

MOŻLIWOŚCI DIAGNOZOWANIA WYBRANYCH USZKODZEŃ APARATURY WTRYSKOWEJ SILNIKA Z ZAPŁONEM SAMOCZYNNYM W OPARCIU O PRZEBIEG WYKRESU INDYKATOROWEGO

Rafał PAWLETKO

Katedra Siłowni Okrętowych, Akademia Morska w Gdyni
ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, e-mail: pawletko@am.gdynia.pl

Streszczenie

Tematem publikacji jest określenie możliwości diagnozowania uszkodzeń aparatury wtryskowej silnika okrętowego w oparciu o przebieg wykresu indykatorowego. Algorytm wykrywania uszkodzeń został zbudowany z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. Zastosowano sieci neuronowe perceptronowe z algorytmem wstecznej propagacji błędu. W celu weryfikacji algorytmu diagnostycznego przeprowadzono eksperyment czynny na okrętowym silniku spalinowym typu Sulzer 3A1 25/30 w zmiennych warunkach eksploatacji. Dane doświadczalne pozyskano przy pomocy indykatora elektronicznego Unitest 201.

Słowa kluczowe: diagnostyka układu wtryskowego, wykres indykatorowy, sieci neuronowe

THE USE OF INDICATION DIAGRAM TO DIESEL ENGINE FUEL INJECTION SYSTEM FAULT DIAGNOSIS

Summary

The paper presents the possibility of diagnosing the fuel injection system of a marine diesel engine basing on a indicator diagram. The algorithm of the faults detection was built with the use of neural networks. The experience data has been collected during the test at the Sulzer 3A1 25/30 engine. The indication diagram has been collected by electronic indicator Unitest 201.

Keywords: diagnosis of fuel injection system, indication diagram, neural networks.

1. WSTĘP

Do najbardziej złożonych urządzeń siłowni okrętowych należą silniki spalinowe. Ich eksploatacja związana jest z częstymi uszkodzeniami aparatury paliwowej. Stan techniczny tego układu wpływa na prawidłowy przebieg procesu spalania. Od prawidłowego przebiegu tego procesu zależą osiągi silnika oraz jego trwałość i niezawodność. Z drugiej strony stan układu wtryskowego jest bezpośrednio związany z emisją toksycznych związków spalania i wielkością zużycia paliwa. Aparatura wtryskowa należy do najbardziej zawodnych układów silników wysokoprężnych. Ponieważ uszkodzenia tego układu rzadko pociągają za sobą unieruchomienie silnika, stąd eksploatowane silniki w złym stanie technicznym aparatury wtryskowej cechują: zwiększone zużycie paliwa, zwiększona emisja gazów i cząstek toksycznych, kłopotliwe rozruchy, a także przyspieszone zużycie głównych układów tribologicznych silnika [4].

Na podstawie analizy istniejących metod diagnostycznych dotyczących aparatury paliwowej silnika spalinowego stwierdzono, że większość z nich bazuje na przebiegu ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym między pompą, a wtryskiwaczem [3, 7, 9, 10].

Zasadniczą trudność zastosowania takiego rozwiązania w praktyce polega na tym, iż ciśnienie w przewodzie wtryskowym jest zwykle niedostępne w siłowni okrętowej (należy wyposażyć silnik w dodatkowe czujniki oraz aparaturę do rejestracji przebiegów ciśnienia). Zachodzi zatem konieczność opracowania algorytmu, który wykorzystywałaby inny sygnał diagnostyczny. Biorąc pod uwagę fakt, iż metoda diagnostyczna miałaby być tania „alternatywą” dla kompleksowych systemów diagnostycznych, musi to być parametr stosunkowo łatwo dostępny pomiarowo, niosący możliwie dużą ilość informacji o stanie aparatury paliwowej.

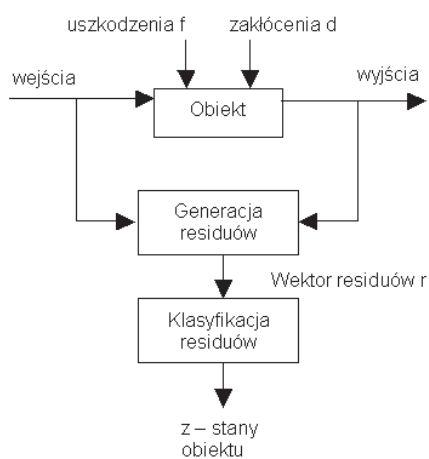
Uwzględniając przedstawione powyżej uwarunkowania, jako sygnał diagnostyczny wytypowano przebieg ciśnienia w cylindrze mierzonego za zaworem indykatorowym za pomocą indykatora elektronicznego. Liczne badania eksperymentalne dowodzą wpływu uszkodzeń układu wtryskowego na kształt wykresu indykatorowego.

2. PROPOZYCJA METODY DIAGNOSTYCZNEJ

Koncepcja metody została oparta na diagnozowaniu z wykorzystaniem modelu zmian ciśnienia w cylindrze, który odwzorowywał zależność ciśnienia w cylindrze od obciążenia

silnika. Model ten służył do wyznaczenia wzorcowego przebiegu ciśnienia w cylindrze dla silnika bez uszkodzeń. Na podstawie przebiegu ciśnienia wzorcowego oraz ciśnienia zmierzonego obliczano sygnał residuum. Sygnał ten odzwierciedlał niezgodności pomiędzy nominalnymi (bez uszkodzeń), a wadliwymi stanami pracy układu wtryskowego. Przebieg sygnału residuum był następnie analizowany pod kątem oceny stanu technicznego aparatury wtryskowej.

Ogólną strukturę algorytmu diagnostycznego przedstawiono na rys. 1.



Rys.1. Ogólny schemat algorytmu diagnostycznego [6]

Algorytm przedstawiony na rys. 1 składał się z dwóch głównych bloków: generacji oraz klasyfikacji wartości residuów. Zadaniem bloku generacji było wyznaczenie sygnału zawierającego informacje o uszkodzeniach, poprzez porównanie sygnałów obliczonych za pomocą modelu przebiegu ciśnienia w cylindrze z wartościami zmierzonymi. Otrzymany sygnał residuum powinien być równy zero podczas pracy układu w warunkach nominalnych, w przypadku wystąpienia uszkodzenia powinien być różny od zera. Zadaniem bloku klasyfikacji było rozpoznanie uszkodzeń aparatury wtryskowej na podstawie cech wyznaczonego wcześniej sygnału residuum.

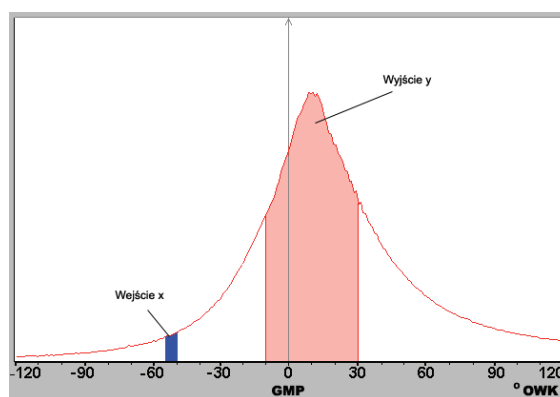
Z powodu trudności związanych z modelowaniem analitycznym złożonych obiektów i procesów, zastosowano modelowanie z wykorzystaniem sieci neuronowych, które dzięki takim własnościom jak aproksymacja dowolnych, ciągłych, nieliniowych zależności oraz zdolność do uczenia i adaptacji, stanowią doskonałe narzędzie do modelowania obiektów nieliniowych i znane są ich liczne zastosowania w dziedzinie diagnostyki [6].

Zarówno do modelowania przebiegu ciśnienia w cylindrze, jak i klasyfikacji sygnałów residuum, wykorzystano sieci neuronowe perceptronowe

z jedną warstwą ukrytą. Do nauki sieci wykorzystano algorytm wstecznej propagacji błędu.

Pierwszym etapem w opracowaniu metody diagnostycznej była budowa neuronowego modelu przebiegu ciśnienia w cylindrze. Model odwzorowywał przebieg wzorcowego ciśnienia za zaworem indykatorowym jako funkcję obciążenia silnika. Obciążenie silnika określano na podstawie przebiegu sprężania, wykorzystując zależność ciśnienia sprężania i obciążania, charakterystyczną dla silnika doładowanego turbosprężarką [13]. Wejścia modelu stanowiły ciśnienia sprężania w zakresie 55-50°OWK przed GMP.

Ograniczono się do modelowania i analizy 40° OWK (10° przed GMP i 30° po GMP - rys. 2).



Rys. 2. Zakres wektora wejść i wyjść modelu neuronowego przebiegu spalania

Początek modelowanego przebiegu, wynikał z teoretycznego początku procesu spalania, koniec natomiast przyjęto arbitralnie. Nie stwierdzono bowiem, zwiększenia skuteczności klasyfikacji uszkodzeń w miarę zwiększania zakresu modelowanego przebiegu (ponad 40° OWK).

Ostatnim zadaniem bloku generacji sygnału residuum, było wyznaczenie różnicy pomiędzy rzeczywistym przebiegiem ciśnienia w cylindrze, a ciśnieniem obliczonym na podstawie modelu neuronowego.

Tak pozyskany sygnał residuum był przekazany do bloku klasyfikacji residuów. Stanowiły go sieci neuronowe klasyfikujące, wytrenowane do rozróżniania poszczególnych uszkodzeń aparatury wtryskowej. W sytuacji wykrycia uszkodzenia, odpowiednia sieć powinna reagować sygnałem bliskim jedności. Na wyjściach sieci, które nie wykryły uszkodzenia, powinny pojawić się zera.

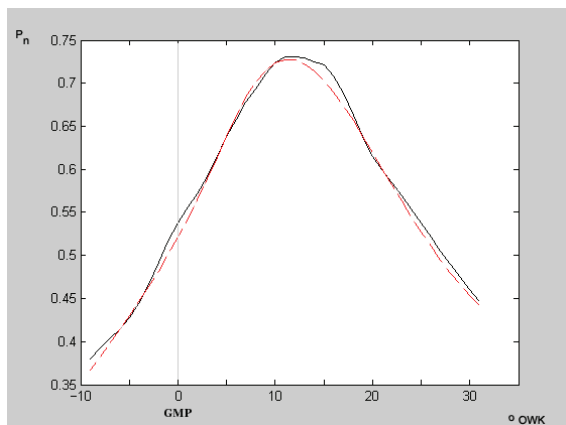
Klasyfikator składał się z banku sieci neuronowych. Każda z sieci odpowiedzialna była za rozpoznawanie innego stanu aparatury wtryskowej.

3. WYNIKI BADAŃ

Badania doświadczalne przeprowadzono na czterosuwowym silniku typu Sulzer 3A1 25/30 doładowanym turbosprężarką. Indykowanie silnika zrealizowano za pomocą indykatora elektronicznego Unitest 201, który umożliwiał pomiar ciśnienia w cylindrze co 1 ° OWK. W celu częściowej eliminacji zakłóceń spowodowanych drganiami słupa gazów w kanale kurka indykatorowego, przebiegi ciśnień zostały wygładzone za pomocą wielomianów trzeciego stopnia.

Pierwszy etap badań miał na celu opracowanie modelu neuronowego przebiegu ciśnienia dla stanu nominalnego bez niesprawności. Na podstawie wykresów indykatorowych dla obciążeń w zakresie od 50 kW do 250 kW opracowano model wzorcowego przebiegu ciśnienia w cylindrze.

Model pozwalał obliczyć wzorcowy przebieg ciśnienia w zakresie 10 ° OWK przed GMP do 30 ° OWK po GMP. Porównanie przykładowego przebiegu ciśnienia, obliczonego na podstawie modelu neuronowego z przebiegiem rzeczywistym, przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Przykładowe przebiegi ciśnienia: linia przerywana obliczony przy użyciu modelu, linia ciągła zmierzony

W celu weryfikacji zaproponowanej metody diagnostycznej, przeprowadzono eksperyment czynny podczas, którego symulowano następujące uszkodzenia układu paliwowego:

- spadek napięcia sprężyny wtryskiwacza
- zużyta pompa wtryskowa
- rozkalibrowany wtryskiwacz
- zakoksowany wtryskiwacz

Podczas eksperymentu symulowano jeden poziom określonego uszkodzenia, następnie dokonywano pomiarów ciśnienia w cylindrze, w zakresie pracy silnika od 50 do 250 kW. Dla każdego symulowanego stanu silnika zarejestrowano 42 przebiegi ciśnienia. Doświadczenie nie uwzględniało występowania wielu uszkodzeń

jednocześnie oraz różnego poziomu natężenia danego uszkodzenia.

Każda sieć w banku klasyfikatora, była trenowana w sposób następujący: zbiór przebiegów doświadczalnych był w sposób losowy dzielony na dwa podzbiory uczący i walidacyjny. Następnie trenowano sieć na podzbiorku uczącym. Proces uczenia zatrzymywano w momencie osiągnięcia minimalnego błędu w zbiorze walidacyjnym.

Tablica 1.
Symulowane uszkodzenia wraz z oznaczeniami

Symbol	Stan
K1	Stan wzorcowy bez uszkodzeń
K2	Spadek napięcia sprężyny wtryskiwacza
K3	Zużyta pompa wtryskowa
K4	Rozkalibrowany wtryskiwacz
K5	Zakoksowany wtryskiwacz

W celu weryfikacji działania poszczególnych sieci klasyfikujących, wyznaczano błędy względne oraz błędy niesłusznego zaliczenia [6].

Błąd względny określa liczbę przykładów należących do danej klasy, które zostały sklasyfikowane błędnie.

Błąd niesłusznego zaliczenia określa liczbę przykładów negatywnych dla danej klasy błędnie do niej sklasyfikowanych.

Wyniki klasyfikacji przedstawiono w tabeli 2.

Tablica 2.
Wyniki klasyfikacji.

Sieć klasyfikująca	Liczba zakwalifikowań do klasy					Błąd względny	Błąd względny średni	Błąd niesłusznego zaliczenia	Błąd niesłusz. zaliczenia średni
	K1	K2	K3	K4	K5				
K2	2	38	4	5	2	10 %	8 %	6 %	4 %
K3	0	0	39	4	1	7 %		2 %	
K4	1	3	8	37	2	12 %		7 %	
K5	1	0	2	0	41	2 %		1 %	

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić:

- Za pomocą zaproponowanej metody możliwe jest skuteczne wykrywanie (błąd względny klasyfikacji poniżej 15 %) wszystkich, rozważanych w pracy uszkodzeń aparatury wtryskowej, tj. spadku napięcia sprężyny wtryskiwacza, zużytej iglicy wtryskiwacza, rozkalibrowanego oraz zakoksowanego wtryskiwacza.

2. Przebieg wykresu indykatorowego niesie dużą ilość informacji o stanie technicznym aparatury wtryskowej. Sygnał ten jest również stosunkowo łatwo dostępny pomiarowo w warunkach siłowni okrętowej, przy pomocy indykatora elektronicznego. Może zatem stanowić podstawę algorytmów diagnozowania tego układu.
3. Dalsze prace powinny objąć badania w kierunku zastosowania innego typu sieci neuronowych, szczególnie na etapie klasyfikacji uszkodzeń oraz próbę wykrywania kilku uszkodzeń występujących w tym samym czasie.



Mgr inż. Rafał Pawletko jest asystentem w Katedrze Siłowni Okrętowych, Wydziału Mechanicznego Akademii Morskiej w Gdyni. Zajmuje się diagnostyką okrętowych silników spalinowych.

LITERATURA

- [1] Ambrozik A., Piasta Z.: Ocena pracy silnika spalinowego w oparciu o uogólnioną użyteczność jest wskaźników, *Silniki Spalinowe* Nr 4/1988.
- [2] Hebda M., Niziński S., Pelc H.: *Podstawy diagnostyki pojazdów samochodowych*. WKŁ, Warszawa 1980.
- [3] Jankowski M., Kwidzyński M.: Zastosowanie sieci neuronowej do automatycznej klasyfikacji stanu aparatury wtryskowej, *Kongres Diagnostyki Technicznej*. Gdańsk 1996.
- [4] Jankowski M.: Ocena wrażliwości diagnostycznej sygnału pulsacji ciśnienia aparatury wtryskowej, *Rozprawa doktorska*, Akademia Techniczno Rolnicza w Bydgoszczy 1997.
- [5] Kluj S.: *Diagnostyka urządzeń okrętowych*, Wydawnictwo WSM, Gdynia 1982.
- [6] Korbicz J., Kościelny J., Kowalczyk Z., Cholewa W.: *Diagnostyka procesów*, WNT Warszawa 2002.
- [7] Lotko W.: *Diagnostyka aparatury wtryskowej*, WSI Radom, *Mechanika* 20/1991.
- [8] Lotko W.: *Diagnozowanie aparatury wtryskowej na podstawie zmian ciśnienia w przewodach wtryskowych*, *Silniki Spalinowe* nr 3/1987.
- [9] Lotko W.: Współczesne metody diagnozowania silników spalinowych o zapłonie samoczynnym, *Kongres Diagnostyki Technicznej*, Gdańsk 1996.
- [10] Lus T.: *Badania diagnostyczne układów paliwowych i układów rozrządu silników okrętowych*, *Kongres Diagnostyki Technicznej*, Gdańsk 1996.
- [11] Sobieszkański M.: Bieżąca kontrola diagnostyczna aparatury wtryskowej silnika okrętowego, *Silniki Spalinowe* nr 1/1984.
- [12] Bielawski P.: *Możliwości rozwoju metod oceny stanu silników spalinowych*, IV Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna Diagnostyka Procesów Przemysłowych, Kazimierz Dolny 1999.
- [13] Piotrowski I., Witkowski K.: *Okrętowe Silniki Spalinowe*, Trademar Gdynia 1996.