. 4. Summary of the overall methodology

Bureau Veritas proceeded along the following steps

- 1- Screening of the inspection scheme in place,
- 2- Set up of a proprietary dedicated RBI Manual,
- 3- Dedicated database and associated software development,
- 4- Data gathering,
- 5- Pilot Case and experience feedback,
- 6- Deployment,

Most of the work was carried out on site, thus facilitating the input from the Operator's expertise and knowledge of the installations.

7.2. OCCIDENTAL OF OMAN

In order to optimize the inspection strategy, OCCIDENTAL PETROLEUM OF OMAN Inc. decided to change from a policy of a 2-year shutdown period to a 'Level 2, semi-qualitative RBI' strategy.

This strategy will be applied to all static equipment and pipework in the Suneinah concession block. The program is to be implemented in stages and completed by end of year 2002.

The Units covered by the Scope are :

- 100 Unit - crude stabilization
- 400 Unit - crude topping plant
- 500 Unit - NGL recovery plant
- 600 Unit - Gas re-injection plant
- K-102 A-G Unit - Residue gas re-injection
- K-103 A-D Unit
- IP gas boosters
- 4 production stations located at : # Safah Central & satellite # Al Barakah # Wadi Latham

An overall amount of about 300 equipment and 600 approx. is included in the study.

During this Project, Bureau Veritas acts as a Consultant with a view of :

- defining the global RBI approach to be adopted by Occidental Petroleum Oman,

- training the Occidental personnel to the application of this methodology,
- initialising the chosen software and start the implementation process.

Acknowledgements

1. F. Jung, RBI METHODOLOGY OVERVIEW, Development Department of Bureau Veritas Head Office in Paris, 1999.
2. American Petroleum Institute Standard 581 Risk Based Inspection
3. Michalski R., Szczyglak P., Identification of safety of machine during operation, Bioagrotechnical System Engineering, No 8, 2001.



Przemysław Drożyner obtained Master degree on Mechanical Faculty ART in Olsztyn in 1989 and in 1998 he obtained Ph.D title in Technical Science. After 10 years of academic work he joined Bureau Veritas in Saudi Arabia and one year later he was transferred to Technical Center of Bureau Veritas in Abu Dhabi. In 2002 he has come back to work on University of Warmia and Mazury.



Eric Veith obtained his Master degree in Corrosion Science from UMIST (Manchester) in 1989. After few years with a subsea works company, he joined Bureau Veritas in 1994 as a Corrosion/inspection specialist. Eric is presently Energy & Process Business Line Manager for this Company in the United Arab Emirates."

DIAGNOZOWANIE STANÓW ZDOLNOŚCI JAKOŚCIOWEJ PROCESU PRODUKCYJNEGO

Jerzy SZKODA

Katedra Eksploatacji Pojazdów i Maszyn Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego
ul. Oczipowskiego 11, 10-736 Olsztyn, tel./fax (0-PREFIX-89) 523-34-63

Streszczenie

Przedstawiono wskaźniki zdolności jakościowej procesu produkcyjnego, określających przedział zmienności parametru diagnostycznego procesu C_p oraz położenie wartości średniej rozkładu parametru diagnostycznego procesu C_{pk} .
Opisano strategię doskonalenia zdolności jakościowej procesu produkcyjnego.

Słowa kluczowe: diagnostyka, proces produkcyjny, jakość, zdolność jakościowa procesu, statystyka.

DIAGNOSING THE STATES OF QUALITY ABILITY OF PRODUCTION PROCESS

Summary

The paper presents the quality ability indexes of production process which define range of changeability of the diagnostics process parameter C_p and the position of the average value of the diagnostics process parameter C_{pk} .

The paper describes the improvement strategy of production process quality ability.

Key words: diagnostics, production process, quality, quality ability process, statistics.

1. WSTĘP

Na każdy proces produkcyjny oddziałują różne czynniki, które wpływają na jakość wytwarzanych wyrobów. Dlatego niezmiernie ważnym problemem praktycznym jest ocena wpływu tych czynników na jakość procesu.

W sterowaniu jakością procesu produkcyjnego istotne parametry charakteryzujące dany proces muszą być w sposób odpowiedni nadzorowane, tak aby ich wartości mieściły się w granicach tolerancji określonej przez technologa.

Stopień w jakim wartości parametru procesu utrzymywane są w granicach naturalnego zakresu parametru procesu, określić można na podstawie wartości wskaźnika rozrzutu parametru procesu – C_p oraz wskaźnika położenia wartości średniej w stosunku do wartości środkowej tolerancji – C_{pk} .

Oba te wskaźniki charakteryzują zdolność jakościową procesu produkcyjnego.

2. WSKAŹNIK ROZRZUTU PARAMETRU PROCESU - C_p

Wskaźnik C_p określa ile razy przedział rzeczywistej zmienności parametru procesu mieści się w obszarze naturalnego zakresu parametru procesu wyznaczonego wartością 6σ ($\pm 3\sigma$) (1):

$$C_p = \frac{GWP - DWP}{6\sigma} = \frac{T}{6\sigma} \quad (1)$$

gdzie:

GWP – górna wartość parametru rzeczywistego procesu;

DWP – dolna wartość parametru rzeczywistego procesu;

T – tolerancja;

σ – odchylenie standardowe.

Przyjmuje się założenie, że rozważania dotyczące badania zdolności jakościowej procesów produkcyjnych w sposób określony zależnością (1) są słuszne dla parametrów procesów, które mają rozkład normalny. Praktyczne badania zdolności procesów produkcyjnych wskazują, że większość procesów produkcyjnych charakteryzuje się normalnymi rozkładami ich parametrów.

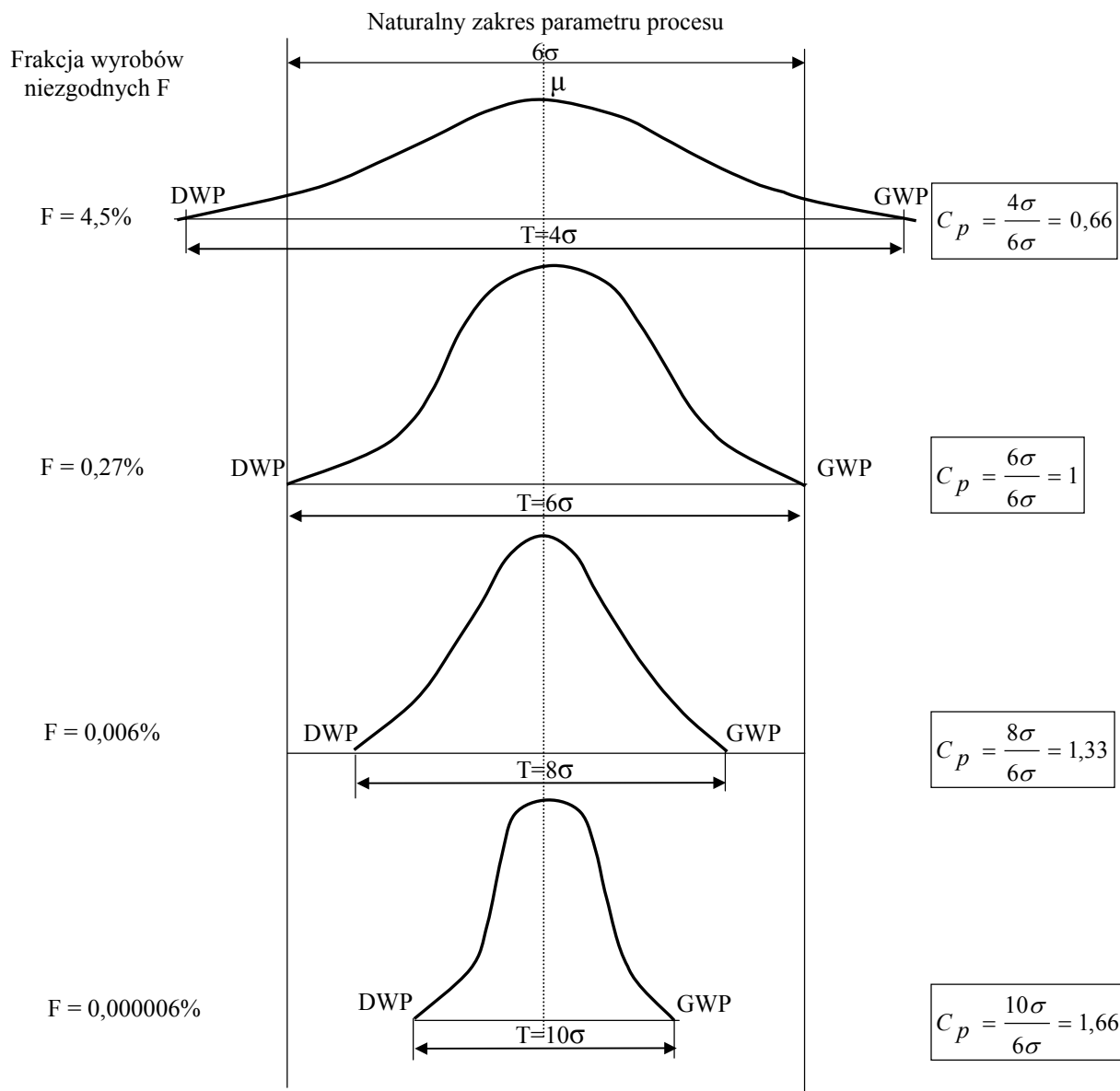
W literaturze naukowej wskaźnik C_p określa się jako wskaźnik rozrzutu parametru procesu.

Charakterystyczne wartości wskaźnika C_p przedstawiono na rys. 1.

Z rysunku 1. wynika, że im większa jest wartość wskaźnika C_p tym mniejszy jest rozrzut parametru procesu.

Ponieważ wskaźnik C_p charakteryzuje rozkłady idealnie centrowane to jest on jedynie wskaźnikiem oceny potencjalnej zdolności jakościowej procesu.

Następną miarą zdolności jakościowej procesu produkcyjnego jest wskaźnik C_{pk} .



Rys. 1. Przykłady różnych rozkładów parametrów procesu; μ – wartość średnia parametru procesu

3. WSKAŹNIK POŁOŻENIA WARTOŚCI ŚREDNIEJ ROZKŁADU PARAMETRU - C_{pk}

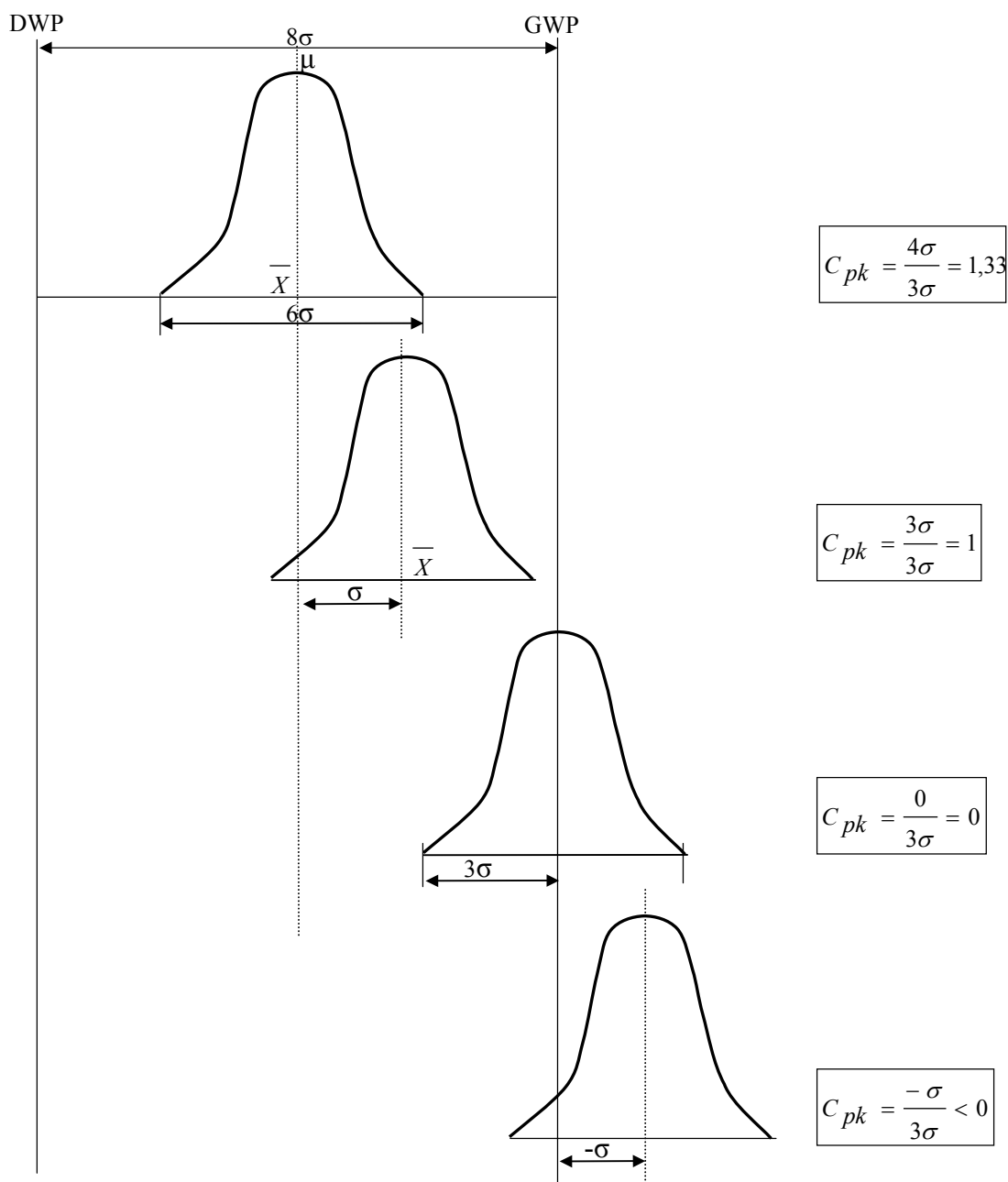
Wskaźnik położenia rozkładu parametru procesu C_{pk} jest miarą odległości między rzeczywistą wartością średniej rozkładu - $\bar{X}$ i środkiem przedziału tolerancji - μ .

Wskaźnik C_{pk} zdefiniowany jest zależnością (2):

$$C_{pk} = \begin{cases} \frac{GWP - \bar{X}}{3\sigma}, & \text{gdy } GWP - \bar{X} \leq \bar{X} - DWP \\ \frac{\bar{X} - DWP}{3\sigma}, & \text{gdy } GWP - \bar{X} > \bar{X} - DWP \end{cases} \quad (2)$$

Charakterystyczne wartości wskaźników C_{pk} przedstawiono na rys. 2. Diagnozę zdolności jakościowej procesu produkcyjnego dokonuje się na podstawie wartości wskaźników C_p i C_{pk} (tab. 1).

Jeżeli $C_p > 1,66$ i $C_p = C_{pk}$ to frakcja wadliwych wyrobów wyraża się jednostkami „ppm” (ang. Parts Per Million) – wada może wystąpić na milion wyrobów.



Rys. 2. Przykłady wartości wskaźnika położenia rozkładu C_{pk}

Tabela 1. Diagnozowanie zdolności jakościowej procesu produkcyjnego

Wartość wskaźnika C_p	Wartość wskaźnika C_{pk}	Diagnoza zdolności jakościowej procesu produkcyjnego
$C_p = 1$	$C_{pk} = 1$	Proces produkcyjny zdolny jakościowo. Frakcja wadliwych wyrobów $F=0,27\%$.
$C_p < 1$	$C_{pk} > 1$	Proces produkcyjny niezdolny jakościowo wymaga doskonalenia lub poszerzenia tolerancji.
$C_p = 1,33$	$C_{pk} = 1,33$	Proces produkcyjny o dużej zdolności jakościowej. Frakcja wadliwych wyrobów $F=0,006\%$.
$C_p = 1,66$	$C_{pk} < 1$	Proces produkcyjny niezdolny jakościowo. Na proces oddziałuje czynnik systematyczny. Należy ten czynnik usunąć.
$C_p > 1,66$	$C_{pk} > 1,66$	Zdolność jakościowa procesu produkcyjnego idealna. Frakcja wadliwych wyrobów jest na poziomie „ppm” $F=0,000006\%$.

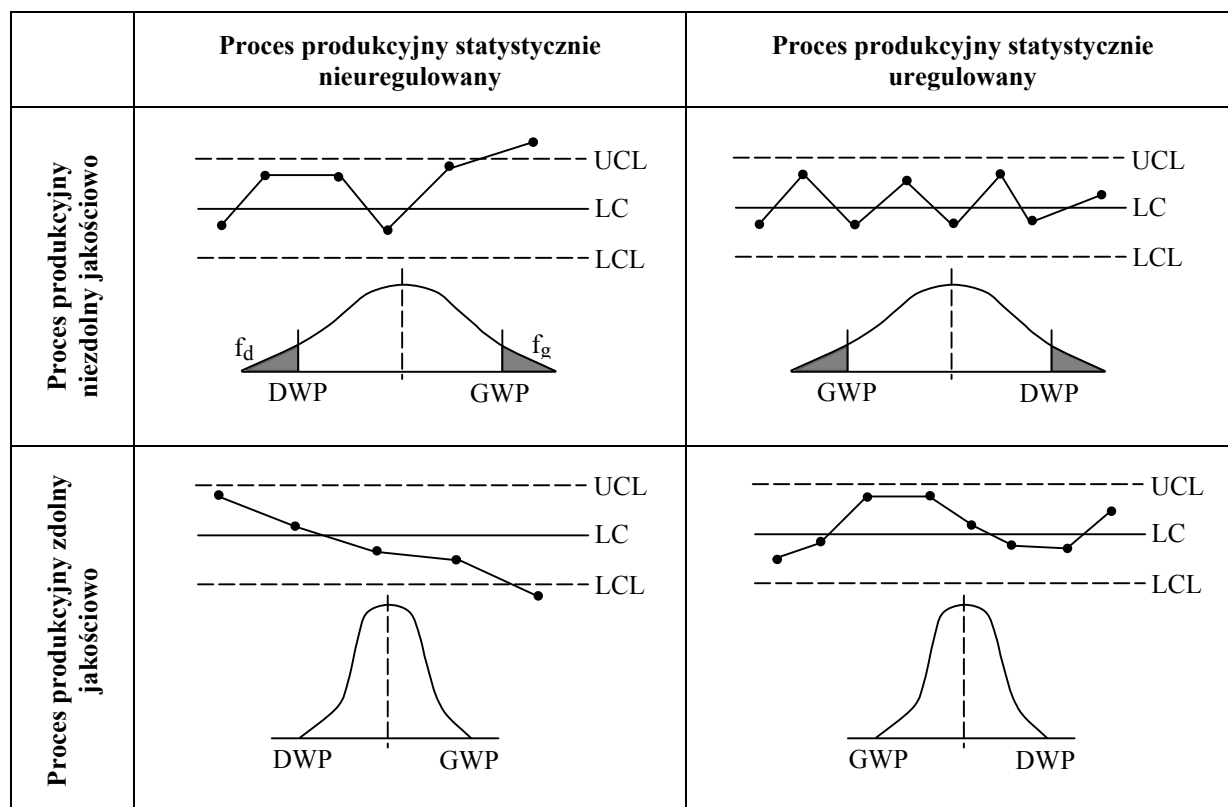
4. STRATEGIA DOSKONALENIA ZDOLNOŚCI JAKOŚCIOWEJ PROCESU PRODUKCYJNEGO

Przy ustalaniu tolerancji parametru procesu należy brać pod uwagę charakter oddziaływania na proces zmiennych naturalnych (losowych) [2] wynikających z dokładności maszyny lub urządzenia technologicznego, jakości narzędzi i mediów technologicznych itp.

Przy odpowiednio dobranych tolerancjach, uwzględniających oddziaływanie czynników

naturalnych i wyeliminowaniu zmiennych systematycznych [2] utrzymanie zdolności jakościowej procesów produkcyjnych jest możliwe z dużym prawdopodobieństwem, a wadliwość wyrobów jest teoretycznie bardzo mała.

Biorąc pod uwagę stany statystycznego uregulowania procesu produkcyjnego, które zostały omówione w opracowaniu [5] oraz stany zdolności jakościowej procesu można wyróżnić cztery sytuacje przedstawione na rys. 3.



Rys. 3. Stany diagnostyczne procesów produkcyjnych. Frakcja wyrobów wadliwych F jest sumą f_d – frakcji dolnej i f_g – frakcji górnej wyrobów wadliwych, UCL – górna linia kontrolna, LCL – dolna linia kontrolna, CL – linia centralna. Opracowanie na podstawie [1].

Podstawą do podjęcia decyzji o kontynuowaniu procesu produkcyjnego jest stan jego zdolności jakościowej bez względu na to czy proces produkcyjny jest statystycznie uregulowany czy też nie.

W przypadku nieuregulowania statystycznego procesu produkcyjnego należy bezwzględnie zidentyfikować i usunąć nielosową (systematyczną) zmienną, która oddziałuje na proces.

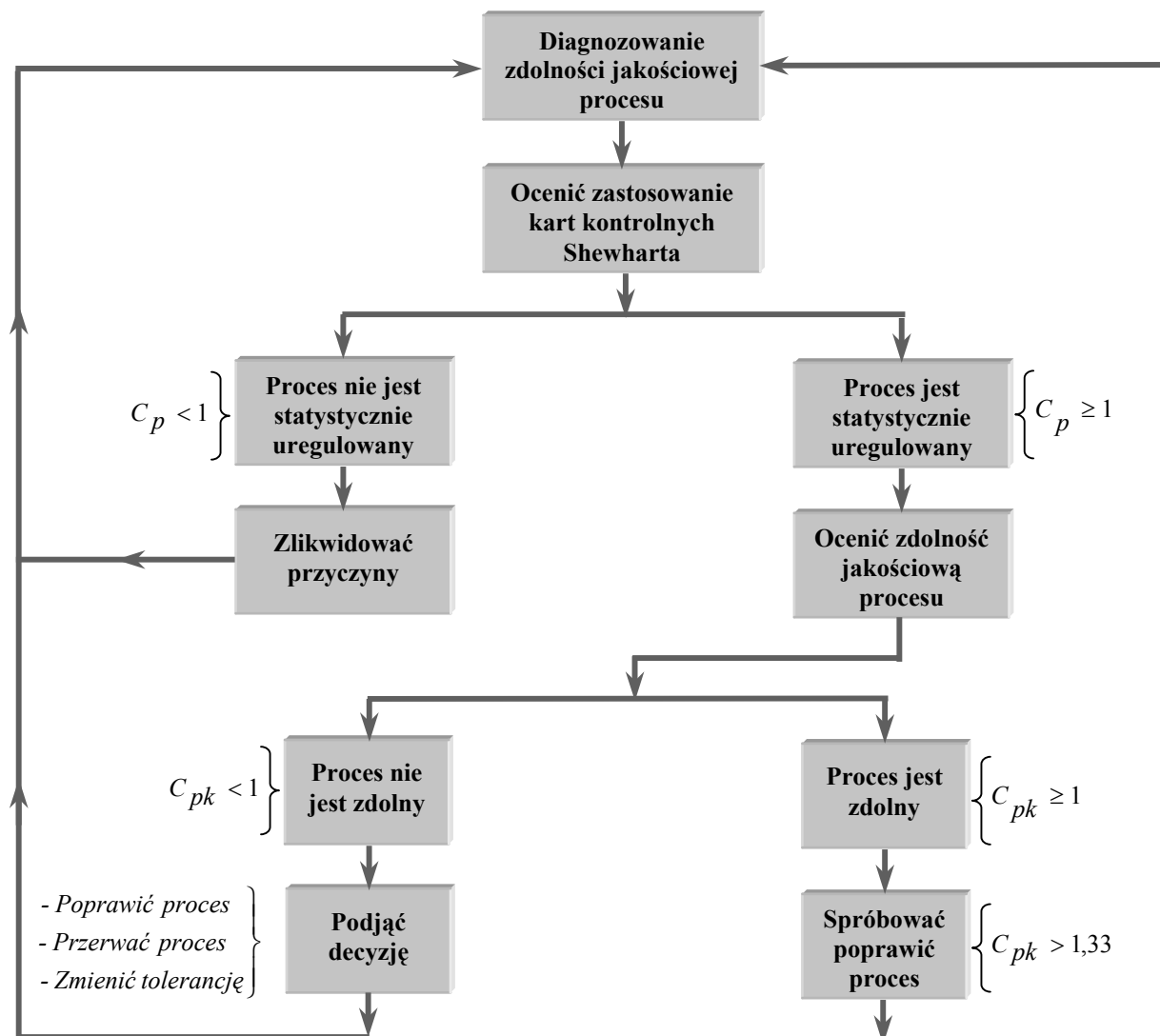
Strategię doskonalenia zdolności jakościowej procesu produkcyjnego z uwzględnieniem stanów uregulowania statystycznego procesów przedstawiono na rys. 4.

5. PRZYPADEK – DIAGNOZA STANU ZDOLNOŚCI JAKOŚCIOWEJ PROCESU HARTOWANIA NOŻY SKRAWAJĄCYCH

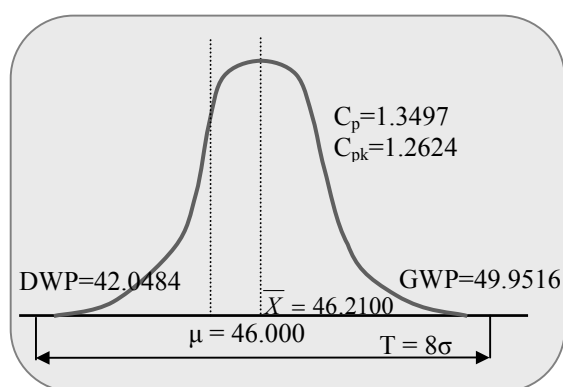
Przedmiotem diagnozy zdolności jakościowej jest proces hartowania noży skrawających produkowanych w firmie FUM „KAMAX” S.A. [3].

W tabeli 2 przedstawiono wyniki pomiarów wartości parametru procesu.

Graficzną postać rozkładu wartości parametru procesu hartowania noży skrawających przedstawiono na rys. 5.



Rys. 4. Algorytm strategii doskonalenia zdolności jakościowej procesu.
Opracowanie na podstawie PN-ISO 8258+AC1



Rys. 5. Rozkład wartości parametru diagnostycznego procesu hartowania noży skrawających oraz wartości wskaźników zdolności jakościowej procesu hartowania. Źródło [3]

6. PODSUMOWANIE

Diagnozowanie zdolności jakościowej procesu produkcyjnego odnosi się do badania oddziaływania

symptomów zmienności na proces w odniesieniu do przyjętych granic tolerancji.

Przy odpowiednio dobranych tolerancjach, uwzględniających oddziaływanie zmienności losowych, dokładności maszyn i urządzeń technologicznych oraz jakości narzędzi i mediów technologicznych, utrzymanie zdolności jakościowej procesów jest możliwe z dużym prawdopodobieństwem a wadliwość produkcji jest teoretycznie bardzo mała.

W diagnozie zdolności jakościowej procesów produkcyjnych bierze się pod uwagę wskaźniki rozrzutu wartości parametru diagnostycznego procesu C_p oraz wskaźnik położenia rozkładu wartości parametru diagnostycznego procesu C_{pk} .

Proces jest jakościowo zdolny gdy $C_p = C_{pk} \geq 1$. Wówczas frakcja wyrobów niezgodnych wynosi $F \leq 0,27\%$. W niektórych procesach produkcyjnych przemysłu elektronicznego udaje się osiągnąć poziom frakcji mierzonej jednostkami „ppm” (wadliwość na milion przypadków).

Tabela 2. Formularz wyników pomiarów parametru procesu

DIAGNOZOWANIE ZDOLNOŚCI JAKOŚCIOWEJ PROCESU									
DANE WEJŚCIOWE									
NAZWA PROCESU					Obróbka cieplna				
NAZWA WYROBU					Nóż skrawający				
WARTOŚĆ NOMINALNA PARAMETRU					46 HRC				
TOLERANCJA PARAMETRU					DWP = 4, GWP = 4				
LICZBA POMIARÓW					100				
WYNIKI POMIARÓW									
45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000
45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000
45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.500	45.500
45.500	45.500	46.000	46.000	46.000	46.000	46.000	46.000	46.000	46.000
46.000	46.000	46.000	46.000	46.000	46.000	46.000	46.000	46.000	46.000
46.000	46.000	46.000	46.000	46.500	46.500	46.500	46.500	46.500	46.500
46.500	46.500	46.500	46.500	46.500	46.500	46.500	46.500	46.500	46.500
47.000	47.000	47.000	47.000	47.000	47.500	47.000	47.000	47.000	47.000
47.000	47.000	47.000	47.000	47.000	47.000	47.000	48.000	48.000	48.000
48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000
WYNIKI DIAGNOZOWANIA ZDOLNOŚCI JAKOŚCIOWEJ PROCESU HARTOWANIA									
$\sum X_i = 4621.000$					$C_p = 1.3497$				
$\bar{X} = 46.2100$					$C_{pk} = 1.2624$				
DIAGNOZA ZDOLNOŚCI JAKOŚCIOWEJ PROCESU HARTOWANIA									
$C_p > 1, C_{pk} > 1$									
PROCES ZDOLNY JAKOŚCIOWO									

7. LITERATURA

- | | |
|---|--|
| <p>[1] Dopke J.: Statystyczny obraz spełnienia wymagań przez proces produkcyjny. Problemy Jakości 10/98. Wyd. SIGMA NOT, Warszawa, 1998.</p> <p>[2] Hamrol A., Mantura W.: Zarządzanie jakością. Teoria i praktyka. PWN, Warszawa-Poznań, 1998.</p> | <p>[3] Kubicki A.: Metody oceny efektywności systemów jakości w przedsiębiorstwie przemysłowym. IOiZwP ORGMASZ, Warszawa, 2001 (rozprawa doktorska).</p> <p>[4] PN-ISO 8258-1+AC1:1996 Karty Kontrolne Shewharta.</p> <p>[5] Szkoda J.: Wykorzystanie kart kontrolnych Shewharta do diagnozowania stanów statystycznego uregulowania procesów produkcyjnych.</p> |
|---|--|



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.

EMISJA AKUSTYCZNA JAKO NARZĘDZIE MONITOROWANIA PROCESU PĘKANIA MATERIAŁÓW SUSZONYCH

Kinga RAJEWSKA, Stefan Jan KOWALSKI

Politechnika Poznańska, Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej
Pl. M. Skłodowskiej Curie 2, 60-965 Poznań
Kinga.Rajewska@fct.put.poznan.pl

Streszczenie

Celem pracy jest przedstawienie emisji akustycznej (EA) jako metody monitorowania mikro i makropęknięć w materiałach suszonych, na przykładzie suszenia walca ceramicznego. Zaprezentowane dane eksperymentalne dotyczą suszenia konwekcyjnego i mikrofalowego. Rozważania teoretyczne bazują na termomechanicznym modelu suszenia ciał kapilarno-porowatych, opracowanym przez autorów. Rozwiązania numeryczne dotyczące ewolucji i rozkładu naprężeń wzdłuż promienia i obwodu walca przedstawiono dla warunków brzegowych odpowiadających konwekcyjnemu suszeniu. Wyniki badań z użyciem EA wykazują istnienie dwóch obszarów wzmożonej emisji dla suszenia konwekcyjnego i jednego obszaru dla suszenia mikrofalowego. Porównanie danych teoretycznych i eksperymentalnych dla suszenia konwekcyjnego pozwala stwierdzić, że obszary te odpowiadają występowaniu naprężeń maksymalnych w modelu teoretycznym. W pracy tej stwierdzono, że EA może być zastosowana do diagnozowania pęknięć i stanów niebezpiecznych w suszonych materiałach oraz, że suszenie mikrofalowe pozwala uzyskać lepszy produkt końcowy, ponieważ energia sygnałów jako reprezentacja naprężeń jest mniejsza dla tego rodzaju suszenia.

Słowa kluczowe: emisja akustyczna, suszenie konwekcyjne, mikrofalowe, naprężenia suszarnicze, pękanie

ACOUSTIC EMISSION AS A METHOD OF MONITORING OF FRACTURE PHENOMENA IN DRIED MATERIALS

Summary

Acoustic emission (AE) monitoring is used to detect micro and macrocracking in dried ceramic cylinder. The experimental results of convective and microwave drying are presented. The theoretical considerations are based on the thermomechanical model of drying of capillary-porous materials worked out by authors. The solution of the mathematical model presenting the evolution and distribution of stresses along radius of the cylinder and its circumference is given for the convective drying only. The AE tests show two ranges of intensive signal existence for convective drying and one range for microwave drying. The comparison of theoretical and experimental for convective drying data allows to state, that these ranges refer to maximal stresses pointed out by the theoretical model. It was stated, that microwave drying can give the better final product than convective drying, because the energy of signals as the representation of stresses is lower than in the case of convective drying.

Key words: acoustic emission, convective and microwave drying, drying-induced stresses, fracture

1. WPROWADZENIE

Emisja akustyczna zastosowana jest w tej pracy jako metoda nieniszcząca do oceny stanu naprężeń w suszonych materiałach. Metoda ta pozwala na bezpośrednie monitorowanie zachowania się materiału w czasie procesu suszenia, ponieważ podczas pękania materiał staje się źródłem EA o stosunkowo dużej energii. W związku z tym istnieje możliwość wykorzystania tego zjawiska do badania prawidłowości przebiegu procesu suszenia tak, by nie dopuścić do destrukcji materiału

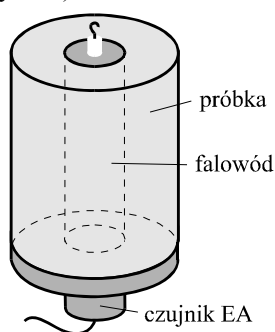
suszonego, zapewniając w ten sposób dobrą jakość końcową wyrobów suszonych. Wiadomym jest, że procesom suszenia wilgotnych materiałów kapilarno-porowatych towarzyszy deformacja i pękanie. Kiedy parametry suszenia (temperatura, wilgotność czynnika suszącego) nie są odpowiednio dobrane do fizyczno-mechanicznych właściwości materiału, naprężenia suszarnicze wzrastają, mogą w konsekwencji spowodować zniszczenie materiału. Ciągłe wzrastające wymagania co do jakości materiałów suszonych skłoniły autorów niniejszej pracy do zastosowania alternatywnej metody

suszenia w stosunku do tradycyjnej (konwekcyjnej), a mianowicie mikrofalowej. W metodzie tej gradient temperatury w suszonym elemencie, ze względu na inny charakter dostarczania ciepła, ma przeciwny zwrot niż w metodzie konwekcyjnej. Ma to spowodować mniejszą wartość generowanego naprężenia niż w przypadku suszenia konwekcyjnego. Rozważania teoretyczne opierają się na termomechanicznym modelu suszenia ciał kapilarno-porowatych. Rozwiązania numeryczne tego modelu dla przypadku ciała Hooke'a i Maxwella w przypadku suszenia konwekcyjnego i porównanie tych rozwiązań z wynikami eksperymentu wykazało, że któryś z tych modeli pozwala lepiej opisać stan naprężeń w czasie suszenia.

2. EMISJA AKUSTYCZNA

2.1. Przygotowanie próbki i warunki eksperymentu

Materiałem badawczym jest kaolin ceramiczny KOC (nazwa handlowa). Zdecydowano się na zastosowanie kaolinu, jako materiału badawczego, ponieważ znajduje on szerokie zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu i tak np. jako wypełniacz stosowany jest w przemyśle papierniczym, farbiarskim i gumowym, a w przemyśle ceramicznym m.in. w produkcji ceramiki sanitarnej i płytek okładzinowych. Przygotowana próbka o wilgotności względnej 28%, umieszczona była na podporce aluminiowej (suszenie konwekcyjne) lub ceramicznej (suszenie dielektryczne) tak, aby umożliwić przymocowanie czujnika EA i dopasować impedancje elementów, przez które przechodzi fala sprężysta od źródła do odbiornika (rys.2.1).



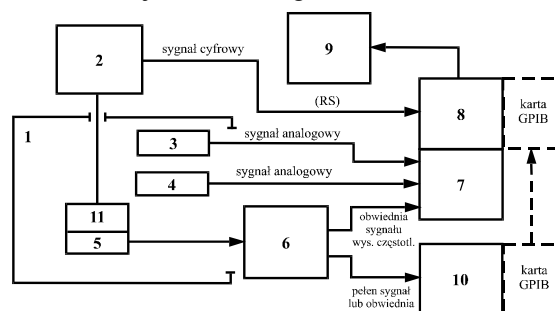
Rys.2.1. Łączenie próbki i detektora.

Tak przygotowana próbka umieszczana była odpowiednio w komorze konwekcyjnej lub mikrofalowej i suszona w różnych temperaturach. W trakcie procesu rejestrowano temperaturę, masę próbki oraz parametry sygnału EA.

2.2. Metoda EA

Proces powstawania sygnału EA w materiałach wiąże się z niejednorodnym rozkładem energii

wewnętrznej, który powstaje na skutek technologii wytwarzania lub pracy w różnych warunkach. Jeśli materiały poddane są działaniu czynników zewnętrznych, w przypadku suszenia następuje wymiana ciepła i masy, to rozkład energii wewnętrznej w materiale zmienia się i zachodzi w pewnych obszarach proces wyzwolenia energii. W dalszej kolejności w materiale dochodzi do powstania nowego rozkładu energii wewnętrznej. Wyzwolona energia zostaje częściowo zużyta na wykonanie lokalnej pracy mechanicznej, część zamienia się w ciepło, a mała część tej energii ulega wypromieniowaniu w postaci fal sprężystych. Fale te po dotarciu do powierzchni ograniczających materiał mogą być rejestrowane przez odpowiednie detektory. Po elektronicznej obróbce zarejestrowanego sygnału uzyskuje się parametry go charakteryzujące, zwane deskryptorami. Pochodzenie sygnału EA uwarunkowane jest procesami zachodzącymi w badanym ośrodku, jednak generalnie dotyczy lokalnej zmiany pola naprężeń w materiale (ruch defektów, powstawanie i rozprzestrzenianie się pęknięć). Jednym z deskryptorów EA, który może obrazować zmiany strukturalne materiału jako wynik generowanych w trakcie suszenia naprężeń, może być liczba zdarzeń emisji lub ich energia.



Rys.2.2. Schemat blokowy stanowiska do badań EA: 1 - suszarka komorowa, 2 - waga, 3 - czujnik temperatury, 4 - czujnik wilgoci, 5 - detektor EA, 6 - układ przetwarzania EA, 7 - karta akwizycji danych, 8 - komputer, 9 - drukarka, 10 - oscyloskop cyfrowy, 11 - próbka.

Rysunek 2.2 przedstawia schemat układu pomiarowego, za pomocą którego wykonano badania w niniejszej pracy.

W skład typowego układu do rejestracji sygnału EA wchodzi m.in.: detektor piezoelektryczny, cały szereg wzmacniaczy i przetworników, które wyodrębniają z sygnału poszczególne parametry (tempo zliczeń amplitud, zdarzeń, wartość skuteczną sygnału itp.) [1]. Obecnie aparatura pomiarowa współpracuje poprzez kartę przetwornika analogowo-cyfrowego z programem komputerowym rejestrującym dane.

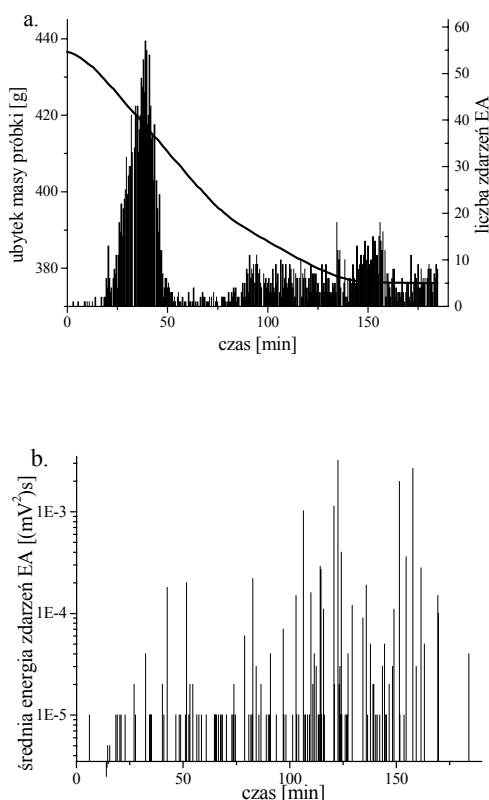
2.3. Wyniki eksperymentu

Badania doświadczalne przeprowadzono dla dwóch metod suszenia: konwekcyjnej i dielektrycznej. Ponieważ suszenie konwekcyjne, jeden z etapów procesu technologicznego wytwarzania materiałów, jest kosztowne z punktu widzenia czasu jego trwania i zużycia energii, poszukuje się innych, tańszych metod suszenia. Autorzy niniejszej pracy zdecydowali się na metodę mikrofalową, ponieważ pozwala ona w znacznie krótszym czasie wysuszyć materiał do żądanej wilgotności. Ponadto ze względu na inny charakter nagrzewania materiału, fala elektromagnetyczna powoduje objętościowe, równomierne wytwarzanie ciepła, ten typ suszenia pozwala uzyskać produkt końcowy o znacznie lepszej kondycji wytrzymałościowej.

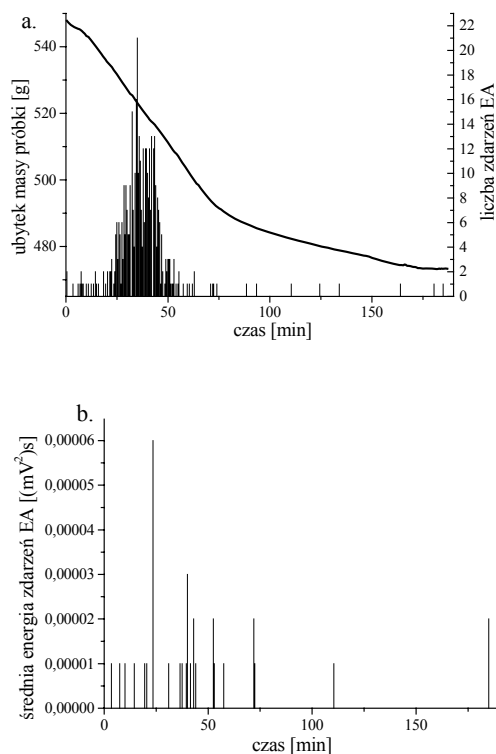
Suszenie konwekcyjne przeprowadzono w suszarce komorowej SML 48/250 firmy ZALMED, o mocy regulowanej (max 1200W). Aby znaleźć wspólny punkt odniesienia w sensie porównania warunków termicznych w tych odmiennych metodach suszenia, przeprowadzono procesy suszenia dla takich samych temperatur mokrego termometru w obu przypadkach. Ze względu na ograniczenia co do objętości publikacji

przedstawiono wyniki suszenia dla temperatury 70°C. W przypadku suszenia konwekcyjnego temperatura mokrego termometru równa 70°C, odpowiada temperaturze czynnika suszącego (gorące powietrze) równej 150°C.

Na rys. 2.3a przedstawiono krzywą suszenia, która charakteryzuje proces suszenia. Maksymalna liczba zliczeń w przedziale przypada w połowie tzw. okresu stałej prędkości suszenia. A właśnie w pierwszym okresie suszenia występuje największy skurcz materiału (10-70min) i to może powodować lawinowy wzrost liczby zdarzeń EA. Warstwy zewnętrzne bardzo szybko osiągają wilgotność równowagową i zaczynają się kurczyć ściskając bardziej wilgotne warstwy wewnętrzne. W miejscach niejednorodności strukturalnych kumulujące się naprężenia wywołują wyzwalanie się energii sprężystej w postaci impulsów EA. Następnym etapem suszenia jest okres przejściowy tzw. suszenia nienasyconego, prędkość suszenia jest ciągle stała, ale usuwanie wilgoci zachodzi już znacznie wolniej. W tym okresie pojawia się drugi obszar występowania wzmożonej EA, ale o mniejszej intensywności w odniesieniu do liczby impulsów niż w pierwszym obszarze. Defekty strukturalne powstające w trakcie suszenia i te istniejące wcześniej łączą się, mogą powodować mikro i makropęknięcia. Zjawisko to objawia się wystąpieniem mniejszej liczby zdarzeń EA, ale za to posiadających znacznie większą energię (rys.2.3b).



Rys.2.3. Wyniki EA dla suszenia konwekcyjnego: a) krzywa suszenia i liczba zdarzeń EA, b) średnia energia zdarzeń EA.



Rys.2.4. Wyniki EA dla suszenia mikrofalowego: a) krzywa suszenia i liczba zdarzeń EA, b) średnia energia zdarzeń EA.

Suszenie dielektryczne przeprowadzono w wagosuszarni komorowej 8-modowej WS110 firmy PLAZMATRONIKA. Źródłem mikrofal jest tu magnetron o mocy maksymalnej 600W. Wyniki doświadczalne dla tego rodzaju suszenia przedstawiono dla temperatury mokrego termometru próbki 70°C.

W tym przypadku zauważa się istnienie tylko jednego obszaru intensywnego wyzwiania energii sprężystej. A liczba impulsów w porównaniu do suszenia konwekcyjnego jest znacznie mniejsza. Można stwierdzić, że zgodność kierunków strumieni dyfuzyjnego i termodyfuzyjnego, jaka ma miejsce przy nagrzewaniu objętościowym materiału nie doprowadza do powstawania tak dużych naprężeń naruszających spójność struktury i powodujących pękanie. Z punktu widzenia energii impulsów jest ona także znacznie mniejsza niż w przypadku suszenia konwekcyjnego.

3. MODEL TEORETYCZNY

Przedstawiony tu model teoretyczny, a w dalszej kolejności ocena jego zgodności z wynikami eksperymentu, stwarza możliwość jego zastosowania wraz ze skoordynowaną z nim metodą emisji akustycznej, do sterowania rzeczywistym procesem suszenia na skalę przemysłową. Sterowanie takie polegać by miało na odpowiedniej korekcie parametrów suszenia (temperatura, wilgotność) tak, by liczba impulsów EA, ich amplituda, czy energia nie przewyższyła pewnego, określonego poziomu, przy którym przekroczona byłaby np. granica wytrzymałości materiału.

Prezentowany tu model teoretyczny, bazujący na mechanicznym modelu suszenia przedstawionym w pracy [2] i [3], jest dostosowany do geometrii próbki (walec, zagadnienie jednowymiarowe) i warunków eksperymentu dla suszenia konwekcyjnego. Model ten opiera się na prawach mechaniki ośrodków ciągłych i termodynamiki procesów nieodwracalnych, a sformułowany jest na podstawie równań bilansu masy, pędu, energii oraz entropii.

Do opisu stanu naprężenia zastosowano tu model Maxwella, będący złożeniem odkształceń odwracalnych i nieodwracalnych. Związek fizyczny pomiędzy odkształceniem ε_{ij} a naprężeniem σ_{ij} według modelu Maxwella ma postać równania różniczkowego względem czasu, czyli:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = D_{ijkl}^{(r)} \dot{\sigma}_{kl} + D_{ijkl}^{(i)} \sigma_{kl} + \varepsilon_{ij}^{(TX)} \quad (1)$$

jeżeli $D_{ijkl}^{(r)}$ i $D_{ijkl}^{(i)}$ są tensorami podatności sprężystej i wilgotnościowej, natomiast

$$\varepsilon_{kl}^{(TX)} = \kappa_{ij}^{(r)} g + \kappa_{ij}^{(x)} \theta \quad (2)$$

określa tensor odkształcenia termiczno-wilgotnościowego. W tym ostatnim związku g

oznacza temperaturę względną, θ oznacza wilgotność względną odniesioną do masy ciała suchego, natomiast $\kappa_{ij}^{(r)}$ i $\kappa_{ij}^{(x)}$ są współczynnikami termicznej i wilgotnościowej rozszerzalności/skurczliwości.

Dla materiału izotropowego (kaolin), związek fizyczny (1) po rozdzieleniu tensora naprężenia i odkształcenia na część dewiatorową i kulistą przyjmuje postać:

$$\dot{s}_{ij} + \frac{M}{\eta} s_{ij} = 2M \dot{e}_{ij} \quad (3)$$

$$\dot{\sigma} + \frac{K}{\kappa} \sigma = K(\dot{\varepsilon} - \varepsilon^{(TX)}) \quad (4)$$

gdzie M i K są modułami ścinania i odkształceń objętościowych, dla materiału sprężystego, a η i κ analogicznymi modułami dla materiału lepkosprężystego.

Wykorzystując analogie sprężysto-lepkosprężyste, określono naprężenia w walcu lepkosprężystym $\sigma_{ij}^{(v)}$ wykorzystując rozwiązanie dla walca sprężystego $\sigma_{ij}^{(e)}$ i pojęcie splotu Borela, czyli

$$\sigma_{ij}^{(v)}(r, t) = \sigma_{ij}^{(e)}(r, t) - \frac{1}{\tau} \int_0^t \exp\left(-\frac{t-\xi}{\tau}\right) \sigma_{ij}^{(e)}(r, \xi) d\xi \quad (5)$$

gdzie $\tau = \eta/M = \kappa/K$ oznacza czas relaksacji.

Zakładając, że naprężenie promieniowe na powierzchni i przemieszczenie promieniowe w środku walca są równe zero, rozwiązanie dla naprężenia promieniowego i obwodowego wyraża się jak następuje:

$$\sigma_{rr}^{(e)} = 2M \frac{3K}{2M + A} \left(\frac{1}{R^2} \int_0^R r \varepsilon^{(TX)} dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r r \varepsilon^{(TX)} dr \right) \quad (6)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi}^{(e)} = 2M \frac{3K}{2M + A} \left(\frac{1}{R^2} \int_0^R r \varepsilon^{(TX)} dr + \frac{1}{r^2} \int_0^r r \varepsilon^{(TX)} dr - \varepsilon^{(TX)} \right) \quad (7)$$

Rozkład zawartości wilgoci wyznaczono na podstawie równania bilansu masy

$$\rho^s \dot{\theta} = \left[A_{ij}^{(\mu)} (\mu_{,j} - g_{,j}) \right]_{,i} \quad (8)$$

gdzie

$$\mu(T, \varepsilon_{ij}^{(o)}, X) = \mu_0 - C^{(r)} g - (\gamma_{ij}^{(x)} / \rho^s) \varepsilon_{ij}^{(o)} + C^{(x)} \theta \quad (9)$$

określa uogólniony potencjał chemiczny wilgoci, którego gradient jest siłą sprawczą ruchu wilgoci. Rozkład temperatury w materiale suszonym określa się z równania bilansu energii, które po wykorzystaniu tożsamości Gibbsa przyjmuje postać:

$$\rho^s T \dot{s} = (A_{ij}^{(r)} T_{j,i}) + \rho r + Q \quad (10)$$

gdzie $s = s(T, \varepsilon, \theta)$ jest funkcją entropii. W dalszych rozważaniach przyjęto, że wpływ temperatury na stan naprężenia i odkształcenia jest wielokrotnie mniejszy niż wpływ zmian wilgotnościowych.

Równanie różniczkowe (11), za pomocą którego wyznacza się rozkład zawartości wilgoci, wynika z równania bilansu masy (8) i dla zagadnienia cylindrycznego ma postać:

$$\dot{\theta} = K_m \left[\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right] \quad (11)$$

gdzie K_m jest współczynnikiem dyfuzji. Stałe całkowania określono z warunków brzegowych odpowiadających suszeniu konwekcyjnemu, i początkowych

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=0} &= 0 \\ -\frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=R} &= \lambda (\theta|_{r=R} - \theta_a) \\ \theta(r, t) \Big|_{t=0} &= \theta_0 \end{aligned} \quad (12)$$

z których pierwszy wynika z symetrii układu, drugi określa konwekcyjną wymianę wilgoci, a trzeci warunek określa początkowy stan wilgoci. Ostateczne rozwiązanie dla rozkładu wilgoci przyjmuje postać szeregu według układu funkcji własnych:

$$\begin{aligned} \theta(r, t) &= \theta_a + (\theta_0 - \theta_a) \\ &\frac{2\lambda}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\omega_n r)}{(\omega_n^2 + \lambda^2) J_0(\omega_n R)} \exp(-\omega_n^2 K_m t) \end{aligned} \quad (13)$$

gdzie J_0 jest funkcją Bessela pierwszego rodzaju, zerowego rzędu.

Dla takiego rozkładu wilgoci wyznacza się naprężenie w walcu lepkosprężystym. Naprężenie promieniowe w walcu lepkosprężystym przyjmuje postać:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^{(v)} &= \left[\frac{2M}{2M+A} (2M+3A) \kappa^{(x)} (\theta_a - \theta_0) \frac{2\lambda}{R} \right] \\ &\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{R \omega_n} - \frac{J_1(\omega_n r)}{r J_0(\omega_n R)} \right) \\ &\frac{\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) - \omega_n^2 K_m \tau \exp(-\omega_n^2 K_m t)}{\omega_n (\omega_n^2 + \lambda^2) (1 - \omega_n^2 K_m \tau)} \end{aligned} \quad (14)$$

Naprężenie promieniowe w walcu sprężystym otrzymuje się z powyższego podstawiając $\tau \rightarrow \infty$:

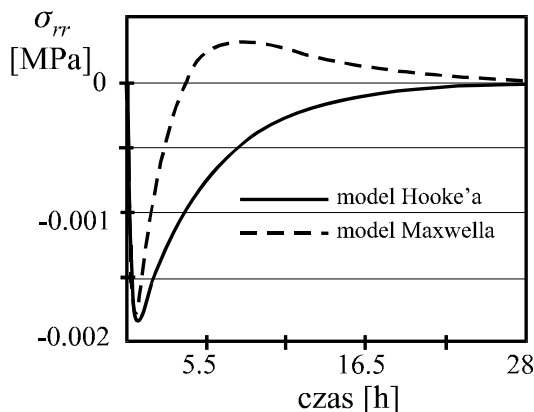
$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^{(e)} &= \left[\frac{2M}{2M+A} (2M+3A) \kappa^{(x)} (\theta_a - \theta_0) \frac{2\lambda}{R} \right] \\ &\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{R \omega_n} - \frac{J_1(\omega_n r)}{r J_0(\omega_n R)} \right) \\ &\frac{\exp(-\omega_n^2 K_m t)}{\omega_n (\omega_n^2 + \lambda^2)} \end{aligned} \quad (15)$$

Naprężenie obwodowe w walcu lepkosprężystym wynosi:

$$\begin{aligned} \sigma_{\varphi\varphi}^{(v)} &= \left[\frac{2M}{2M+A} (2M+3A) \kappa^{(x)} (\theta_a - \theta_0) \frac{2\lambda}{R} \right] \\ &\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{R \omega_n} + \frac{1}{\omega_n r} \frac{J_1(\omega_n r)}{J_0(\omega_n R)} - \frac{J_0(\omega_n r)}{J_0(\omega_n R)} \right) \\ &\frac{\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) - \omega_n^2 K_m \tau \exp(-\omega_n^2 K_m t)}{(\omega_n^2 + \lambda^2) (1 - \omega_n^2 K_m \tau)} \end{aligned} \quad (16)$$

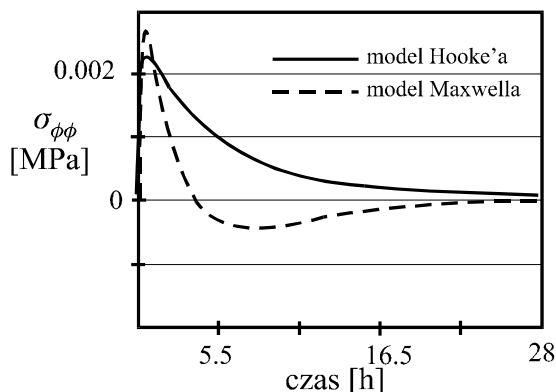
a w walcu sprężystym ($\tau \rightarrow \infty$):

$$\begin{aligned} \sigma_{\varphi\varphi}^{(v)} &= \left[\frac{2M}{2M+A} (2M+3A) \kappa^{(x)} (\theta_a - \theta_0) \frac{2\lambda}{R} \right] \\ &\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{R \omega_n} + \frac{1}{\omega_n r} \frac{J_1(\omega_n r)}{J_0(\omega_n R)} - \frac{J_0(\omega_n r)}{J_0(\omega_n R)} \right) \\ &\frac{\exp(-\omega_n^2 K_m t)}{(\omega_n^2 + \lambda^2)} \end{aligned} \quad (17)$$



Rys.3.1. Ewolucja naprężeń promieniowych.

Na rys.3.1 przedstawiono graficzną prezentację ewolucji naprężenia promieniowego, a na rys.3.2 naprężenia obwodowego dla modelu ciała Hooke'a i Maxwella.



Rys.3.2. Ewolucja naprężeń obwodowych

Ciekawym zjawiskiem jest zmiana znaku naprężenia w trakcie suszenia wykazywana przez model modelu Maxwella. Taka rewersja naprężeń może mieć miejsce w materiałach suszonych, gdy występują odkształcenia trwałe.

4. DYSKUSJA WYNIKÓW I WNIOSKI

Jako, że przedstawione wyżej rozwiązanie analityczne dotyczy suszenia konwekcyjnego, ocena zgodności wyników teoretycznych i eksperymentu będzie odnosić się do tego rodzaju suszenia.

Obszary występowania maksymalnych naprężeń w modelu Maxwella i dwa charakterystyczne obszary wzmoczonej EA są ze sobą skorelowane. Można stwierdzić, że obszary intensywnej emisji sygnałów akustycznych dotyczą występowania w suszonym materiale naprężeń maksymalnych. Obydwa modele są zgodne co do pierwszego obszaru. Natomiast powtórne pojawienie się naprężeń powodujących drugie ekstremum emisji wykazuje tylko model Maxwella. Podsumowując, lepkosprężysty model ciała w tym przypadku wykazuje większą zgodność z doświadczeniem,

lepiej odzwierciedla zjawiska fizyczne zachodzące w czasie procesu suszenia.

Natomiast porównanie metody suszenia konwekcyjnej i mikrofalowej pozwala, na podstawie uzyskanych wyników stwierdzić, że:

- w przypadku metody mikrofalowej w tym samym czasie suszenia (3h) uzyskano większy ubytek wilgoci (około 20%) w porównaniu do metody konwekcyjnej,
- zarówno liczba impulsów EA jak ich energia są mniejsze dla suszenia mikrofalowego.

LITERATURA

- [1] Ranachowski Z., 1997, Metody pomiaru i analiza sygnału emisji akustycznej, IPPT PAN, Warszawa
- [2] Kowalski S.J., 2000, Towards a Thermodynamics and Mechanics of Drying Processes, Chem.Engng.Sci., 55, 1289-1304
- [3] Kowalski S.J., Rajewska K., 2002, Drying induced stresses in elastic and viscoelastic saturated materials, Chem.Engng.Sci., (w druku)

Pracę wykonano w ramach projektu Nr 7 T09C 035 21, sponsorowanego przez Komitet Badań Naukowych



Prof. dr hab. inż. Stefan Jan Kowalski: profesor zw. w Instytucie Technologii i Inżynierii Chemicznej Politechniki Poznańskiej w zakresie mechaniki stosowanej i inżynierii chemicznej. Główne zainteresowania naukowe dotyczą mechaniki zawilżonych materiałów porowatych, propagacji fal w tych ośrodkach, termomechaniki materiałów suszonych, sedimentacji i konsolidacji sedimentu.



Mgr inż. Kinga Rajewska: słuchaczka Studium Doktoranckiego Technologia Chemiczna i Aparatura Badawcza w Instytucie Technologii i Inżynierii Chemicznej Politechniki Poznańskiej. Zainteresowania naukowe dotyczą emisji akustycznej jako metody badawczej oraz wykorzystania mikrofal w technice suszenia.

MODEL MATEMATYCZNY PROCESU EKSPLOATACJI OBIEKTÓW TECHNICZNYCH Z UWZGLĘDNIENIEM ICH STANU DIAGNOZOWANIA

Stanisław NIZIŃSKI, Sławomir WIERZBICKI

Katedra Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, Wydział Nauk Technicznych
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, ul. Oczapowskiego 11, 10-736 Olsztyn, tel. (89) 523-34-63
e-mail: slawekw@uwm.edu.pl

Streszczenie

Praca jest poświęcona modelom procesu eksploatacji pojazdów mechanicznych traktowanym jako: łańcuch Markowa, proces dyskretny w stanach i czasie, proces semi-Markowa. Proces eksploatacji pojazdów mechanicznych opisują stany: diagnozowania, zdatności, niezdatności, użytkowania i obsługiwanie.

Słowa kluczowe: obiekt techniczny, modele matematyczne, proces eksploatacji, stany diagnostyczne

MATHEMATICAL MODEL OF TECHNICAL OBJECTS EXPLOITATION CONSIDERING THEIR DIAGNOSTIC STATE

Summary

The works is dedicated to models of exploitation process of mechanical vehicles which is treated as: Markow chain, process in states and time, semi-Markow process. The exploitation process of mechanical vehicles is described by states of: diagnosing, operational, non-operational, use and service.

Keywords: technical object, mathematical models, process of exploitation, diagnostic states

1. WSTĘP

W fazie eksploatacji pojazdów mechanicznych zachodzą różnorodne procesy, a w szczególności (rys. 1): użytkowania, zużycia, diagnozowania, prognozowania i genezowania stanów, obsługiwanie, przechowywania i konserwacji, przetwarzania, przechowywania i przedstawiania informacji, zarządzania eksploatacją, inne.

Niniejsza praca jest ograniczona do problematyki niektórych stochastycznych modeli matematycznych procesów eksploatacji pojazdów mechanicznych.

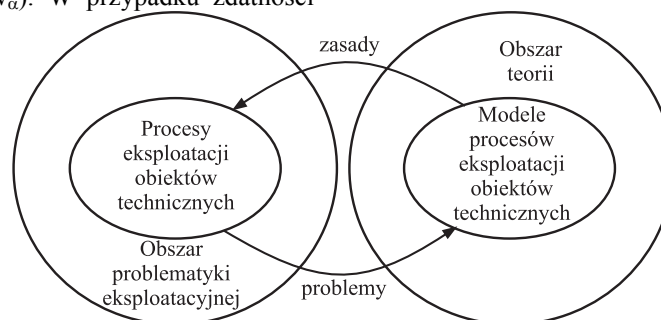
2. GRAF PROCESU EKSPLOATACJI

Graf procesu eksploatacji pojazdów mechanicznych, którym uwzględniono stan w^1 ich zdatności i stan w^0 niezawodności przedstawiono na rys. 2. [4].

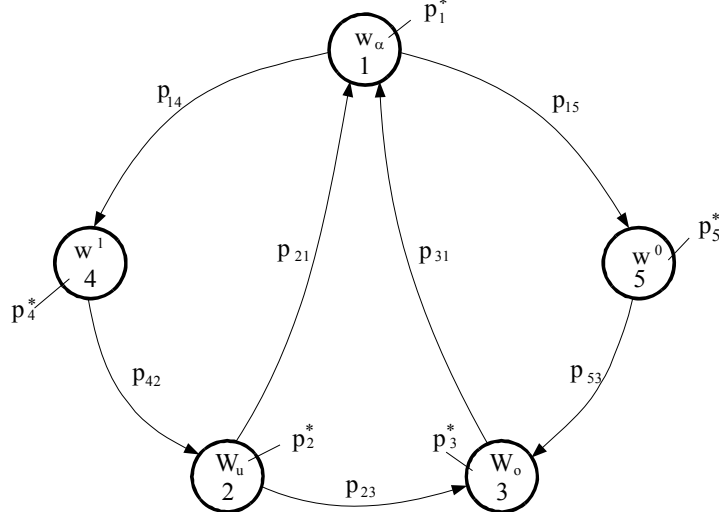
Pierwszą operacją wprowadzającą pojazdy mechaniczne do procesu eksploatacji jest ich diagnozowanie (stan w_α). W przypadku zdatności

pojazdów z prawdopodobieństwem p_{14} są one kierowane do stanu zdatności w^1 , jeżeli są niezdatne do stanu w^0 niezdatności, z prawdopodobieństwem p_{15} . Zdatne pojazdy mechaniczne są następnie kierowane do podzbioru stanów W_u użytkowania, zaś niezdatne do podzbioru stanów W_o obsługiwanie. Po wykonaniu zadań operacyjnych w podsystemie użytkowania pojazdy mechaniczne są kierowane ponownie do stanu w_α ich diagnozowania. Dotyczy to również pojazdów, w których wykonano naprawy lub inne zabiegi obsługowe.

Z opisu grafu przedstawionego na rys. 2 widać, że do procesu eksploatacji pojazdów mechanicznych wprowadzono kryterium oceny efektywności, którym jest stan techniczny. Graf ten jest grafem podstawowym na bazie którego będą budowane grafy i modele matematyczne innych procesów eksploatacji pojazdów mechanicznych.



Rys. 1. Koncepcja modelowania rzeczywistości eksploatacyjnej pojazdów mechanicznych


 Rys. 2. Graf eksploatacji pojazdów mechanicznych z uwzględnieniem stanu w^1 zdolności i stanu w^0 niezdatności: w_α , w_u i w_o – zbiory stanów: diagnozowania, użytkowania i obsługiwanie;
 p_{14} , p_{15} , p_{21} , p_{23} , p_{42} , p_{53} – prawdopodobieństwa przejść procesu eksploatacji pojazdów mechanicznych, p_1^* , p_2^* , p_3^* , p_4^* , p_5^* – prawdopodobieństwa graniczne przebywania obiektów w wyróżnionych stanach

3. MODEL DYSKRETNY W STANACH I CZASIE

Macierz prawdopodobieństw przejść stanów ma postać (rys. 1):

$$P_{\alpha A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & p_{14} & p_{15} \\ p_{21} & 0 & p_{23} & 0 & 0 \\ p_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{42} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{53} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Z macierzy (1) wynika, że:

$$\begin{aligned} p_{14} + p_{15} &= 1 \\ p_{21} + p_{23} &= 1 \\ p_{31} &= 1 \\ p_{42} &= 1 \\ p_{53} &= 1 \end{aligned} \quad (2)$$

Biorąc pod uwagę założenie, że proces eksploatacji jest dyskretny w stanach i czasie [2, 3, 5, 6, 7] uzyskujemy następujące równania stanów granicznych:

$$\begin{aligned} p_1^* &= p_{21} \cdot p_2^* + p_{31} \cdot p_3^* \\ p_2^* &= p_{42} \cdot p_4^* \\ p_3^* &= p_{23} \cdot p_2^* + p_{53} \cdot p_5^* \\ p_4^* &= p_{14} \cdot p_1^* \\ p_5^* &= p_{15} \cdot p_1^* \end{aligned} \quad (3)$$

Warunek normalizacyjny na następującą postać:

$$p_1^* + p_2^* + p_3^* + p_4^* + p_5^* = 1 \quad (4)$$

Zapis macierzowy równań (3) i (4) przedstawia wyrażenie:

$$\begin{bmatrix} -1 & p_{21} & p_{31} & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & p_{42} & 0 \\ 0 & p_{23} & -1 & 0 & p_{53} \\ p_{14} & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1^* \\ p_2^* \\ p_3^* \\ p_4^* \\ p_5^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$A_A \cdot P_A = B_A \quad (6)$$

Rozwiązanie równań (5) i (6) określa wzór:

$$P_A = A_A^{-1} \cdot B_A \quad (7)$$

Prawdopodobieństwa graniczne stanów są następujące:

$$\begin{aligned} p_1^* &= \frac{1}{3 + p_{14}(2 - 2p_{21} - p_{23})} \\ p_2^* &= \frac{p_{21}}{3 + p_{14}(2 - 2p_{21} - p_{23})} \\ p_3^* &= \frac{1 - p_{14} \cdot p_{21}}{3 + p_{14}(2 - 2p_{21} - p_{23})} \\ p_4^* &= \frac{p_{14}}{3 + p_{14}(2 - 2p_{21} - p_{23})} \\ p_5^* &= \frac{1 - p_{14}}{3 + p_{14}(2 - 2p_{21} - p_{23})} \end{aligned} \quad (8)$$

4. MODEL DYSKRETNY W STANACH I CIĄGŁY W CZASIE

Biorąc pod uwagę że proces eksploatacji pojazdów mechanicznych jest dyskretny w stanach i ciągły w czasie [2, 3, 5, 6, 7] układ równań opisujących proces eksploatacji pojazdów mechanicznych (rys. 3) ma postać:

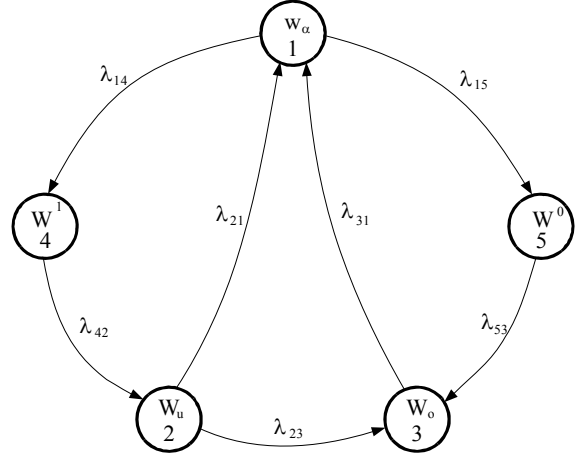
$$\begin{aligned} -\lambda_{14} \cdot p_1^0 - \lambda_{15} \cdot p_1^0 + \lambda_{21} \cdot p_2^0 + \lambda_{31} \cdot p_3^0 &= 0 \\ -\lambda_{21} \cdot p_2^0 - \lambda_{23} \cdot p_2^0 + \lambda_{42} \cdot p_4^0 &= 0 \\ -\lambda_{31} \cdot p_3^0 - \lambda_{23} \cdot p_2^0 + \lambda_{53} \cdot p_5^0 &= 0 \\ -\lambda_{42} \cdot p_4^0 + \lambda_{14} \cdot p_1^0 &= 0 \\ -\lambda_{53} \cdot p_5^0 + \lambda_{15} \cdot p_1^0 &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Równanie piąte zastępujemy warunkiem normalizującym:

$$p_1^0 + p_2^0 + p_3^0 + p_4^0 + p_5^0 = 1, \quad (10)$$

otrzymując:

$$\begin{aligned} (-\lambda_{14} - \lambda_{15})p_1^0 + \lambda_{21} \cdot p_2^0 + \lambda_{31}p_3^0 &= 0 \\ (-\lambda_{21} - \lambda_{23})p_2^0 + \lambda_{42}p_4^0 &= 0 \\ \lambda_{23} \cdot p_2^0 - \lambda_{31}p_3^0 + \lambda_{53} \cdot p_5^0 &= 0 \\ \lambda_{14} \cdot p_1^0 - \lambda_{42} \cdot p_4^0 &= 0 \\ p_1^0 + p_2^0 + p_3^0 + p_4^0 + p_5^0 &= 1 \end{aligned} \quad (11)$$



Rys. 3. Graf procesu eksploatacji pojazdów mechanicznych, w którym wyróżniono stan zdadności w^1 i stan niezdadności w^0 : w_α , w_u i w_o – stany: diagnostowania, użytkowania i obsługi; λ_{14} , λ_{15} , λ_{42} , λ_{53} , λ_{21} , λ_{31} – intensywność przejść obiektów między wyróżnionymi stanami

W zapisie macierzowym układ równań (11) ma postać:

$$\begin{bmatrix} -\lambda_{14} - \lambda_{15} & \lambda_{21} & \lambda_{31} & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda_{21} - \lambda_{23} & 0 & \lambda_{42} & 0 \\ 0 & \lambda_{23} & -\lambda_{31} & 0 & \lambda_{53} \\ \lambda_{14} & 0 & 0 & -\lambda_{42} & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1^0 \\ p_2^0 \\ p_3^0 \\ p_4^0 \\ p_5^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$A_B \cdot P_B = B_B \quad (13)$$

Rozwiązanie układu równań (13) określa wartość prawdopodobieństwa granicznych wyróżnionych stanów:

$$P_B = A_B^{-1} \cdot B_B \quad (14)$$

5. MODEL SEMI-MARKOWA

Biorąc pod uwagę proces eksploatacji pojazdów mechanicznych jako proces semi-Markowa [2, 4, 7] rozkład graniczny procesu eksploatacji pojazdów mechanicznych (rys. 2) określają wzory:

$$\begin{aligned} p_1^* &= \frac{p_1^* \cdot E(T_1)}{p_1^* E(T_1) + p_2^* E(T_2) + p_3^* E(T_3) + p_4^* E(T_4) + p_5^* E(T_1)} = \\ &= \frac{E(T_1)}{E(T_1) + p_{14} E(T_2) + (1 - p_{14} \cdot p_{21}) E(T_3) + p_{14} \cdot E(T_4) + (1 - p_{14}) E(T_5)} \\ p_2^* &= \frac{p_2^* \cdot E(T_2)}{p_1^* E(T_1) + p_2^* E(T_2) + p_3^* E(T_3) + p_4^* E(T_4) + p_5^* E(T_1)} = \\ &= \frac{p_{14} E(T_2)}{E(T_1) + p_{14} E(T_2) + (1 - p_{14} \cdot p_{21}) \cdot E(T_3) + p_{14} \cdot E(T_4) + (1 - p_{14}) E(T_5)} \\ p_3^* &= \frac{(1 - p_{14} \cdot p_{21}) E(T_3)}{E(T_1) + p_{14} E(T_2) + (1 - p_{14} \cdot p_{21}) \cdot E(T_3) + p_{14} \cdot E(T_4) + (1 - p_{14}) E(T_5)} \\ p_4^* &= \frac{p_{14} E(T_4)}{E(T_1) + p_{14} E(T_2) + (1 - p_{14} \cdot p_{21}) \cdot E(T_3) + p_{14} \cdot E(T_4) + (1 - p_{14}) E(T_5)} \\ p_5^* &= \frac{(1 - p_{14}) E(T_5)}{E(T_1) + p_{14} E(T_2) + (1 - p_{14} \cdot p_{21}) \cdot E(T_3) + p_{14} \cdot E(T_4) + (1 - p_{14}) E(T_5)} \end{aligned} \quad (15)$$

gdzie:

$p_1^*, p_2^*, p_3^*, p_4^*, p_5^*$ - prawdopodobieństwa graniczne (8) włożonego łańcucha Markowa;

$E(T_1), E(T_2), E(T_3), E(T_4), E(T_5)$ – wartości oczekiwane prawdopodobieństw przebywania pojazdów mechanicznych w wyróżnionych stanach.

Prawdopodobieństwa graniczne (15) można interpretować następująco:

- 1) prawdopodobieństwo p_1 jest współczynnikiem, który charakteryzuje proces diagnozowania pojazdów (K_d – współczynnik diagnozowania);
- 2) prawdopodobieństwo p_2 to współczynnik określający zbiór zdalnych pojazdów oczekujących na użytkowanie (K_{ou} – współczynnik oczekiwania użytkowania);
- 3) prawdopodobieństwo p_3 jest współczynnikiem, który charakteryzuje niezdatne pojazdy oczekujące na obsługiwanie (K_{oo} – oczekiwanie obsługiwanie);
- 4) prawdopodobieństwo p_4 to współczynnik, który określa zbiór zdalnych i użytkowanych pojazdów mechanicznych (K_u – współczynnik użytkowania);
- 5) $p_2 + p_4 = K_{gt}$ – współczynnik gotowości technicznej obiektów;
- 6) prawdopodobieństwo p_5 to współczynnik, który wskazuje frakcje niezdatnych pojazdów mechanicznych, która jest obsługiwana (K_o – współczynnik obsługiwanie).

Zaznaczyć należy, że zachodzi następująca relacja:

$$K_d + K_{ou} + K_u + K_{oo} + K_o = K_d + K_{gt} + K_{oo} + K_o = 1$$

WNIOSKI

Reasumując rozpatrzone zagadnienia dotyczące wybranych modeli stochastycznych do opisu zmian procesów eksploatacji pojazdów mechanicznych można stwierdzić, co następuje:

- 1) proces eksploatacji pojazdów mechanicznych można traktować jako łańcuchy Markowa, tzn. dyskretne w stanach i czasie;
- 2) pełniejszą informację o procesach eksploatacji pojazdów mechanicznych można uzyskać traktując je jako procesy dyskretne w stanach i ciągle w czasie;
- 3) proces semi-Markowa lepiej opisuje procesy eksploatacji pojazdów mechanicznych niż proces Markowa, ponieważ czasy przebywania procesu w stanach jako zmienne losowe mogą mieć rozkłady dowolne, a nie tylko wykładnicze.

LITERATURA

1. Fisz M.: Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna. PWN, Warszawa 1967.
2. Grabowski F.: Teoria semi-markowskich procesów eksploatacji obiektów technicznych. Z. N. 75A. Wyższa Szkoła Marynarki Wojennej, Gdynia 1982.
3. Koźniewska I., Włodarczyk M.: Modele odnowy niezawodności i masowej obsługi. PWN, Warszawa 1978.
4. Niziński S., Wierzbicki S., Ligier K.: Model matematyczny procesu eksploatacji pojazdów mechanicznych. WITPIS, Sulejówek 2002.

5. Rosenblatt M.: Procesy stochastyczne PWN, Warszawa 1969.
6. Rozanow J. A.: Wstęp do teorii procesów stochastycznych. PWN, Warszawa 1974.
7. Woropay M., Knopik L., Landowski B.: Modelowanie procesów eksploatacji w systemie transportowym. Biblioteka Problemów Eksploatacji. ITE, Bydgoszcz-Radom 2001.



Dr inż. **Sławomir Wierzbicki** absolwent Wydziału Mechanicznego ART w Olsztynie. Obecnie jest adiunktem w Katedrze Eksploatacji Pojazdów i Maszyn na Wydziale Nauk Technicznych, UWM w Olsztynie. W pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami eksploatacji pojazdów i maszyn

Stanisław Niziński – informacja o autorze na stronie 30.

ZASTOSOWANIE MODELI ODWROTNYCH DO DIAGNOZOWANIA STANÓW UTRATY CHŁODZENIA W REAKTORACH JĄDROWYCH TYPU WRZĄCEGO

Marcin BEDNARSKI*, Wojciech CHOLEWA*, Wiktor FRID**

*Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Śląska
ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice, Polska
E-mail: {mbednarski; wcholewa}@kpk.mt.polsl.gliwice.pl

** Department of Nuclear Reactor Engineering, Royal Institute of Technology,
Brinellvägen 60, SE-100 44 Stockholm, Sweden
E-mail: wiktork@egi.kth.se

Streszczenie

Celem referatu jest pokazanie przykładu zastosowania odwrotnych modeli diagnostycznych. Zapobieganie wypadkom w elektrowniach jądrowych, w szczególności przypadkom uszkodzenia rdzenia, gdzie ryzyko uwolnienia produktów radioaktywnych jest największe, jest sprawą priorytetową dla bezpieczeństwa. W celu analizy potencjalnie możliwych wypadków, jak również w celu ich zapobiegania oraz zarządzania nimi, stworzono wiele programów symulacyjnych oraz systemów wspomagających podejmowanie decyzji (Computerized Decision Support Systems – CDSS [4][5]) przez operatorów. Bazują one na metodach deterministycznych i probabilistycznych. W przypadku reaktorów jądrowych rozwój szybkich narzędzi symulacyjnych daje możliwość zastosowania metod diagnostycznych bazujących na przykładach. Przedstawione tutaj lokalne modele odwrotne są przykładem takiego właśnie podejścia.

Słowa kluczowe: modele odwrotne, reaktor jądrowy

APPLICATION OF INVERSE MODELS TO DIAGNOSTICS OF LOSS OF COOLANT ACCIDENTS IN BOILING WATER NUCLEAR REACTORS

Summary

Aim of this paper is to present example of application inverse diagnostic models. Accident prevention in nuclear plants, in particular in case of the core damage, where the risk of release radioactive products is the highest, is the priority cause for safety. In order to analyze potentially possible accidents and also to prevent and to manage them, a lot of simulation codes and Computerized Decision Support Systems (CDSS [6][7]) was implemented. They base on deterministic and probabilistic methods. In case of nuclear reactors, recent progress of very fast simulation tools opens possibility of applying case-based diagnostic methods. The method described in the paper, which uses local inverse models, is an example of such approach.

Key words: inverse models, nuclear reactor

1. ISTOTA DZIAŁANIA REAKTORÓW JĄDROWYCH

Elektrownia jądrowa, podobnie jak konwencjonalna elektrownia cieplna wytwarza energię elektryczną zamieniając w turbinie, napędzającej generator, część energii zawartej w parze na energię mechaniczną (Rys.1). Różnica polega na tym, że ciepło potrzebne do wytworzenia pary uzyskuje się nie ze spalania paliw organicznych a z reakcji rozszczepienia jąder uranu lub plutonu. Reaktor jądrowy jest zatem odpowiednikiem kotła w elektrowni konwencjonalnej. [10]

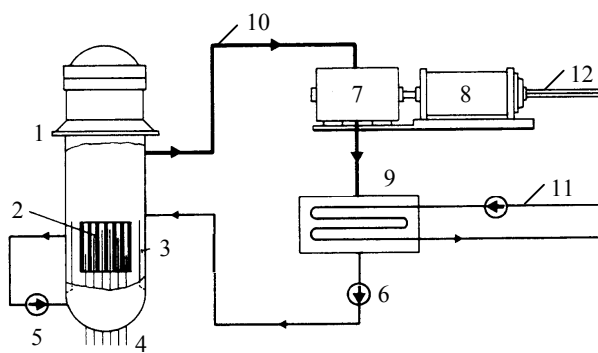
Obudowa bezpieczeństwa jest szczelnym budynkiem otaczającym reaktor i podstawowe układy. Spełnia ona wiele ważnych funkcji podczas normalnej pracy oraz podczas nieprzewidzianych

wypadków. Jej zadaniem jest zapobieganie wydostawaniu się substancji radioaktywnych w przypadku awarii. Obudowa ma także na celu ochronę reaktora przed czynnikami zewnętrznymi [10]. Rys.8 przedstawia schemat takiej obudowy.

2. MODEL ODWROTNY

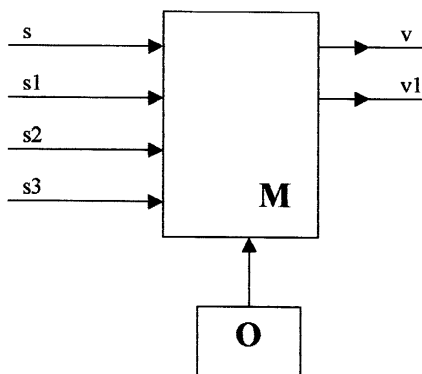
Na obecnym etapie rozwoju komputerowych systemów, wspomagających diagnostykę maszyn i procesów, wyłoniła się pilna potrzeba opracowania skutecznych ogólnych algorytmów, pozwalających na identyfikację relacji diagnostycznych będących podstawą określania reguł, tworzących bazy wiedzy diagnostycznych systemów doradczych. Reguły takie mają wskazywać możliwe przyczyny obserwowanych skutków. Niestety, często brak jest

dokładnej wiedzy diagnostycznej oraz niezawodnych jej źródeł.



Rys. 1. Schemat reaktora typu BWR (Boiling Water Reactor): 1 – Zbiornik reaktora, 2 – Rdzeń, 3 – Dolna komora, 4 – Pręty regulacyjne, 5 – Główne pompy recyrkulacyjne, 6 – Pompa obiegu wodnego, 7 – Turbina, 8 – Generator, 9 – Kondensator pary, 10 – Para, 11 – Woda chłodząca, 12 – Energia elektryczna. [10]

Nową zaproponowaną w [5] metodą identyfikacji relacji diagnostycznych, stosowanych do określania reguł w diagnostycznych systemach doradczych jest odwracanie numerycznych modeli rozpatrywanych obiektów technicznych.



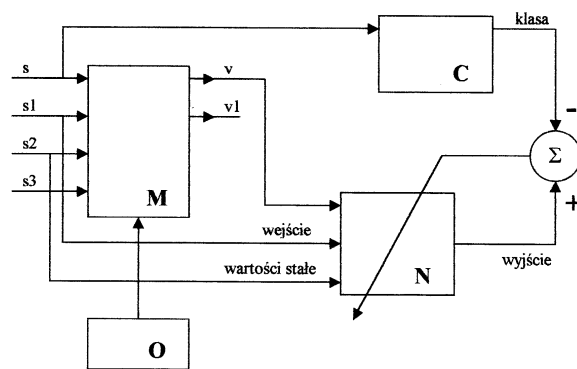
Rys. 2. Model M określony dla obiektu O [3]

- s – wartości poszukiwane
- s1 – znane wartości zmienne określające warunki działania obiektu
- s2 – znane wartości stałe
- s3 – wartości trudne do oszacowania i pomiaru
- v – znane wartości, będące skutkiem działania obiektu
- v1 – nieznane lub pomijane wartości, będące skutkiem działania obiektu

Koncepcja odwracania modeli opiera się na założeniu, że znany jest model numeryczny M

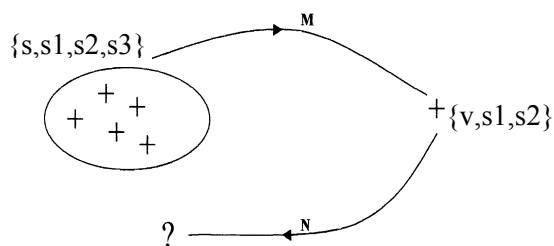
(rys.2), który pozwala na wyznaczenie wartości wyjść $\{v, v1\}$ dla zadanego zbioru wejść $\{s, s1, s2, s3\}$.

Model M opisuje relację przyczynowo-skutkową pomiędzy wejściami – przyczynami $\{s, s1, s2, s3\}$, a wyjściami – skutkami $\{v, v1\}$. W wyniku odwracania modelu M (rys.3) chcemy otrzymać model odwrotny N, który pozwoli na wyznaczenie nieznanych poszukiwanych wartości $\{s\}$, na podstawie znanych, otrzymanych w wyniku pomiaru lub symulacji wartości $\{v, s1\}$. [3]



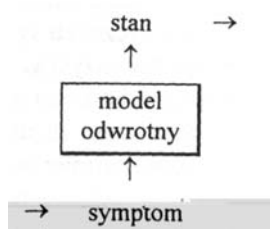
Rys. 3. Wyznaczanie modelu odwrotnego N z zastosowaniem klasyfikatora [3]

Z punktu widzenia relacji przyczynowo-skutkowych wartości $\{s, s1, s2, *\}$ opisują wyłącznie wybrane przyczyny, a wartości $\{v, *\}$ wybrane ich skutki. Na podstawie tego można przypuszczać, że dokładny model odwrotny nie istnieje (zadanie może nie posiadać rozwiązania – rys.4). Dlatego ograniczamy dokładność poszukiwanego modelu odwrotnego, zakładając, że będzie on wyznaczał jedynie klasy wartości parametru v. [3]



Rys. 4. Brak rozwiązania dla zadania odwracania modelu [3]

Wyjściową fazą badań jest budowanie złożonych, numerycznych modeli symulacyjnych, pozwalających na generowanie sygnałów odpowiadających złożonym stanom technicznym obiektu. Modele te weryfikowane są na obiektach rzeczywistych oraz na stanowiskach laboratoryjnych. Na podstawie zweryfikowanych modeli wyznaczane są następnie modele odwrotne, reprezentujące poszukiwane relacje diagnostyczne, przekształcające symptomy diagnostyczne w klasy stanów technicznych (rys.5) [2][3].



Rys.5. Istota modelu odwrotnego [3]

Prostym sposobem wyznaczenia modeli odwrotnych jest zastosowanie algorytmów interpolacyjnych pozwalających na wyznaczenie przybliżonej wartości $\hat{y}(x)$ funkcji $y(x)$ dla dowolnego argumentu x , na podstawie przykładów wartości tej funkcji [3],

$$\{y(x_p) : x_p \in X_p\} \quad (1)$$

znanych dla skończonego zbioru przykładów wartości argumentów,

$$X_p = \{x_p\} \quad (2)$$

2.1. Algorytmy odwracania modeli

W [3] i [4] zaproponowano kilka klas algorytmów, które mogą być zastosowane do odwracania modeli numerycznych. Przykłady algorytmów reprezentujących te klasy oznaczono symbolami W11, W12, W13. Należy podkreślić, że algorytmy te są jedynie przykładami bardzo licznego zbioru algorytmów szczegółowych.

• Algorytm W11

Wartości funkcji $y(x)$ dla dowolnego x wyznaczone są jako średnie ważone znanych przykładów wartości funkcji,

$$y(x) = \frac{\sum_{x_i \in \varepsilon(x)} v(x, x_i) y(x_i)}{\sum_{x_i \in \varepsilon(x)} v(x, x_i)} \quad (3)$$

gdzie $\varepsilon(x)$ jest ograniczonym otoczeniem punktu (elementu) x w przestrzeni wartości argumentów funkcji $y(x)$ oraz gdzie funkcja $v(x, x_i)$ jest funkcją wagi, której wartości zmniejszają się w miarę oddalania się od punktu x , np. (rys.6) [3].

$$v(x, x_i) = \exp(-ad^b(x, x_i)) \quad (4)$$

• Algorytm W12

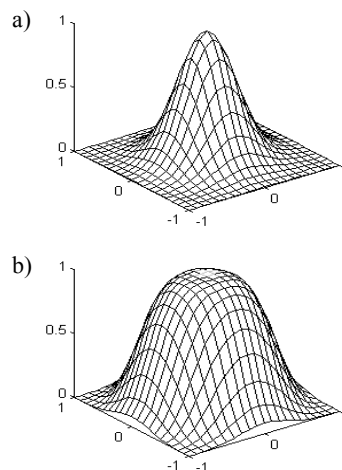
Algorytm ten polega na wyznaczeniu modelu lokalnego, liniowego ze względu na współczynniki, identyfikowanego w bezpośrednim otoczeniu wyróżnionego punktu, dla którego poszukiwany jest ten model. Identyfikacja takiego modelu lokalnego

następuje na podstawie odpowiedniej liczby najbliższych sąsiadów wyróżnionego punktu (rys.7) [3].

• Algorytm W13

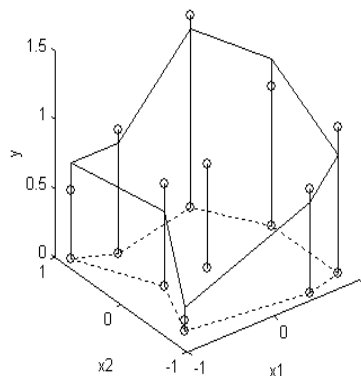
Jest modyfikacją algorytmu W12. W algorytmie tym wprowadzono dodatkową funkcję oceniającą stopień ważności danych w celu zwiększenia wpływu bezpośrednich sąsiadów [3]. Funkcja ta może występować w różnych wersjach:

- przyjmuje stałe wartości 1
- zależy od odległości elementów i przyjmuje wartość maksymalną dla zerowej odległości elementów (rys.6).



Rys.6. Przykład funkcji wagi (4) w dwu wymiarowej przestrzeni.

a) $a=10$. b) $a=10$. b=2



Rys.7. Identyfikacja lokalnego modelu liniowego

3. DIAGNOSTYKA STANÓW UTRATY CHŁODZENIA

Stany (wypadki) utraty chłodzenia w reaktorach jądrowych oznaczane są terminem LOCA (loss of coolant accidents)

Wyznaczenie modelu odwrotnego do diagnostyki wypadków utraty chłodzenia wymagało wykonania następujących kroków:

- Analiza obiektu i wybór rozpatrywanych trenujących i testujących sekwencji zdarzeń.

- Analiza obiektu i wybór najlepszych sygnałów diagnostycznych, gdzie założono, że wybór sygnałów powinien być połączony z wyborem odpowiednich cech tych sygnałów.
- Symulacja wybranych sekwencji trenujących i testujących w ramach eksperymentu numerycznego.
- Odwracanie i testowanie modelu.

3.1. Wybór sekwencji trenujących i testujących

Przyjęto, że zbiór rozpatrywanych sekwencji dla wypadków utraty chłodzenia reaktora jest iloczynem kartezyjskim następujących stanów elementarnych [1]:

- uszkodzenie rury wodnej (brak, małe, średnie, duże)
- uszkodzenie rury parowej (brak, małe, średnie, duże)
- przeciek przez przegrodę (mały, średni, duży)
- uszkodzenie systemów bezpieczeństwa (brak, uszkodzone 2 pompy z 4 – 50%, pełne uszkodzenie – 100%)

Wyboru powyższych stanów elementarnych dokonano w oparciu o:

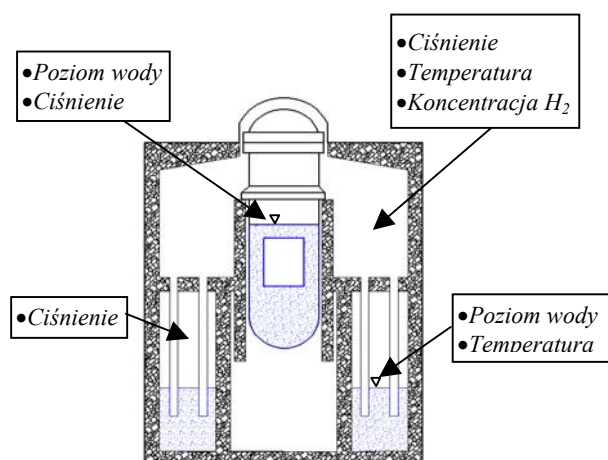
- analizy PSA (Probabilistic Safety Analysis) [8],
- rozmowy ze specjalistami w zakresie analizy PSA w elektrowni Forsmark,
- kryterium doboru zakresu ewentualnego zastosowania modelu,
- kryterium dotyczące bezpieczeństwa,

Zbiór rozpatrywanych sekwencji zawiera 36 sekwencji testujących i 12 sekwencji trenujących.

3.2. Sygnały diagnostyczne

Wybrane sygnały zostały przedstawione na rysunku 8.

Cechą sygnałów w każdym przypadku jest ich amplituda.



Rys.8. Schemat obudowy bezpieczeństwa z naniesioną lokalizacją źródeł sygnałów [1]

3.3. Symulacja sekwencji trenujących i testujących

Symulacje sekwencji przeprowadzono stosując program MAAP4 (Modular Accident Analysis Program)[9], który został stworzony przez FAI (Fauske & Associates, Inc.).

W wyniku symulacji otrzymano przebiegi 8 sygnałów (rys.8) w dziedzinie czasu (0-4000s) dla każdej z 36 sekwencji trenujących (wzorcowych) i 12 sekwencji testujących, gdzie czas 0s określa chwilę zmiany stanu.

3.4. Modyfikacja cech sygnałów

Modyfikacji cech sygnałów dokonano w celu dodania informacji o historii sygnałów i redukcji szumu. Polegała ona na:

- ograniczeniu rozpatrywanych danych do okresu od 0 do 300s,
- przekształceniu danych, w celu uzyskania stałej częstotliwości próbkowania 0,2 Hz, realizowanym za pomocą algorytmu interpolacyjnego bazującego na funkcjach sklepanych (spline functions),
- uzupełnieniu nowych danych przez dopisanie na początku każdego ciągu odpowiedniego ciągu dodatkowych wartości stałych, poprzedzających zmianę stanu i odpowiadających wartości początkowej, o długości 100s (ostatecznie rozpatrywany jest odcinek czasu od -100s do 300s).
- dla każdej sekwencji zbiór rozpatrywanych (zmodyfikowanych) danych (8 cech sygnałów) uzupełniony został o wartości będące nośnikami informacji o historii zmian, otrzymane w wyniku całkowania sygnałów wg wzoru (5)

$$y(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) d\tau \quad (5)$$

gdzie:

$$T=250s$$

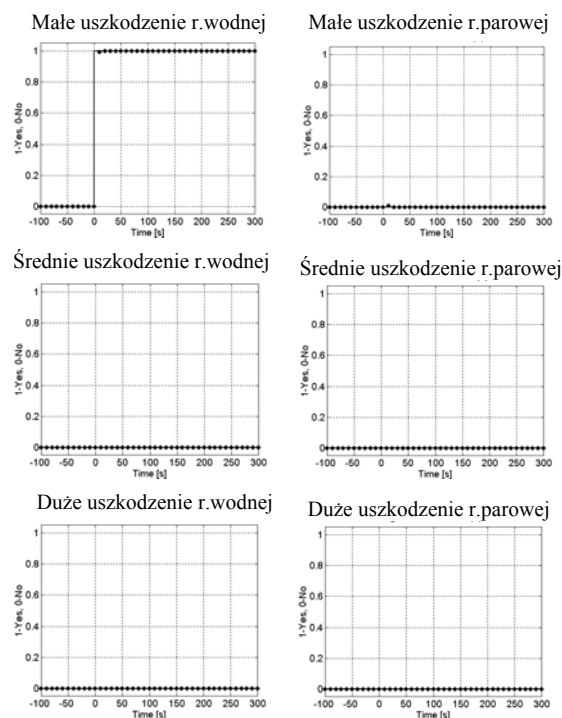
$x(\tau)$ – zmodyfikowany sygnał.

W wyniku opisanych działań otrzymano sekwencje zawierające po 16 cech sygnałów.

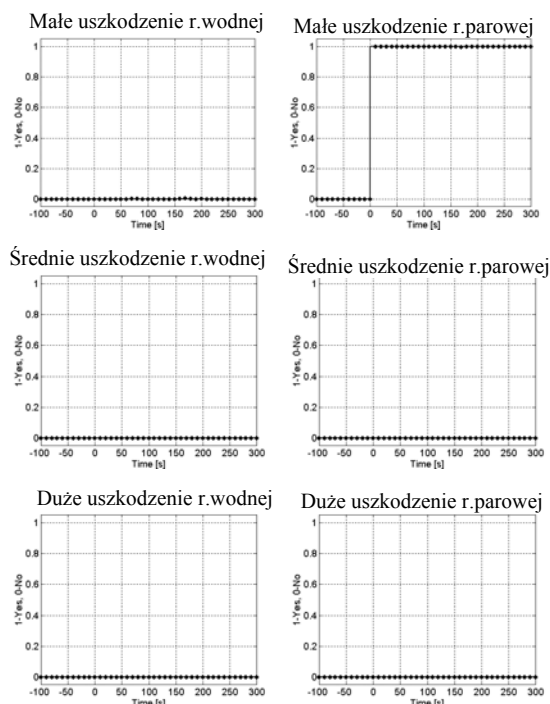
3.5. Testowanie modelu odwrotnego

Omawiany model został tak wyznaczony aby wyjściem były wartości logiczne, które reprezentują występowanie uszkodzenia (0 – oznacza NIE, uszkodzenia nie wystąpiło; 1 – oznacza TAK, uszkodzenie wystąpiło).

Przykłady wybranych wyników dla symulowanych uszkodzeń rury wodnej lub parowej zostały przedstawione na rys.9 i rys.10 Linie ciągłe obrazują wartości oczekiwane, natomiast '♦' przedstawiają wartości wyjścia z modelu odwrotnego.



Rys.9. Przykład wyników dla sekwencji 'małe uszkodzenie rury wodnej' [1]

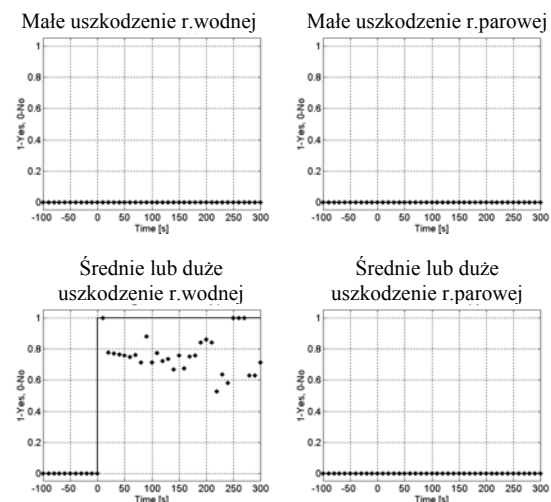


Rys.10. Przykład wyników dla sekwencji 'małe uszkodzenie rury parowej' [1]

Z wykresów widać, że możliwe jest bezbłędne rozpoznanie rodzaju symulowanego uszkodzenia (uszkodzenie rury wodnej lub parowej) i jego wielkości (małe uszkodzenie).

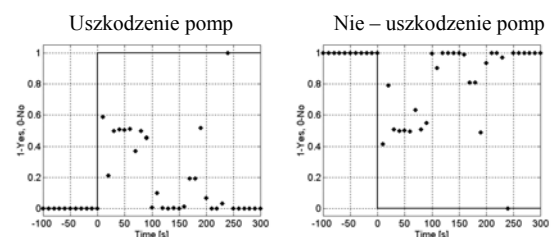
Następny przykład przedstawia wybrane wyniki dla symulowanego uszkodzenia rury wodnej (rys.11), gdzie wielkość uszkodzenia została

przyjęta blisko granicy klas (pomiędzy średnim lub dużym). Model odwrotny konsekwentnie klasyfikuje je błędnie do jednej klasy. Uznano, że sytuacja ta spowodowana jest tym, iż nie przedstawiono modelowi przykładów (danych wzorcowych) z rozpatrywanego w czasie testowania przedziału. W celu uzasadnienia tego przypuszczenia przedstawiono wykres, na którym wprowadzono zamiast dwóch klas – średnie i duże uszkodzenie, jedną klasę – średnie lub duże uszkodzenie rury wodnej. Dane te są poprawnie klasyfikowane.



Rys.11. Przykład wyników dla sekwencji 'średnie lub duże uszkodzenie rury wodnej' [1]

Ostatni przykład (rys.12) przedstawia wyniki symulacji uszkodzenia 2 pomp w systemach bezpieczeństwa. Model nie potrafi rozpoznać uszkodzenia pomp, gdyż objawy takiego uszkodzenia są bardzo podobne do przypadku gdzie wszystkie pompy są sprawne. Jest to związane z faktem, że systemy bezpieczeństwa zbudowane są tak aby uszkodzenie jednego bądź kilku komponentów (elementy nadmiarowe) nie prowadziło do awarii, gdzie skutkiem byłaby utrata chłodzenia rdzenia, co w rezultacie prowadziłoby do uwolnienia produktów radioaktywnych. W tym przypadku dwa obiegi systemów bezpieczeństwa (dwie działające pompy z czterech pomp zainstalowanych) są w stanie poradzić sobie z awarią utraty chłodzenia (program MAAP4 symuluje takie przypadki).



Rys.12. Przykład wyników dla sekwencji 'uszkodzenie pomp' [1]

4. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonego eksperymentu odwracania modeli numerycznych w zastosowaniu do reaktora jądrowego uzyskano zadowalające rezultaty, uzasadniające celowość dalszego badania i rozwoju tych algorytmów w tym zakresie.

Możliwość zastosowania odwrotnych modeli numerycznych jest ściśle związana z rozwojem programów symulacyjnych. W przypadku reaktorów jądrowych ta dziedzina jest bardzo szeroko rozwinięta, co pozwala na wyznaczanie modeli odwrotnych.

Zastosowanie modeli odwrotnych wymaga dużego nakładu mocy obliczeniowej, zarówno do generowania danych uczących (program symulujący obiekt) jak i do procesu odwracania modelu obiektu. Na obecnym etapie rozwoju komputerów jest to jednak coraz mniejszym problemem.

Otrzymane wyniki wskazują na poprawność zastosowania odwrotnych modeli diagnostycznych i wyznaczają drogę dalszego rozwoju tego typu systemów. Pozwala to przypuszczać, że w przyszłości będzie istnieć możliwość wdrożenia tych systemów do zastosowań w dziedzinie przemysłu jądrowego.

5. LITERATURA

- [1] Bednarski M.: *Application of inverse models in the diagnostics of nuclear reactors*. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska, Gliwice i Royal Institute of Technology, Stockholm, 2001.
- [2] Cholewa W.: *Genetic Approach to Inverse Diagnostic Modelling*. PPAM'99, Kazimierz Dolny, 1999, Proceedings 510-524.
- [3] Cholewa W., Kiciński J.: *Diagnostyka techniczna. Odwrotne modele diagnostyczne*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
- [4] Cholewa W., Kiciński J.: *Diagnostyka techniczna. Metody odwracania nieliniowych modeli obiektów*. Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn – Politechnika Śląska. Zeszyt 120. Gliwice 2001.
- [5] Cholewa W., White M. F.: *Inverse modelling in rotordynamics for identification of unbalance distribution*. Machine Vibration. (1993).
- [6] Frid W.: *Nuclear power plant safety assessment and accident management: Practice in Sweden and computerized decision support systems*. Journal of Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, Vol.9, No.1, 2002.
- [7] Frid W.: *Some Examples of Recent Developments in Computerised Systems for Plant Status Assessment and Accident Management*. KARNTEKNIK 2000. Arlandia, 29–30 November 2000.
- [8] Hauptmanns U., Werner W.: *Engineering Risks*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1991.
- [9] *Modular Accident Analysis Program MAAP4*: www.maap4.com.
- [10] Pershagen B.: *Light Water Reactor Safety*. Pergamon Press, 1996.



Marcin Bednarski ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej w 2001 roku uzyskując stopień magistra w zakresie mechaniki i budowy maszyn. W tym samym roku rozpoczął dzienne studia doktoranckie w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn na wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej. Obecnie prowadzi badania dotyczące systemów doradczych opartych na sieciach bayesowskich.



Wojciech Cholewa jest profesorem zwyczajnym w Politechnice Śląskiej, gdzie kieruje Katedrą Podstaw Konstrukcji Maszyn. Jego zainteresowania badawcze związane są z budową i eksploatacją maszyn i dotyczą diagnostyki technicznej oraz zastosowań metod i technik

sztucznej inteligencji w systemach diagnostycznych i monitorujących. Jest autorem publikacji omawiających metody analizy sygnałów, metody wnioskowania przybliżonego i reprezentacji wiedzy przybliżonej oraz dynamiczne systemy doradcze. Opracował wiele zastosowań informatyki w diagnostyce technicznej. Wypromował dziewięciu doktorów nauk technicznych.



Dr Wiktor Frid jest profesorem w Instytucie Inżynierii Reaktorów Jądrowych w Królewskim Uniwersytecie Technicznym w Sztokholmie. Pracuje również w Szwedzkim Inspektoracie Energii Jądrowej, gdzie zajmuje się zarządzaniem wypadkami i prowadzi związane z tym badania.

Był kierownikiem wieloletniego skandynawskiego projektu badawczego zajmującego się porównaniem metod i rozwojem oprogramowania stosowanego do analizy bezpieczeństwa reaktorów jądrowych. Koordynował projekt SARA (Severe Accident Recriticality Analyses) objęty 4-tym Programem Ramowym Unii Europejskiej.

PRZYKŁADY SPEKTROGRAMÓW JTFA ZAREJESTROWANYCH W WYBRANYCH WARUNKACH PRACY HOMOGENIZATORA CIŚNIENIOWEGO

Krzysztof ŁUKASIK

Wydział Mechaniczny, Katedra Obróbki Plastycznej
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36, fax (81) 5381241

Streszczenie

W pracy przedstawiono spektrogramy wybranych przypadków zarejestrowanych podczas badań wibroakustycznych systemu zaworu homogenizatora wysokociśnieniowego. Zarejestrowane drgania przetworzono wykorzystując normalną i krótkoczasową transformatę Fouriera. Badania miały na celu rozpoznania jego charakterystyk wibracyjnych jednocześnie w dziedzinach czasu i częstotliwości (JTFA). Obserwowano zmiany spektrogramów w zależności od wybranych czynników i warunków pracy homogenizatorów.

Słowa kluczowe: analiza JTFA, diagnostyka wibracyjna, homogenizatory

A SAMPLE OF JTFA SPECTROGRAMS REGISTERED IN SELECTED OPERATING CONDITIONS OF PRESSURE HOMOGENIZERS

Summary

Sample vibration spectrograms of high pressure homogenizing valve system are presented in this paper. Registered vibrations were performed by normal and short time Fast Fourier transformation. The results - spectrograms were aimed at both recognizing their vibration characteristics in time and frequency domain simultaneously (JTFA). A spectrograms change in dependency of selected parameters and homogenisers operating conditions were observed.

Key words: JTFA analysis, vibration diagnosis, homogenizers

1. WSTĘP

Zastosowanie tradycyjnych metod analizy spektralnej bazujących na transformacie Fourierskiej umożliwia dobre opisanie przypadków w których generowany jest ciąg stacjonarnych lub pseudostacjonarnych sygnałów. Metoda ta nie daje bezpośredniej możliwości analizy procesów szybkozmiennych lub krótkotrwałych, co wynika z założenia, że przekształcany sygnał jest periodyczny i ma nieskończoną długość. Również analiza w wąskich pasmach charakterystycznych zakresów częstotliwości nie daje pewności, a często także i możliwości rozpoznania określonych zjawisk [1,4,5,6]. Ponadto wymaga stosowania złożonych filtrów pasmowych, jest czasochłonna, a w przypadku zmiany częstotliwości drgań w funkcji czasu jest najczęściej zawodna.

W praktyce spotyka się wiele przypadków wymagających obserwacji zmian sygnałów wibroakustycznych jednocześnie w dziedzinie czasu i częstotliwości. Drgania generowane podczas pracy homogenizatora ciśnieniowego w dużym stopniu są drganiami z określonymi i ustalonymi w czasie przedziałami zmienności ich intensywności. Jednakże zmienność warunków przepływowych wywołanych drganiami grzybka zaworu, pulsacjami ciśnienia niejednokrotnie prowadzi do generowania ciągów krótkotrwałych drgań, które w wielu

przypadkach związane mogą być ze zmianą częstotliwości. Istotny jest w tych przypadkach moment ich powstania jak i charakterystyka dalszej ewolucji. Szczególną przydatnością w badaniu takich przypadków charakteryzują się spektrogramy wyznaczone metodami JTFA.

2. KRÓTKIE PORÓWNANIE RÓŻNYCH METOD ANALIZY JTFA

Na przestrzeni ostatnich lat znacząco zostały udoskonalone sposoby badania złożonych sygnałów wibroakustycznych w połączonych dziedzinach czasu i częstotliwości określane jako analiza (JTFA – *Joint Tim-Frequency Analysis*). Aktualnie dostępnych jest szereg różnych metod analizy JTFA, których opisy podaje specjalistyczna literatura [2,3,8]. Każda z nich charakteryzuje się szeregiem zalet i wad, które predestynują ją w mniejszym lub większym stopniu do określonych zastosowań. Ogólną charakterystykę wybranych metod przedstawiono w tablicy 1. Wynika z niej, że przed wyborem metody wymagane jest przeprowadzenie porównania wymogów (dotyczących rozdzielczości i szybkości analizy) z jej możliwościami. Zastosowana w pracy metoda STFT (*Short Time Fast Fourier transformation*) charakteryzuje się największą szybkością przetwarzania, przy gorszej od pozostałych rozdzielczości. Jej zaletą jest

brak efektów skrośnych, które mogą w pewnych sytuacjach zniekształcić analizę przy użyciu pozostałych metod. Eliminacja tych efektów związana jest z koniecznością podejmowania

dotychczasowych działań w celu ich eliminacji. Problem ten w najmniejszym stopniu dotyczy rozwinięcia Gabora charakteryzującego się dobrą rozdzielczością przy mniejszej szybkości przetwarzania.

Tablica 1. Porównanie właściwości różnych metod analizy JTFA

Metoda	Algorytm	Rozdzielczość	Szybkość
STFT Spektrogram	Transformata Fouriera w lokalnym oknie	Zależna od wyboru okna. Dobra w dziedzinie czasu lub częstotliwości	Szybka
WVD (<i>Wigner-Ville Distribution</i>)	Globalny rozkład Wigner-Ville	Dobra rozdzielczość w dziedzinie czasu i częstotliwości	Szybka
GABOR Spektrogram	Rozwinięcie Gabora	Dobra rozdzielczość w dziedzinie czasu i częstotliwości	Średnia
CSD (<i>Cone-Shape distribution</i>)	Wygładzony rozkład Wigner-Ville	Dobra rozdzielczość w dziedzinie czasu i częstotliwości	Bardzo wolna

3. BADANIE WYBRANYCH PRZYPADKÓW PRACY HOMOGENIZATORA METODĄ JTFA.

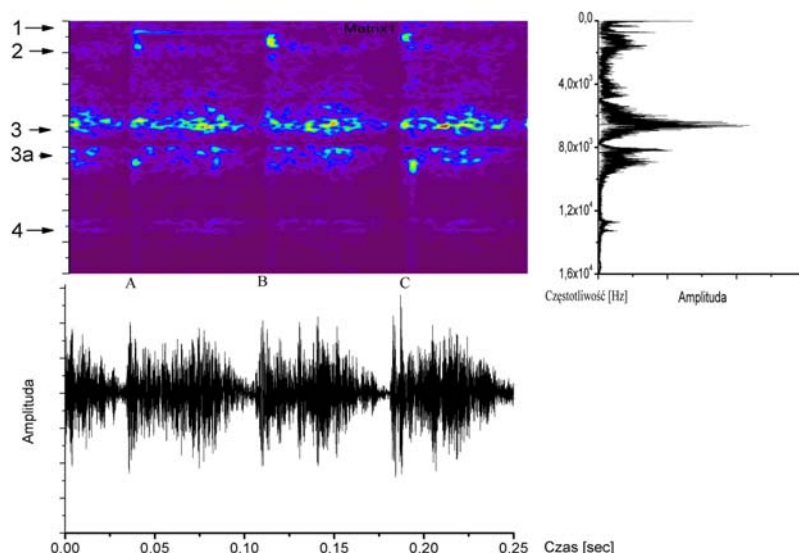
W celu otrzymania spektrogramów (JTFA) pracy homogenizatora ciśnieniowego zarejestrowano szereg drgań towarzyszących wybranym stanom zgodnie z opisaną w pracy [5] procedurą i poddano je przetworzeniu za pomocą dwóch różnych metod:

- normalnej FFT (*szybka transformata Fouriera*);
- metody STFT.

W przypadku pierwszej metody poddano obróbce całkowity sygnał zarejestrowany w czasie ok. 0,6 s, który pozwolił na uzyskanie typowego wykresu FFT pokazanego w prawej górnej części rys.1. Wykres ten daje ogólny pogląd o charakterystycznych częstotliwościach procesów wibracyjnych i ich intensywności. W przypadku

drugiej metody zarejestrowany ciąg drgań został podzielony na szereg wycinków czasowych (*okien*) o dobranej szerokości, które kolejno przetwarzano. Poszczególne wycinki czasowe poddawano obróbce (*Fourier transformation*), a wyniki zapisywano w postaci matrycy, której wiersze odpowiadają czasowi, a kolumny częstotliwości. Uzyskany w ten sposób spektrogram przedstawiono w lewej górnej części rys.1. Amplitudę drgań reprezentuje kolor. Możliwe jest także przedstawienie spektrogramu w układzie przestrzennym, bardziej plastycznym lecz jednocześnie mniej czytelnym.

W zależności od rodzaju przetwarzanego surowca, parametrów technologicznych pracy urządzenia (ciśnienia homogenizacji, ciśnienia zasilania, temperatury homogenizowanego medium), jego stanu technicznego obserwuje się określone zmiany w rejestrowanych spektrogramach.



Rys.1. Spektrogram pracy homogenizatora ciśnieniowego ($P_h=5\text{MPa}$) podczas homogenizacji soku z marchwi, przy wykorzystaniu zaworu stożkowego. W dolnej części przedstawiono nieobrobiony sygnał, w górnej prawej widmo Fouriera

W dolnej części rys.1. pokazano wykres nieprzetworzonego sygnału w identycznej skali czasu z pokazanym wyżej spektrogramem JTFA. Wzajemne relacje pomiędzy nimi pozwalają na śledzenie zmiany charakterystyk i kinetyki przebiegu rozpoznanych zjawisk. Widoczne na rysunku obszary oznaczone A,B,C odpowiadają momentom chwilowych zamknięć zaworu głównego spowodowanych spadkiem ciśnienia podawanego przez pompę medium, co przejawia się zanikiem wibracji w prawie całym zakresie rejestrowanych drgań na skutek zbliżenia grzybka zaworu do jego gniazda. Czasami obserwuje się bezpośredni kontakt elementów, co jest przejawem szczególnie niebezpiecznych stanów pracy urządzenia. Wyróżnione na rys.1 punkty oznaczone liczbowo odpowiadają częstotliwościom drgań ruchomych elementów homogenizatora, jak również są wynikiem procesów przepływowych.

Linia 1 związana jest z drganiami grzybków zaworów rozdzielających i na przedstawionym spektrogramie obserwuje się drganie jednego z grzybków w całym okresie jego uchylania, co świadczy o niewłaściwym doborze charakterystyki sprężyny podpierającej, lub zbyt dużym luzie poprzecznym w układzie prowadzenia zaworu [8].

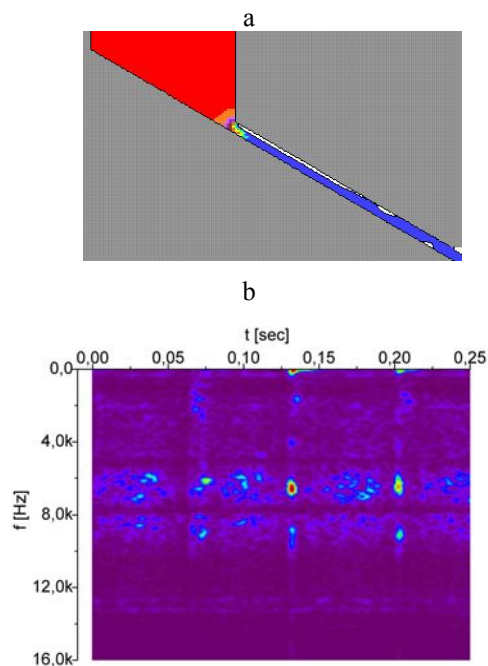
Linia 2 odpowiada drganiom grzybka zaworu głównego. Widoczne krótkotrwałe (punktowe) okresy nasilenia drgań po okresach zamknięcia przepływu wywołanego gwałtownym spadkiem ciśnienia podawanego przez pompę. Taki obraz drgań często jest obserwowany podczas homogenizacji cieczy o niskiej lepkości (mleko). Nie jest on korzystny dla trwałości zaworów i wyklucza zastosowanie materiałów ceramicznych.

Linia 3 odpowiada uderzeniu płynu o ścianki kanału odpływowego po wypływie ze szczeliny zaworu homogenizującego. Widoczne jest nasilenie intensywności procesu w środkowej części każdego z okresów, co odpowiada maksymalnemu uchyleniu grzybka zaworu.

Linie 3a zidentyfikowano jako drgania kawitacyjne powstające w końcowej (wyjściowej) strefie szczeliny zaworu. Proces kawitacji jest także przyczyną drgań odpowiadających linii 4. Związane są one z kawitacją powstającą za krawędzią rozdzielającą kanał dopływowy od zasadniczej szczeliny homogenizującej w początkowej (wejściowej) strefie zaworu. Powstanie jej w tym miejscu jest szczególnie niebezpieczne dla jego trwałości. Porównanie spektrogramów drgań zarejestrowanych przy różnych warunkach eksploatacyjnych i przy homogenizacji różnych mediów potwierdza zwiększanie się intensywności procesu ze wzrostem temperatury, zmniejszeniem lepkości homogenizowanej cieczy, zmniejszeniem ciśnienia w kanale ssącym. Wzrost ciśnienia homogenizacji nie prowadzi w przypadku nowego zaworu do zasadniczych zmian w obrazie akustycznym rys.2. Obserwuje się najczęściej zwiększenie natężenia drgań, oraz wzrost ich częstotliwości. Spowodowane jest to zmianą

charakterystyki elementu elastycznego (zwiększenie napięcia sprężyny zaworu głównego najczęściej prowadzące do zmiany jej podatności w wyniku odkształcenia sprężyn talerzowych), oraz wzrostem prędkości przepływu i nasileniem procesów hydrodynamicznych.

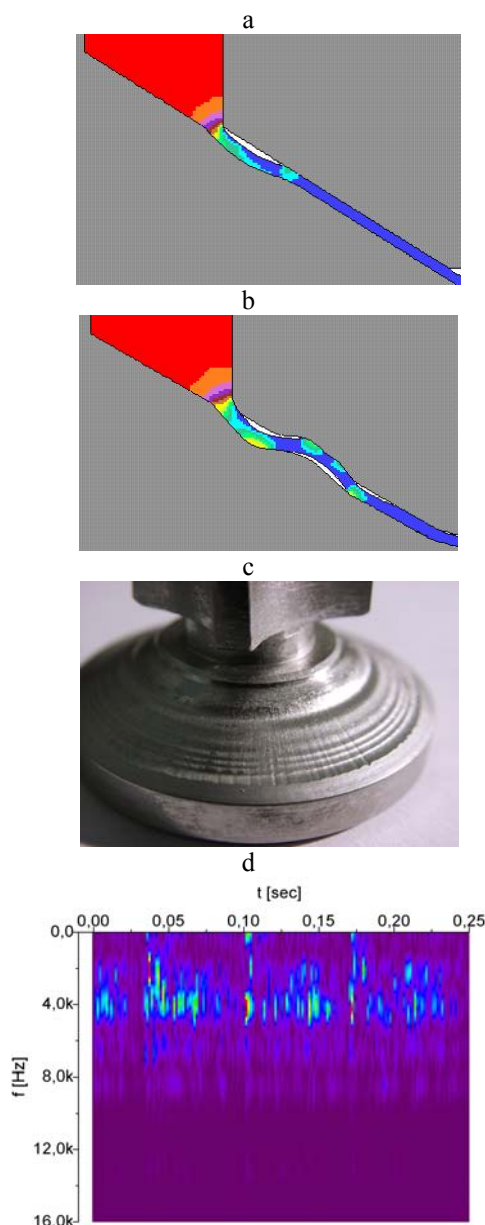
Przy pewnym doświadczeniu popartym identyfikacją zjawisk zachodzących podczas pracy urządzenia możliwe jest szybkie porównywanie ich między sobą. Możliwe jest także wnioskowanie o intensywności i charakterze obserwowanych procesów, konieczności podejmowania dalszych działań np. przerwania dalszej jego eksploatacji.



Rys.2. Zawór stożkowy klasyczny: a – rozkład ciśnienia podczas przepływu, b - spektrogram pracy homogenizatora ciśnieniowego podczas homogenizacji soku z marchwi przy ($P_h=16\text{MPa}$)

Zasadniczą zmianę obrazu spektralnego obserwuje się w przypadku zaworu z wyraźnymi śladami zużycia rys.3. Podczas pracy takiego zaworu obserwuje się zwiększanie (rozmycie) pasma częstotliwości drgań generowanych przez przepływające medium. W początkowej fazie obserwuje się powiększenie obszaru objętego kawitacją w strefie wejściowej szczeliny rys.3a. Dochodzi do pogłębiania stref zużycia erozji innych miejsc pojawienie się nowych obszarów objętych kawitacją rys.3b.

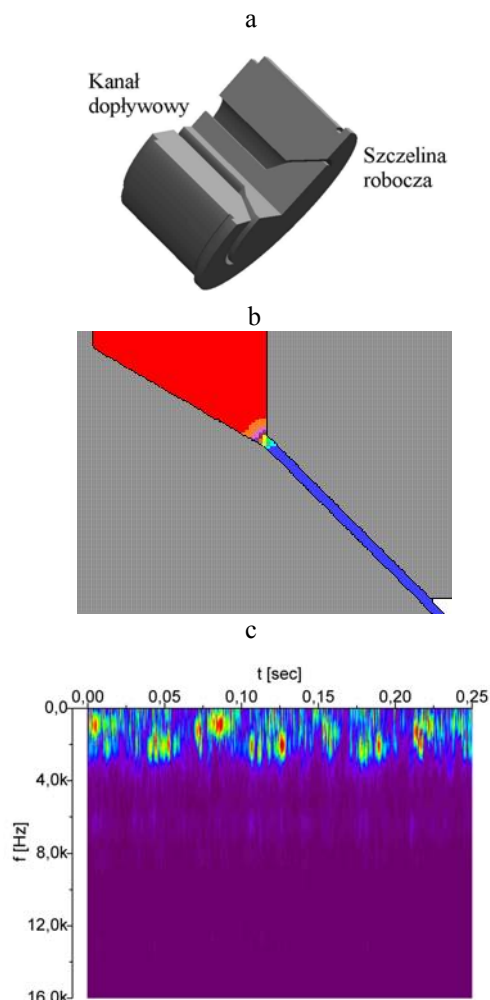
Stan ten jest wynikiem wpływu geometrii kanału przepływowego na intensywność i rodzaj procesów hydrodynamicznych na skutek wzrostu oporów przepływu. Nasila się nieregularność drgań, obniża się ich częstotliwość, wzrasta amplituda. Identyfikacja poszczególnych procesów i zjawisk staje się bardzo trudna. Doprowadzenie do takiego



Rys. 3. Przykład rozwoju zużycia zaworu stożkowego i jego wpływ na charakterystykę wibracyjną pracy homogenizatora: a, b – rozkład ciśnienia homogenizowanego medium podczas przepływu w początkowej i kolejnej fazie zużycia zaworu, c - fotografia grzybka zużytego zaworu, d - spektrogram podczas homogenizacji soku z marchwi przy ($P_h=16\text{MPa}$)

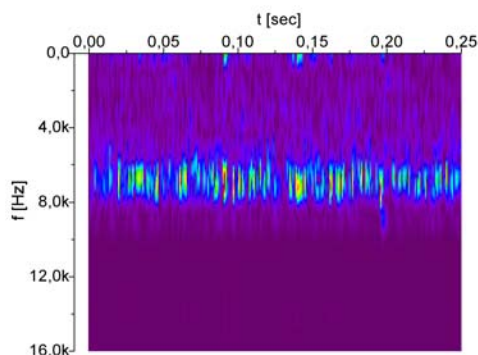
stanu związane jest ze spadkiem efektywności i jakości homogenizacji. Wskazane jest przerwanie jego dalszego stosowania. Jednakże brak elementów umożliwiających ciągłą ocenę jakości procesu homogenizacji prowadzi do nader częstego przedłużania eksploatacji nadmiernie zużytych zaworów. Zastosowanie nadzoru wibroakustycznego w tej sytuacji byłoby uzasadnione i pożądane.

Zmiany geometrii zaworu mające ograniczyć intensywność zużycia hydrościernego i erozji jego elementów przez cząsteczki stałe zawarte w homogenizowanych produktach prowadzą do istotnych zmian spektrogramów jego pracy. Wykorzystanie analizy spektralnej pozwala na ocenę wprowadzanych zmian pod kątem przeciwdziałania i zmniejszenia intensywności niepożądanych procesów (np. kavitacji). Przykładem jest zawór dwustożkowy zastosowany w miejsce zaworu typowego. Zmiana usytuowania kanału dopływowego względem szczeliny homogenizującej i kąta otwarcia zaworu prowadzi do wyraźnego wzrostu intensywności drgań w zakresie niskich częstotliwości – rys.4. Dotyczy to zarówno drgań zaworu głównego jak i drgań generowanych przez wypływający ze szczeliny płyn. Nie rejestruje się w tym przypadku w ogóle drgań kavitacyjnych ze strefy wejściowej szczeliny zaworu. Stwierdza się jedynie niewielką kavitację w strefie wyjściowej szczeliny zaworu.



Rys.4. Zawór dwustożkowy: a – szkic konstrukcji, b – rozkład ciśnienia podczas przepływu, c – spektrogram pracy podczas homogenizacji soku z marchwi przy ($P_h=16\text{MPa}$)

Potwierdzeniem tego faktu są przytoczone wyniki modelowania przepływu w tak ukształtowanym zaworze rys.4b. Intensywność procesów wibracyjnych świadczy o konieczności zmniejszenia kąta otwarcia szczeliny roboczej.



Rys.5. Spektrogram homogenizatora ciśnieniowego z nowym stożkowym zaworem homogenizującym podczas przepływu śmietany (18%) przy ciśnieniu ($P_h=11\text{MPa}$)

Cykliczność wypływu homogenizowanego medium ze szczeliny zaworu w tym przypadku jest praktycznie niezauważalna.

Rozproszenie i nieregularne rozmieszczenie obszarów świadczących o zwiększonej amplitudzie drgań przy różnych częstotliwościach dowodzi nieregularności drgań grzybka zaworu. Jest ona w głównej mierze spowodowana zbyt dużą podatnością sprężyny podpierającej w układzie regulacji ciśnienia.

Ze zwiększeniem gęstości homogenizowanego medium obserwuje się złagodzenie warunków pracy zaworu, co przejawia się zmniejszeniem intensywności drgań zaworów bloku rozdzielczego i zaworu głównego. Zwiększa się natomiast intensywność drgań generowanych wpływem homogenizowanego czynnika. Praktycznie nie rejestruje się w tym przypadku drgań w zakresach identyfikowanych ze zjawiskiem kawitacji. Brak jest także widocznych śladów pulsacyjnej pracy pompy.

4. PODSUMOWANIE

Tradycyjne metody analizy wibroakustycznej wykorzystujące metodę FFT niejednokrotnie zawodzą podczas badania szybkozmiennych procesów, oraz w przypadkach, gdy dochodzi do krótkotrwałych zmian częstotliwości drgań. W przypadku homogenizatorów ciśnieniowych obserwuje się cykliczne zmiany warunków pracy wywołane pulsacją ciśnienia podawanego przez pompę, drgania zaworów wywołujące zmianę warunków przepływu, zmiany spowodowane zużyciem itp. Przeprowadzone badania potwierdziły istotność zmian w dziedzinie czasu, natomiast nie wykazano zmian w dziedzinie częstotliwości. Wykorzystana w badaniach metoda JTFA pozwala

na szybsze uzyskanie pełniejszych wyników niż uzyskiwane metodą klasycznej transformaty Fouriera. Ponadto spektrogram w postaci jednego wykresu pełniej przedstawia wibroakustyczny obraz stanu określonego urządzenia, co jest korzystne z praktycznego punktu widzenia. Jego prawidłowa interpretacja wymaga zebrania dostatecznej ilości danych o prawidłowych i anormalnych stanach jego pracy. Przedstawione przykłady ilustrują jak znaczna jest ta zmienność i złożoność oceny jego pracy. Zaobserwowano, że zwiększenie trafności wnioskowania wymaga zwiększonej rozdzielczości w dziedzinie częstotliwości, przy dopuszczeniu zmniejszonej rozdzielczości w dziedzinie czasu.

5. LITERATURA

- [1] Cempel Cz.: Wibroakustyka stosowana. PWN Warszawa 1989, s. 278.
- [2] Cohen L.: Time-frequency distribution – a review. Proc. IEEE 77 1989, s. 941-981.
- [3] Kieldsen M., Arndt R.: Joint Time Frequency Analysis Techniques: a study of transitional dynamics in sheet/cloud cavitation, Cavitation 2001
- [4] Kurowski W.: Dyskretne widmo Fouriera w diagnostyce wibroakustycznej. DWiPPB Białystok 1997, s. 186.
- [5] Łukasik K.: Możliwości analizy wibroakustycznej i badań diagnostycznych systemu przepływowego zaworów homogenizujących. Diagnostyka. Vol 26 2002 s. 111-115
- [6] Norton M. P.: Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers. CUP Cambridge 1989, s. 619
- [7] Stinger J.D.: Hydraulic systems Analysis an introduction. The Macmillan Press Ltd. London 1976. s.173.
- [8] Quian S.; Chen D.: Joint Time-Frequency Analysis – Methods and Applications. Prentice-Hall Inc.; Upper Saddle River, New Jersey, 1996.



Dr inż. Krzysztof Łukasik jest pracownikiem Katedry Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej. W swojej pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami zużycia narzędzi, oprzyrządowania technologicznego, oraz wykorzystaniem technik komputerowych do detekcji i modelowania przebiegu procesów zużycia w obróbce plastycznej i przetwórstwie spożywczym.

BADANIA CHARAKTERYSTYK SYGNAŁÓW DIAGNOSTYCZNYCH

Izabela JÓZEFczyk, Waldemar KUROWSKI, Andrzej PANKOWSKI

Zakład Matematyki i Fizyki
Płocka Szkoła Nauk Technicznych i Społecznych
Płock 09 - 400 ul. Łukasiewicza 17
apan@us.us.plock.pl

Streszczenie

Sygnały diagnostyczne niosą zakodowane informacje o urządzeniach technicznych, które je wygenerowały. Aby odczytać te informacje, sygnał należy pobrać, przetworzyć A/C i odpowiednio obrobić. Komputery osobiste pozwalają na rachunkowe wyznaczenie charakterystyk sygnałów. Może to być widmo falkowe lub częstotliwościowe widmo wzajemne. Charakterystyki dyskretne wyznaczone na drodze numerycznej obróbki sygnału, różnią się od charakterystyk uzyskanych metodami analogowymi, pod względem wytwarzania i prezentacji informacji. Dla rozpoznania tych różnic zaproponowano eksperyment numeryczny na modelu symulacyjnym sygnału oraz eksperyment diagnostyczny na urządzeniu technicznym.

Słowa kluczowe: diagnostyka urządzeń technicznych, numeryczna obróbka sygnałów diagnostycznych.

THE STUDY ON CHARACTERISTIC OF DIAGNOSTIC SIGNALS

Summary

Diagnostic signals carry encoded information about technical objects that have the signal generated. To enable the message containing the information to be read out, the signal must be sampled and adequately processed. PC computers make possible the determining signal characteristics by calculation. These may be wavelet spectrum and frequency cross - spectrum. Discrete characteristics developed by digital signal processing are different from those of equivalent characteristics obtained by analog processing with regard to creation and presentation of encoded informations. Numerical experiments on simulation model of the diagnostic signal and diagnostic experiment on technical object are proposed in this paper to investigate this difference.

Key words: diagnostic of technical devices, numerical treatment of diagnostic signals

1. Wprowadzenie

Każde urządzenie techniczne jest wytwarzane w celu realizacji pewnego zadania eksploatacyjnego. Dla prawidłowego wytworzenia urządzenia i wykonania tego zadania, jest niezbędne posiadanie jakościowych i ilościowych informacji o własnościach i stanie technicznym urządzenia oraz zachodzących w nim procesach i związkach. Pozyskiwanie tych informacji jest zadaniem diagnostyki technicznej [4].

Nadane podczas wytwarzania urządzenia kształty, wymiary oraz wzajemne położenia elementów, a także luzy, które są niezbędne dla prawidłowego funkcjonowania par kinematycznych, są w zakresie tolerancji, wielkościami losowymi. Podobny charakter ma zużycie urządzenia oraz warunki eksploatacji. Te losowe odstępstwa od ideału, wprowadzone podczas wytwarzania oraz nabyte w czasie eksploatacji, zaburzają stany równowagi dynamicznej (mechanicznej, termicznej itp.) w funkcjonującym urządzeniu i powodują dodatkowe procesy i związki, towarzyszące procesowi użytkowemu. Są one na ogół „dawcami”

sygnałów diagnostycznych, które w praktyce mają postać realizacji czasowych, wybranych wielkości fizycznych.

Dla celów diagnostycznych, często wykorzystuje się sygnały wibroakustyczne. Są to realizacje czasowe zjawisk falowych, reprezentujących drgania mechaniczne i akustyczne. Zmienność w czasie tych sygnałów, z częstotliwością od kilku do kilkudziesięciu tysięcy Hz, zapewnia dużą zawartość informacji, a ich charakter fizyczny ułatwia badania urządzenia bez zakłócania procesu eksploatacyjnego [3, 4].

Czynniki losowe oraz zależności przyczynowo skutkowe między wymuszeniami na wejściu urządzenia, zjawiskami zachodzącymi w jego wnętrzu i objawami funkcjonowania na wyjściu, powodują, że sygnały diagnostyczne mają charakter stochastyczny i niosą poszukiwane informacje o własnościach i stanie technicznym urządzenia, a także o procesie użytkowym. Informacje o urządzeniu, zawarte w sygnale diagnostycznym, mają postać zakodowanego komunikatu. Zdekodowanie tego komunikatu, wymaga pobrania i obróbki sygnału.

Pobranie polega na obserwacji lub rejestracji realizacji czasowej, reprezentującej sygnał. Natomiast obróbka sygnału stochastycznego, polega na wyznaczeniu estymaty jego charakterystyki statystycznej. Rodzaj charakterystyki jest wybierany przez badacza w zależności od poszukiwanych informacji diagnostycznych.

Ze względu na okresowy sposób funkcjonowania źródeł informacji w urządzeniu technicznym te charakterystyki są przeważnie funkcjami częstotliwości.

Mimo, że wybór odpowiedniej charakterystyki i wyznaczanie jej estymaty nie jest łatwym zadaniem, rezultatem obróbki sygnału nie jest zdekodowana postać komunikatu; estymata ułatwia jedynie odczytanie informacji zawartych w komunikacie. Dla prawidłowego wyboru charakterystyki i odczytania tych informacji, oprócz doświadczenia i intuicji, badacz powinien dysponować wiedzą: 1) o sposobie powstawiania i prezentacji informacji, w wybranej charakterystyce i wyznaczonej estymacie, 2) o zakłóceniach tych informacji wprowadzonych podczas obróbki sygnału. Mimo, że są to wymagania trudne do spełnienia, obróbka sygnału polegająca na wyznaczeniu estymat jego charakterystyk statystycznych, jest jedynym, stosowanym obecnie, środkiem ułatwiającym odczytanie informacji diagnostycznych, zawartych w zakodowanych komunikatach.

Do niedawna obróbkę sygnałów diagnostycznych (a w szczególności wibroakustycznych), wykonywano wyłącznie metodami, które można nazwać analogowymi. Obróbka polegała na wyznaczeniu estymat z ciągłej postaci sygnału, za pomocą odpowiednich przyrządów pomiarowych. W zaawansowanej diagnostyce urządzeń technicznych, ta metoda okazuje się nieefektywna i mało uniwersalna.

Komputeryzacja prac badawczych spowodowała, że metody analogowe są coraz częściej zastępowane przez metody numerycznej obróbki sygnałów. Pojawienie się komputerów o dużej mocy obliczeniowej i szybkości działania oraz nowoczesnych algorytmów, pozwalają obliczać estymaty, za pomocą komputera.

Istotną cechą komputera jest możliwość wykonywania działań tylko na wartościach dyskretnych, natomiast realizacje czasowe, reprezentujące sygnały diagnostyczne, są z natury ciągłe. Konieczne jest zatem przetworzenie analogowo-cyfrowe, w rezultacie którego otrzymuje się szereg wartości, jakie sygnał przybiera w chwilach próbkowania, dyskretnie rozłożonych na osi czasu. Estymaty obliczone na podstawie tak utworzonej, dyskretniej bazy danych, są również dyskretnie [3, 4].

W bazie danych, uzyskanej w rezultacie przetwarzania A/C, pozostają zachowane jedynie informacje zawarte w sygnale diagnostycznym, w chwilach próbkowania. Pozostałe informacje zostają bezpowrotnie utracone. Nowoczesne

komputery i przetworniki A/C, pozwalają na „gęste” próbkowanie sygnału, przez co takie straty informacji nie są bardzo dotkliwe. Natomiast dyskretyzacja oraz skończona liczba próbek obrabianego sygnału powoduje, że dyskretnie estymaty charakterystyk statystycznych, różnią się sposobem powstawiania i prezentacji informacji oraz zakłóceń wprowadzonych podczas obróbki, od estymat ciągłych, wyznaczanych metodami analogowymi. Dlatego wspomniana wyżej wiedza i doświadczenie, uzyskane przez badacza podczas stosowania analogowych metod obróbki sygnałów, są mało przydatne w przypadku obróbki numerycznej [3].

Biorąc pod uwagę znaczenie prawidłowego zdekodowania komunikatu, zawartego w obrabianym sygnale, dla prawdziwości stawianej diagnozy, wydaje się pożyteczne podjęcie kompleksowych, badań mających na celu uzyskanie wiedzy o sposobie powstawiania i prezentacji informacji diagnostycznych, w dyskretnych estymatach charakterystyk sygnałów stochastycznych. Jest to szczególnie ważne w odniesieniu do charakterystyk wzajemnych oraz nowych (mało znanych), takich jak: widma wzajemne, funkcje koherencji, widma falkowe itp.

Dla podjęcia i efektywnego wykonania takich badań konieczne jest posiadanie odpowiednich „narzędzi”. Najważniejsze z nich to:

- wiarygodne definicje oraz notacje analityczne i numeryczne badanych charakterystyk, a także ich fizyczne interpretacje,
- oprogramowanie pozwalające na obliczanie estymat tych charakterystyk,
- model symulacyjny sygnału diagnostycznego, uwzględniający możliwość programowania własności źródeł informacji, funkcjonujących w urządzeniu technicznym,
- sprawnie działający układ pomiarowy do badań urządzeń technicznych.

Badane charakterystyki powinny zostać odpowiednio zaprogramowane. Następnie, dla modeli symulacyjnych sygnałów diagnostycznych, niosących różne, z góry znane informacje, należy wyznaczyć estymaty tych charakterystyk. Pozwoli to, przynajmniej w przybliżeniu, prześledzić w jaki sposób informacje zawarte w sygnale ujawniają się w jego charakterystykach, jak są zakłócone i prezentowane. Uzyskaną w ten sposób wiedzę, można wzbogacić, wykonując badania funkcjonujących urządzeń technicznych. W tym celu należy dysponować układem pomiarowym do pobrania, przetwarzania A/C i rejestracji sygnału wibroakustycznego. Na pierwszym etapie eksperymentu, przedmiotem badań powinny być urządzenia, których własności, stan techniczny oraz procesy i związki, w nich zachodzące, zostały wcześniej rozpoznane w inny sposób.

2. Model symulacyjny sygnału diagnostycznego

Generacja modelu symulacyjnego sygnału diagnostycznego polega na superpozycji składowych harmonicznym widma, które nazwano pierwotnym.

$$f(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f_n(k), \quad \text{gdzie } f_n(k) - \text{sumowane fale harmoniczne} \quad (2.1)$$

W postaci dyskretnej składowe harmoniczne sygnału dla kolejnych numerów n składowych

Podstawą odzwierciedlenia sygnału przez model jest taka „konstrukcja” widma pierwotnego aby było ono podobne do widma modelowanego sygnału [5]. W dziedzinie indeksów ten sygnał ma postać szeregu N próbek, ponumerowanych indeksem $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$:

widma, które nazwano pierwotnym, będą następujące:

$$\begin{aligned} f_0(k) &= \prod_{k=0}^{N-1} A_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot 0 \cdot k}{N} + \psi_0\right) \\ f_1(k) &= \prod_{k=0}^{N-1} A_1 \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot 1 \cdot k}{N} + \psi_1\right) \\ &\dots\dots\dots \\ f_{N/2-1}(k) &= \prod_{k=0}^{N-1} A_{N/2-1} \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot (N/2-1) \cdot k}{N} + \psi_{N/2-1}\right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Operator $\prod$ reprezentuje sumę zdarzeń uporządkowanych w czasie, które są opisane wartościami dyskretnymi dla $k = 0, 1, 2 \dots N-1$, dla kolejnych fal sygnału $n = 0, 1, 2 \dots N/2-1$.

Kolejne próbki generowanego modelu sygnału będą rezultatem sumowania algebraicznego po n , poszczególnych (kolumn) składowych harmonicznym. Można je zapisać w postaci:

$$\begin{aligned} f(0) &= A_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N} \cdot 0 \cdot 0 + \psi_0\right) + A_1 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N} \cdot 1 \cdot 0 + \psi_1\right) + \dots \\ &\quad + A_{N/2-1} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N} \cdot (N/2-1) \cdot 0 + \psi_{N/2-1}\right) \\ f(1) &= A_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N} \cdot 0 \cdot 1 + \psi_0\right) + A_1 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N} \cdot 1 \cdot 1 + \psi_1\right) + \dots \\ &\quad + A_{N/2-1} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N} \cdot (N/2-1) \cdot 1 + \psi_{N/2-1}\right) \\ &\dots\dots\dots \\ f(N-1) &= A_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N} \cdot 0 \cdot (N-1) + \psi_0\right) + A_1 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N} \cdot 1 \cdot (N-1) + \psi_1\right) + \dots \\ &\quad + A_{N/2-1} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N} \cdot (N/2-1) \cdot (N-1) + \psi_{N/2-1}\right) \end{aligned} \quad (2.3)$$

W postaci macierzowej powyższy układ można zapisać w sposób następujący:

$$f(k) = S \cdot A \quad (2.4)$$

gdzie: $f(k)$ - macierz kolumnowa

$N \times 1$ sygnału pierwotnego

S - macierz funkcji sinus o wymiarach

$N \times N/2$

A - macierz kolumnowa $N/2 \times 1$ amplitud składowych harmonicznym sygnału

Zaproponowany algorytm został wykorzystany do generacji modelu sygnału, który będzie odzwierciedlał różne sygnały diagnostyczne, wytwarzane przez urządzenia techniczne.

Na rysunku 1 przedstawiono przykład menu służącego do wykonania modelu przez program generacji sygnału. Widmo tego sygnału zawiera dwa pasma reprezentujące maksima lokalne, o zdeterminowanych parametrach, pozostałą część widma stanowi tło, również zdeterminowane. Program komputerowy umożliwia „skonstruowanie” widma pierwotnego zapewniając dobór i wizualizację:

JÓZEF CZYK, KUROWSKI, PANKOWSKI, *Badania charakterystyk sygnałów diagnostycznych*

- fazy,
- pasm maksimów lokalnych i ich częstotliwości środkowych,
- tła.

Algorytm generacji sygnału o zadanym widmie

☒ Selekcja liczby próbek N: 512 $N_f = N/2-1 = 255$

☒ Selekcja szerokości pasma filtrowania r

☒ Selekcja rodzaju filtra

☒ Definicja i generowanie fazy Psi: 2 - Faza Isowa o rozkładzie jednostajnym z przedziału [0, 2*Pi]

☒ Selekcja i generowanie pasm: Liczba pasm 2

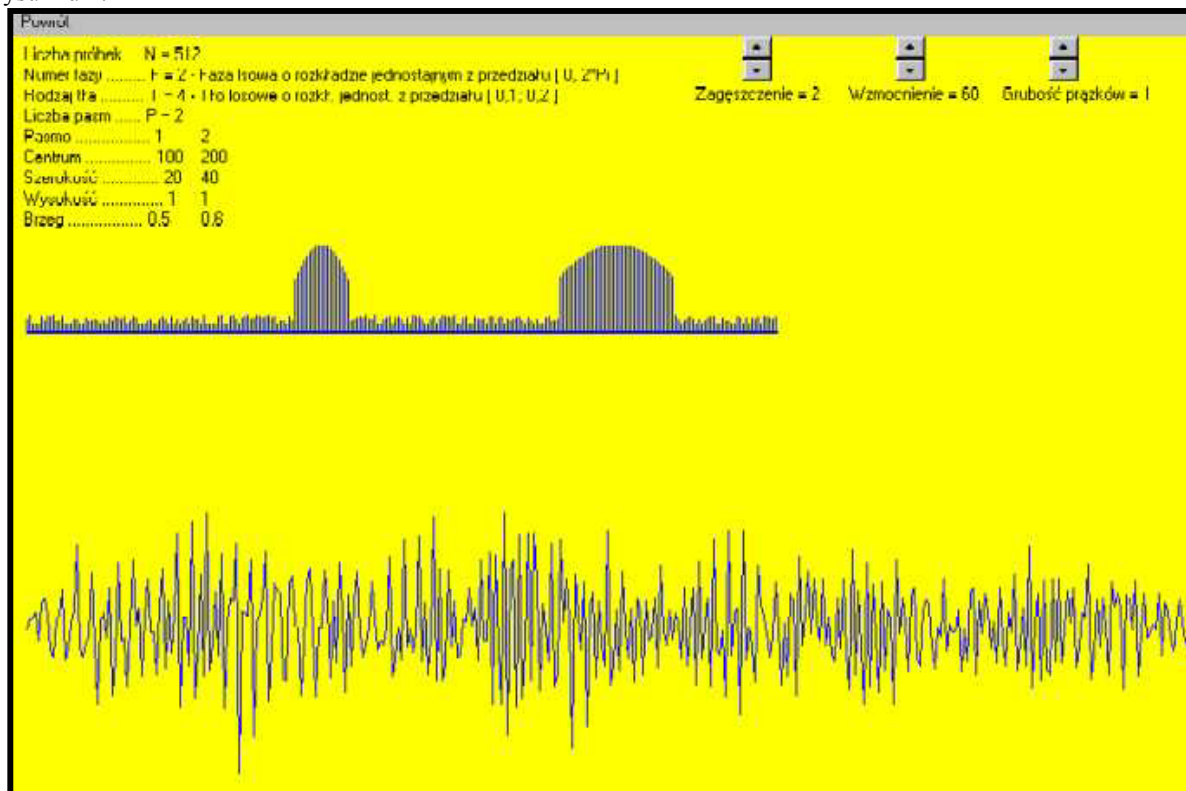
Parametry pasm		
	Pasmo 1	Pasmo 2
Centrum	100	200
Szerokość	10	80
Wysokość	1	1
Brzeg	0,5	0,3

☒ Definicja i generowanie tła: 4 - Tło losowe o rozk. jednost. z przedziału [0,1; 0,2]

☒ Definicja i generowanie sygnału

Rys.1 Program generujący sygnał o zadanym widmie

Przebieg modelu sygnału, który wygenerowano z tak „skonstruowanego” widma pierwotnego przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Widmo pierwotne i model sygnału

3. Przekształcenia falkowe

Nową charakterystyką, której przydatność dla diagnostyki urządzeń technicznych jest dotychczas słabo zbadana jest widmo falkowe. Obecnie wiadomo, że ta charakterystyka może być stosowana do rozpoznawania i obróbki obrazów oraz analizy danych. Jest również wykorzystywana do badania sygnałów mocno zaszumionych. Natomiast wykorzystanie transformacji falkowej dla celów diagnostyki wymaga zbadania czy widma falkowe niosą informacje diagnostyczne, jak te informacje są wytwarzane i jak prezentowane w estymatach.

Transformacja falkowa wyraża badane sygnały poprzez specjalne funkcje, które są tworzone z funkcji stałej, zwanej falką macierzystą. Formalnym celem analizy falkowej jest znalezienie funkcji macierzystych i sposobów ich uzyskania. Dla uzyskania dobrego widma falkowego należy jak najlepiej dopasować falkę macierzystą jako aproksymację badanego sygnału; to co pozostaje jest szumem. Badania wstępne wykazują, że ten szum może również zawierać wartościowe informacje diagnostyczne.

Dla wyznaczenia widma falkowego używa się transformat ciągłych i dyskretnych [2]. Przekształcenie ciągłe zaproponowane przez Marlet'a-Grossman'a dla jednowymiarowych sygnałów $f(t) \in L^2(R)$ ma postać:

$$w(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3.1)$$

gdzie $\Psi(t)$ - falka macierzysta, a - parametr skali ($a > 0$), b - parametr miejsca. Obrazem ciągłego sygnału $f(t)$, w takiej transformacji, jest funkcja dwu zmiennych (czasu i skali):

$$\Psi_f^\Psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int f(t) \Psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (3.2)$$

gdzie: s - skala, τ - przesunięcie w czasie.

W rezultacie transformacji falkowej otrzymuje się widmo falkowe, które jest reprezentacją

badanego sygnału w postaci rozwinięcia liniowego w szereg o podwójnej sumie :

$$f(t) = \sum_k \sum_j a_{jk} \Psi_{jk}(t) \quad (3.3)$$

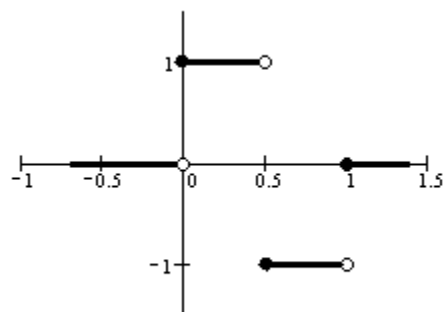
określonego zbiorem współczynników a_{jk} .

Celem większości rozwinięć funkcji, reprezentujących badane sygnały, jest uzyskanie współczynników a_{jk} , umożliwiających wyodrębnienie informacji, która jest bardziej użyteczna niż informacja widoczna bezpośrednio z oryginalnej realizacji czasowej sygnału. Niezerowe elementy rozwinięcia szeregu (3.3) reprezentują składowe falkowe badanego sygnału. Elementy te są określone przez współczynniki, których wartość jest różna od zera.

Z przytoczonych notacji wynika, że transformacja falkowa jest charakterystyką opisującą wzajemną zależność dwóch zmiennych. Jej notacja jest podobna do funkcji korelacji wzajemnej. Można zatem oczekiwać, że transformata falkowa będzie prezentować podobieństwo badanego sygnału i wybranej falki macierzystej, podobnie jak funkcje korelacji wzajemnej. Jednak transformacja falkowa jest „zlokalizowana” zarówno w dziedzinie czasu jak i w częstotliwości. Pozwala to badać sygnały zawierające nieciągłości oraz ostre piki.

Mimo niewielkiej złożoności obliczeniowej wzory analityczne na ciągłe transformaty falkowe są praktycznie niemożliwe do wykonania, nawet dla stosunkowo prostych sygnałów. Widma falkowe są on ogół liczone numerycznie na pewnej siatce czasu i skali. Dyskretyzując skalę a i przesunięcie b otrzymujemy transformację dyskretną. Duża wartość skali odpowiada małym częstościom, a więc zjawiskom powtarzającym się co długi okres, mała skala zaś, wysokim częstościom, lub procesom szybko powtarzalnym.

Dzięki falkom można aproksymować funkcje, reprezentujące składowe badanego sygnału, na dowolnie małych przedziałach czasu, co w rezultacie daje nam przybliżenie danej składowej. Najprostszym przykładem falkowego rozwinięcia sygnału jest podstawowa falka Haara, pokazana na rysunku 3:



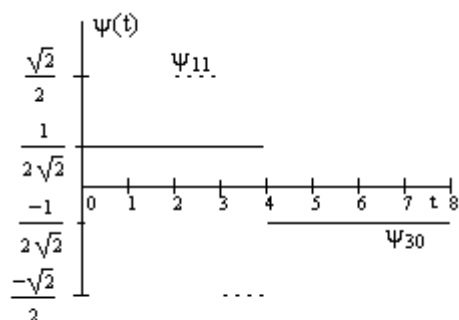
Rys.3. Falka Haara

Podstawowa falka Haara generuje zbiór falek o elementach (tworzących bazę ortonormalną, zaś w sensie zastosowań falkowych składowych sygnału)

$$\Psi_{mn}(t) = 2^{-m/2} \Psi(2^{-m}t - n) \quad (3.4)$$

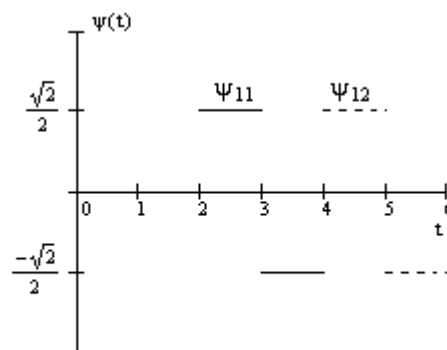
dla $n = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$

Ponieważ nośnik (przedział czasowy, w którym sygnały elementarne są niezerowe) funkcji $\Psi_{mn}(t)$ ma długość 2^m , liczbę całkowitą m nazwano współczynnikiem skali, zaś n – współczynnikiem przesunięcia. Zauważono, że przesunięcie falki podstawowej Ψ zależy od współczynnika skali



Rys. 4a. Ta sama skala różne przesunięcia (nośnik tj. długość przedziału=2)

i wynosi $2^m \cdot n$. 2^m jest krokiem z jakim są przesuwane w czasie falki $\Psi_{mn}(t)$. Natomiast kolejne potęgi dwójki wyznaczają próbkowanie na osi skali. Zatem falki z tym samym współczynnikiem skali nie mają wspólnego nośnika, czyli ich przesunięcie jest całkowitą wielokrotnością długości nośnika (rys. 4a). Jeśli dla falek o różnych skalach nośniki przecinają się to falka o większej długości nośnika jest stała w przedziale równym nośnikowi falki o krótszym nośniku (rys. 4b).



Rys. 4b. Różna skala i przesunięcie

Inne falki stosowane obecnie dla uzyskania widm falkowych to:

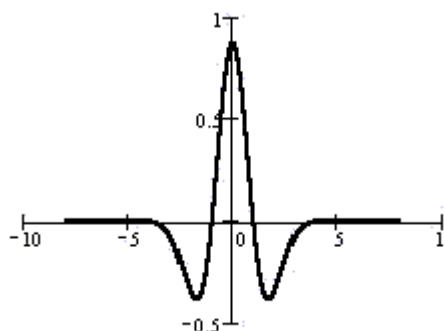
- (1) falka Marlet'a określona w dziedzinie zmiennej zespolonej:

$$\Psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} [\cos(2\pi \nu_0 t) + j \sin(2\pi \nu_0 t)] \quad (3.5)$$

gdzie: ν_0 - stała z warunkiem dopuszczalności $\nu_0 > 0,8$

- (2) falka „Mexican Hat” tj. kapelusz meksykański, przedstawiona na rysunku 5.

$$\Psi(t) = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{-\frac{1}{4}} (1 - t^2) e^{-\frac{t^2}{2}}$$



Rys. 5 Falka "Mexican Hat"

- (3) falki z rodziny Daubechies [2].

Ogólnie biorąc, kształt falki może być dobrany z dużą dowolnością. Można zatem podjąć próbę doboru takich falek, które będą odzwierciedlać przebieg pewnych procesów zachodzących podczas funkcjonowania urządzenia

technicznego, np. procesu przyporu zębów funkcjonujących przekładni zębatych, ruchu czopu wałka w panewce łożyska ślizgowego itp.

Możliwość wydzielenia takich przebiegów, z pobranego sygnału diagnostycznego, może być pożyteczna dla postawienia diagnozy

o stanie par kinematycznych, w których te procesy są realizowane.

4. Charakterystyki wzajemne

Mało znane pod względem przydatności dla diagnostyki urządzeń technicznych są charakterystyki wzajemne sygnałów diagnostycznych.

Przyjmuje się, że energia chwilowa sygnału $f_1(t)$ i sygnału $f_2(t)$ dla chwil $t = t_k$ jest równa $f_1^2(t_k)$ i $f_2^2(t_k)$. Energię wzajemną tych sygnałów dla przedziału $[-T/2, T/2]$ można wyrazić całką

$$E_{1,2}(t) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f_1(t) \cdot f_2(t) dt \quad (4.1)$$

Podając notację charakterystyk wzajemnych tych sygnałów, można zauważyć, że funkcja korelacji wzajemnej w postaci:

$$R_{12}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f_1(t) \cdot f_2(t + \tau) dt \quad (4.2)$$

jest pewną formą prezentacji energii wzajemnej tych sygnałów, w funkcji przesunięcia na osi czasu jednego sygnału względem drugiego.

W dziedzinie częstotliwości, odpowiednikiem funkcji korelacji wzajemnej jest widmo wzajemne:

$$F_{1,2}(f) = F_1^*(f) \cdot F_2(f) \quad (4.3)$$

gdzie:

$$F_1^*(f) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f_1(t) e^{i2\pi ft} dt$$

$$F_2(f) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f_2(t) e^{-i2\pi ft} dt$$

są odpowiednio transformatami Fouriera, sprzężoną, zwykłą sygnałów $f_1(t)$ i $f_2(t)$. Funkcje $F_{1,2}(f)$ oraz $F_1^*(f)$ i $F_2(f)$ są unormowane do czasu i mają wymiar mocy.

Bywają nazywane gęstościami widmowymi mocy. Te wielkości są podstawą do wyznaczenia innych wielkości pochodnych takich jak np. funkcja koherencji:

$$\gamma_{12}^2(f) = \frac{|G_{12}(f)|^2}{G_{11}(f)G_{22}(f)} \quad (4.5)$$

Twierdzenie Wienera - Chinchina pozwala na łatwe przejście od funkcji korelacji wzajemnej do wzajemnej gęstości widmowej i odwrotnie.

Inną mniej znaną charakterystyką jest łączne widmo dwóch sygnałów $f_1(t)$ i $f_2(t)$. Jest to transformacja Fouriera sygnału

$$f_3(t) = f_1(t) + i \cdot f_2(t)$$

Charakterystyki wzajemne reprezentują zależności energii dwóch sygnałów. Ponieważ te sygnały niosą informację o intensywności źródeł,

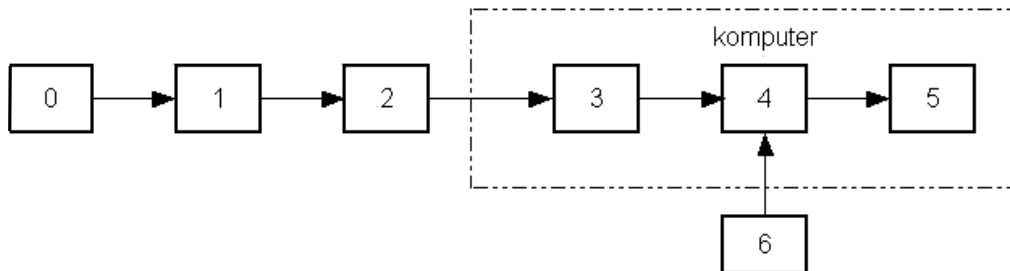
które je wygenerowały można oczekiwać, że w charakterystykach są zawarte informacje wzajemnej zależności tych intensywności. Mogą zatem zawierać informacje o źródłach i ich sprzężeniach. Są to informacje ważne dla postawienia diagnozy o stanie badanego urządzenia.

5. Stanowisko pomiarowe

Obróbka sygnału, polegająca na wyznaczeniu estymaty wybranej charakterystyki statystycznej, jest obecnie coraz częściej realizowana za pomocą technik numerycznych, które narzucają określone wymogi co do postaci obrabianych danych.

Badane sygnały są na ogół ciągłe, natomiast komputer może działać tylko na wartościach dyskretnych.

Dlatego konieczny jest układ pomiarowy, który pobierze i przetworzy sygnał do postaci szeregu wartości [6]. Ten szereg będzie bazą danych dla obliczenia na komputerze wybranej estymaty (np.: wartości średniej, wariancji, funkcji korelacji lub widma częstotliwościowego, widm wzajemnych). Schemat blokowy układu pomiarowego, przedstawiono na rysunku 6,



Rys.6. Schemat stanowiska pomiarowego

gdzie:

1. **System techniczny** emitujący sygnał.
2. **Czujnik pomiarowy** z przedwzmacniaczem dokonuje transformacji wielkości fizycznej, wybranej jako sygnał, do postaci napięcia, które go odzwierciedla.
3. **Przedwzmacniacz** dopasowuje impedancję wyjścia czujnika do impedancji wejścia przetwornika analogowo – cyfrowego.
4. **Wejście analogowe** zapewnia zasilanie przedwzmacniacza i umożliwia przepływ odpowiednio wzmacnionego sygnału elektrycznego, od czujnika do przetwornika analogowo – cyfrowego.
5. **Przetwornik A/C** jest elementem, który łączy analogową część układu pomiarowego (tzn. czujnik, przedwzmacniacz i wejście analogowe) z częścią numeryczną. Jego działanie polega na zmierzeniu sygnału ciągłego w kolejnych chwilach czasu i przesłaniu szeregu danych na magistralę komputera,
6. **Procesor** steruje pobraniem i przetwarzaniem sygnału.
7. **Rejestrator** to twardy dysk komputera, który zapewnia utrwalenie uzyskanych rezultatów oraz pełnej dokumentacji pomiarów.

8. Klawiatura komputera.

Aby prawidłowo realizować pobranie i przetwarzanie sygnału, w komputerze zainstalowano katalog procedur sterujących funkcjonowaniem układu pomiarowego. Te procedury są uruchamiane przez badacza z klawiatury komputera, a dają możliwość nastawienia wzmacnienia, częstotliwości próbkowania sygnału i liczby próbek, pozwalają także przeprowadzić wizualizację pobranych i przetworzonych przebiegów realizacji czasowych.

Taki układ pomiarowy może posłużyć do przeprowadzenia badań rozpoznawczych powstawania o prezentacji informacji diagnostycznych w charakterystykach sygnałów diagnostycznych, pobranych z funkcjonujących urządzeń technicznych. Rys 7 i 8 przedstawia stanowisko pomiarowe w trakcie wykonywania pomiarów przebiegu przyspieszenia drgań korpusu silnika samochodowego. Na rysunku 9 przedstawiono dla przykładu wizualizację pobranej i przetworzonej realizacji czasowej sygnału diagnostycznego. Załączony raport zawiera wartości nastawów przyjętych dla przetwarzania A/C pobranej realizacji.

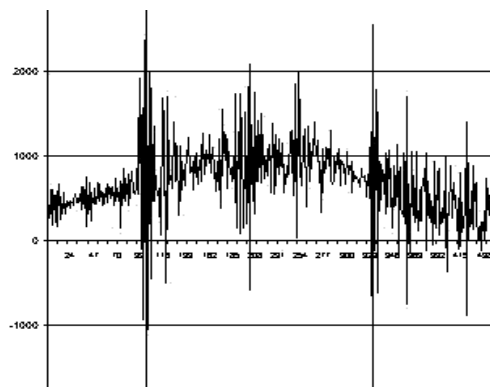


Rys. 7. Stanowisko pomiarowe



Rys. 8. Zamontowany czujnik

Liczba próbek:	1024
Częstotliwość prób:	0.001 [kHz]
Czas pomiaru:	102.4 [ms]
Wyniki pomiarów [mV]:	
Wykres 1	
1	561,5
2	258,8
3	600,6
4	312,5
5	595,7
6	180,7
7	527,3
8	527,3
9	214,8
10	576,2
11	161,1
12	668,9
13	244,1
14	517,6
15	312,5
16	571,2



Rys. 9. Pobrany i przetworzony sygnał wibroakustyczny

6. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza definicji notacji oraz własności transformacji falkowych i charakterystyk wzajemnych wykazuje, że charakterystyki uzyskane w rezultacie tych transformacji mogą zawierać wartościowe informacje diagnostyczne. Dotychczasowe badania pozwalają stwierdzić, że te charakterystyki, wyznaczone na drodze numerycznej obróbki sygnałów, mają charakter dyskretny i różnią się od charakterystyk wyznaczonych metodą bezpośredniego pomiaru, sposobem wytwarzania i prezentacji informacji diagnostycznych. Zastosowanie tych charakterystyk do celów diagnostyki urządzeń technicznych wymaga niejednokrotnego przeprowadzenia kompleksowych badań rozpoznawczych na modelach sygnałów zawierających z góry znane informacje, uzyskanych w rezultacie symulacji oraz sygnałach diagnostycznych pobranych z funkcjonujących urządzeń o znanych własnościach.

Literatura

- [1] Bendat J.S., Piersol A.G.: *Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis*. John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore 1980,
- [2] Białasiewicz J.: *Falki i aproksymacje*. WNT Warszawa 2000
- [3] Kurowski W.: *Dyskretnie widmo Fouriera w diagnostyce wibroakustycznej*. Wyd. Politechniki Białostockiej, Białystok 1997,
- [4] Kurowski W.: *Teoria informacji dla inżynierów*. Wyd. Wyższej Szkoły Agrobiznesu w Łomży, Łomża 2000,
- [5] Kurowski W.: *Model symulacyjny sygnału wibroakustycznego*. Proc. Of the VIII prof. Cz. Kanofajski International Symposium, vol I21-22 sept. 2000, Płock, Poland, s.323-334,
- [6] Kurowski W.: XXIX Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn Węgierska Górka. Wyd. Politechnika Śląska, s. 235-240
- [7] Papoulis A.: *Prawdopodobieństwo, zmienne losowe i procesy stochastyczne*. WNT Warszawa 1972.



Izabela Ewa Józefczyk urodziła się w 1969 roku w Płocku. W 1993 ukończyła Uniwersytet Łódzki Sekcja Metod Numerycznych i Programowania. Pracę magisterską pisała w zakresie Metodyki Nauczania Matematyki. Od 1997 asystent Politechniki Warszawskiej w Szkole Nauk Technicznych i Społecznych w Płocku. Interesuje się zagadnieniami bankowości i finansów. Posiada uprawnienia Dyplomowanego Pracownika Banku.



Waldemar Kurowski urodził się w 1937 roku w Warszawie. W 1961 roku ukończył Wydział MEiL na Politechnice Warszawskiej, a w 1968 roku uzyskał stopień doktora nauk technicznych, w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN. Jest profesorem nzw. Politechniki Warszawskiej w Szkole Nauk Technicznych i Społecznych w Płocku, doktorem hab. nauk technicznych w dyscyplinie: mechanika, specjalność: wibroakustyka. W działalności naukowej, zajmuje się metodologią badań, problemami diagnostyki maszyn i urządzeń technicznych, wibroakustyką oraz numeryczną obróbką sygnałów. Jest autorem lub współautorem ponad 100 publikacji, referatów i opracowań zastosowanych w praktyce oraz 5 publikacji zwartych. Jest rzeczoznawcą zespołu SIMP oraz członkiem Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej.



Andrzej Pankowski urodził się w 1970 roku w Płocku. W 1995 ukończył Uniwersytet Łódzki Sekcja Zastosowań Matematyki. Od 1995 asystent Politechniki Warszawskiej w Szkole Nauk Technicznych i Społecznych w Płocku. Interesuje się zagadnieniami algorytmiki, programowania i metod numerycznych.