

Marek Łutowicz

## BADANIA WSTĘPNE MOŻLIWOŚCI OCENY STANU TECHNICZNEGO UKŁADÓW CYLINDROWYCH SILNIKA NA PODSTAWIE ANALIZY PROCESU SPRĘŻANIA

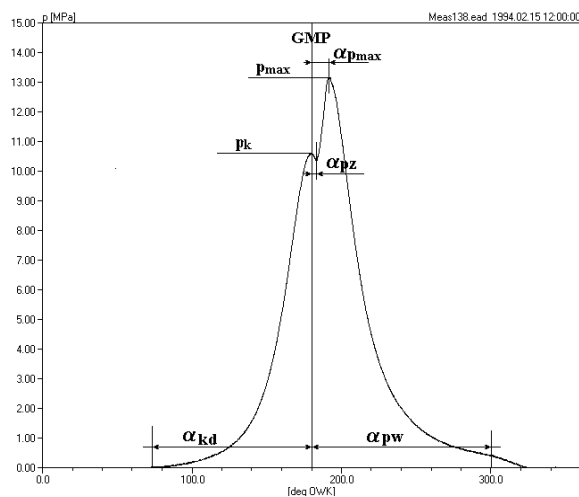
### STRESZCZENIE

W niniejszym opracowaniu przedstawiono koncepcję obróbki wykresów indykatorowych polegającą na dopasowaniu modelu procesu sprężania do zarejestrowanego przebiegu ciśnienia wewnątrzcyldrowego tłokowego silnika spalinowego. W procesie dopasowania modelu można odtworzyć nieznanne lub niepewne parametry wejściowe dla tego modelu, które doprecyzują jakość stawianej diagnozy o stanie technicznym przestrzeni roboczych silnika pod względem jakościowym i ilościowym.

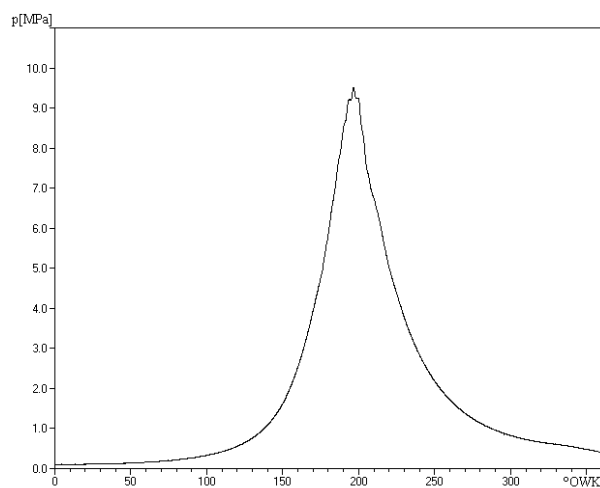
### WSTĘP

W Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów AMW od wielu lat prowadzone są badania diagnostyczne tłokowych silników spalinowych użytkowanych na okrętach Marynarki Wojennej RP. Jednym z głównych elementów diagnozowania jest pomiar ciśnienia wewnątrzcyldrowego, który jest powszechnie stosowany w diagnostyce okrętowych silników wolnoobrotowych. Przykład pomiaru wykonanego na silniku wolnoobrotowym Sulzer 6RTA76 przedstawiono na rysunku 1.

Na pierwszy rzut oka można na tym przebiegu zidentyfikować wiele parametrów. Widoczny jest moment zamknięcia zaworu dolotowego  $\alpha_{kd}$ , maksymalne ciśnienie sprężania  $p_k$ , moment osiągnięcia GMP przez tłok, początek spalania  $\alpha_{pz}$ , ciśnienie maksymalne  $p_{max}$  i kąt jego wystąpienia  $\alpha_{pmax}$ , moment otwarcia zaworu wylotowego  $\alpha_{pw}$ . Błędem jest jednak zerowa wartość zarejestrowanego ciśnienia początkowego. Jest to podstawowa wada wszystkich wysokotemperaturowych czujników ciśnienia polegająca na obciążeniu znacznym błędem składowej stałej ciśnienia, które jako niepewne zwykle podlega eliminacji [7].



Rys. 1. Przebieg ciśnienia wewnątrzcyldrowego w silniku wolnoobrotowym



Rys. 2. Przebieg ciśnienia wewnątrzcyldrowego silnika średnioobrotowego Sulzer 6AL25/30

Silniki wolnoobrotowe nie są jednak dominujące w Marynarce Wojennej RP. Na rysunku 2. przedstawiono wynik pomiaru wykonanego na dominującym w naszej flocie silniku Sulzer rodziny A charakteryzującym się zdecydowanie wcześniejszym wtryskiem paliwa. Jedyne, co można odczytać wprost z wykresu, to ciśnienie maksymalne. Nie jesteśmy w stanie bezpośrednio określić maksymalnego ciśnienia

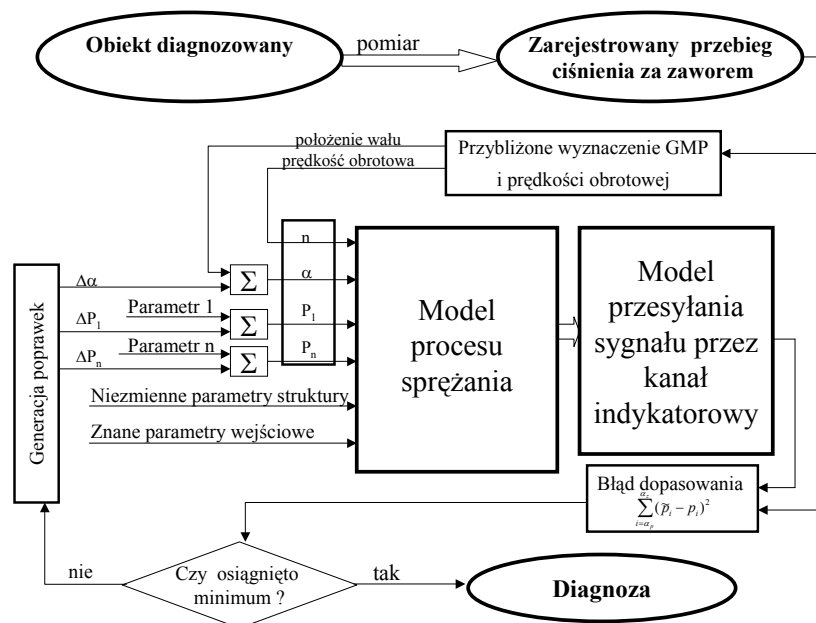
sprężania ani położenia GMP i związanych z nim kątów początku wtrysku, wystąpienia maksymalnego ciśnienia i otwarcia zaworów wylotowych. Można zlokalizować GMP, korzystając ze znaczników na kole zamachowym w czasie pracy silnika z wyłączonym podawaniem paliwa, lecz powstające wskutek nierównomiernej pracy drgania skrętne wnoszą błędy położenia GMP do  $2,8^\circ$ , szczególnie na silniku Sulzer TD48. Dokładniej GMP można zlokalizować intuicyjnie w oparciu o przebieg pochodnej ciśnienia. Natomiast zamiast maksymalnego ciśnienia sprężania można mierzyć ciśnienie w GMP, jak robi to między innymi firma Denkra w systemie „DOCTOR” i ABB w systemie „CYLDET”. Parametr ten sprawdza się w przypadku silników wolnoobrotowych, jednak w silnikach z wczesnym zapłonem w większym stopniu zależy on od kąta zapłonu niż od ciśnienia sprężania. W referacie *Diagnozowanie strat ciśnienia w cylindrach silników tłokowych* zaproponowano, aby zamiast ciśnienia sprężania mierzyć ciśnienie około  $10^\circ$  przed GMP [6]. Jednak, jak wykazała praktyka  $1^\circ$  błędu wyznaczenia GMP powoduje około 2,5% błędu pomiaru proponowanego parametru. Metoda ta wymaga więc dokładnego określenia położenia GMP.

Najpoważniejszym źródłem błędów pomiaru ciśnienia jest kanał z zaworem indykatorowym pośredniczący w przeniesieniu sygnału z wnętrza cylindra do czoła czujnika. Z badań przeprowadzonych w AMW [5] wynika, że kanał z zaworem wnosi, zależnie od warunków obciążenia, do 17% błędu pomiaru ciśnienia maksymalnego w stosunku do ciśnienia mierzonego wewnątrz cylindra silnika Sulzer AL20/24.

Okazuje się, że mimo pomiarów wykonanych z rozdzielczością 12-bitową co  $0,1^\circ$  o procesach zachodzącym wewnątrz cylindra wiemy niewiele. W diagnostyce opartej na tych pomiarach mogliśmy dotychczas bezpiecznie ograniczyć się tylko do badań porównawczych poszczególnych cylindrów jednego silnika, zakładając, że w czasie pomiaru warunki nie ulegną zmianie i identyczne błędy zostaną popełnione przy wszystkich cylindrach. Niezmiennność warunków pomiaru można zapewnić tylko na hamowni, a nie w warunkach morskich, gdzie występujące falowanie powoduje chwilowe zmiany obciążenia silnika. Z powodu wspomnianych błędów trudno ocenić ilościowo zachodzące zjawiska i wyznaczać ich trendy świadczące o degradacji silnika. Stawiana dzisiaj diagnoza jest niepewna, gdyż podobny obraz zmian przebiegu ciśnienia może dać chwilowa zmiana obciążenia, zmiana szczelności układu tłokowo-cylindrowego, zmiana szczelności zaworów, zmiana kąta zamknięcia zaworu dolotowego, zmiana ciśnienia doładowania, zmiana pojemności komory spalania itd.

## UZYSKANIE PARAMETRÓW DIAGNOSTYCZNYCH Z BADAŃ MODELOWYCH PROCESU SPRĘŻANIA

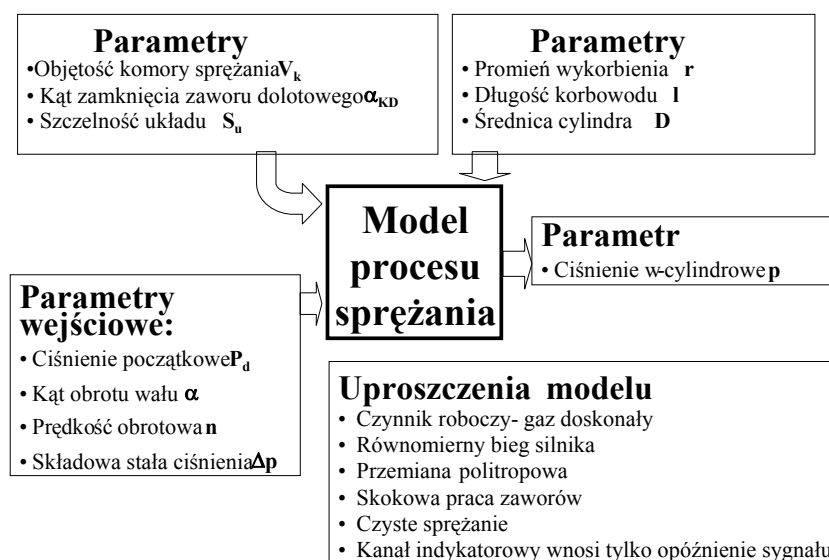
Ilościowe i jakościowe poznanie parametrów świadczących o stanie technicznym elementów tworzących przestrzeń roboczą silnika na podstawie pomiaru ciśnienia wewnątrzcyldrowego jest możliwe dzięki zastosowaniu badań modelowych. Podstawową trudność w stosowaniu do tego celu modeli stanowi konieczność odwrócenia znanego modelu matematycznego. Dla złożonych modeli nie istnieją odwzorowania odwrotne [2], jednak poprzez aproksymację przebiegu ciśnienia wewnątrzcyldrowego ograniczonego do procesu sprężania przebiegiem uzyskanym z modelu matematycznego procesu sprężania można odtworzyć nieznanne lub niepewne parametry wejściowe dla tego modelu. Aproksymacja przebiegu ciśnienia sprężania przebiegiem uzyskanym z modelu matematycznego procesu sprężania jest jednak niezmiernie skomplikowana, między innymi z uwagi na fakt, że ma ona doprowadzić do wyznaczenia położenia GMP. Nie znając położenia GMP, nie jesteśmy w stanie wyznaczyć chwilowej objętości czynnika w cylindrze, niezbędnej do przeprowadzenia aproksymacji. Do rozwiązania postawionego problemu zastosowano metodę iteracyjną przedstawioną na rysunku 3.



Rys. 3. Wyznaczanie parametrów wejściowych poprzez minimalizację błędu dopasowania modelu do danych uzyskanych z pomiaru

Polega ona na przybliżonym wyznaczeniu parametrów wejściowych modelu procesu sprężania i wygenerowaniu poprawek do tych parametrów, tak aby osiągnąć najmniejszy błąd dopasowania w całym obszarze sprężania. Wstępne położenie GMP może być ustalone metodą zaproponowaną przez doktora inżyniera Leonarda Tomczaka w jego pracy doktorskiej wykorzystującej fakt stałego położenia punktu przejścia przez zero pochodnej rzędu drugiego przebiegu ciśnienia sprężania [4], a pozostałe początkowe parametry wejściowe określone są na podstawie wstępnej analizy zarejestrowanego przebiegu ciśnienia, danych katalogowych i statystycznych. Parametry te wraz z wyznaczoną poprawką mogą stanowić podstawę diagnozy. Zastosowana metoda charakteryzuje się tym, że poszukiwanie minimum błędu dopasowania jest procesem niezależnym od samego modelu. Umożliwi to w przyszłości wykorzystanie w badaniach dowolnie rozbudowanego modelu uwzględniającego między innymi wymianę ciepła, ubytek czynnika i przeniesienie ciśnienia przez kanał indykatorowy.

W celu sprawdzenia funkcjonowania proponowanej metody wyznaczania nieznanymi parametrów wykresu indykatorowego przeprowadzono badania wstępne z wykorzystaniem prostego modelu procesu sprężania o parametrach jak na rysunku 4.



Rys. 4. Struktura zastosowanego modelu procesu sprężania

W modelu tym proces sprężania opisano jako przemianę poitropową.

$$p = \Delta p + p_p \cdot \left( \frac{V_p}{V_i} \right)^m, \quad (1)$$

gdzie:  $\Delta p_i$  – wartość bezwzględnego błędu pomiaru ciśnienia;  
 $p_p$  – wartość ciśnienia w punkcie początkowym;  
 $V_i$  – objętość wewnątrzcyldrowa w kolejnych punktach pomiarowych;  
 $V_p$  – objętość wewnątrzcyldrowa w warunkach początkowych.

Chwilową objętość przestrzeni wewnątrzcyldrowej można obliczyć z zależności geometrycznych układu korbowego silnika. Dla silnika z prostym korbowodem opisuje ją następująca formuła:

$$V_i = V_{ks} + \left( R - L + R \cdot \cos(\alpha_{(i)} + \Delta\alpha) + \sqrt{L^2 - (R \cdot \sin(\alpha_{(i)} + \Delta\alpha))^2} \right) \cdot \frac{\pi \cdot D_t^2}{4}, \quad (2)$$

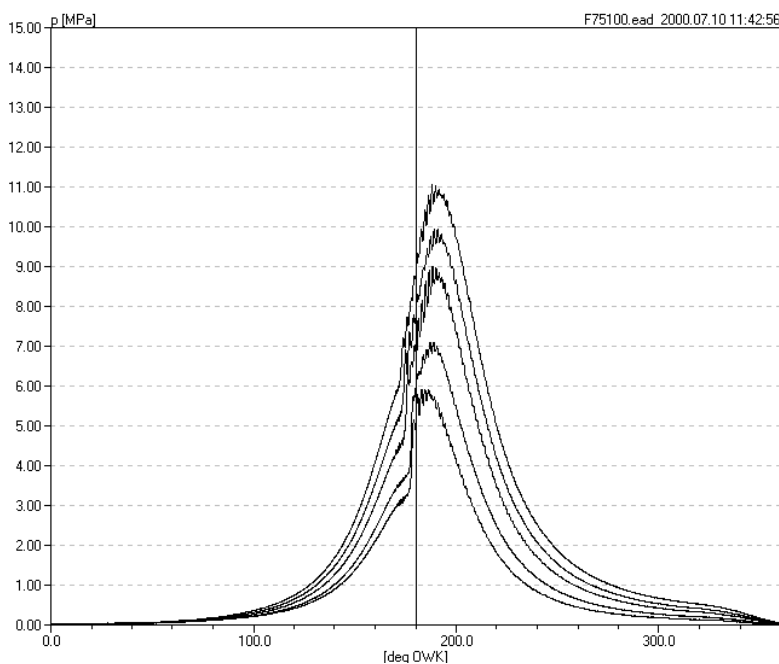
gdzie:  $V_{ks}$  – objętość komory spalania;  
 $D_t$  – średnica tłoka;  
 $R$  – promień wykorbienia;  
 $L$  – długość korbowodu;  
 $\alpha$  – kąt obrotu wału korbowego liczony od oszacowanego DMP;  
 $\Delta\alpha$  – błąd oszacowania położenia DMP;

$D_b$ ,  $R$ ,  $L$  są jedynymi znanymi i pewnymi parametrami struktury silnika występującymi w zależnościach opisujących proces sprężania.

## WYNIKI BADAŃ NA STANOWISKU LABORATORYJNYM

Badania możliwości diagnostycznego wykorzystania proponowanej metody przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym silnika Sulzer 6AL20/24 w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów Akademii Marynarki Wojennej. Rejestrację zmian ciśnienia wewnątrzcyldrowego przeprowadzono przy wykorzystaniu analizatora Ma-3 [1]. Przebiegi ciśnienia wewnątrzcyldrowego zarejestrowane bez

korekty przy różnym stanie obciążenia od biegu jałowego do obciążenia nominalnego przedstawiono na rysunku 5. Należy zwrócić uwagę, że zarejestrowane ciśnienie początkowe ma wartość bliską zero, pomimo że silnik jest doładowany. Wartość ciśnienia doładowania (a więc i w przybliżeniu ciśnienia początkowego) przy prezentowanym zakresie obciążeń powinna się mieścić w zakresie od 0,12 MPa przy biegu luzem do 0,24 MPa przy obciążeniu nominalnym. Błąd ten jest efektem wspomnianej wcześniej wady wysokotemperaturowych czujników ciśnienia.

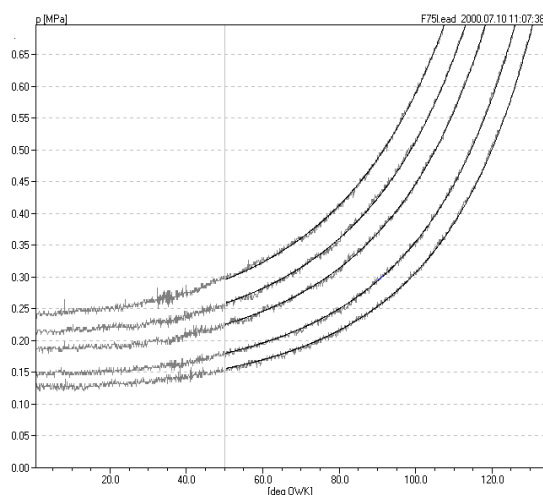
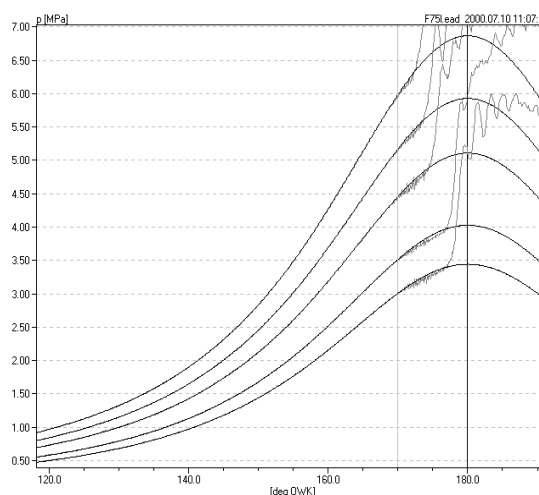


Rys. 5. Przebiegi ciśnienia wewnątrzcyldrowego silnika AL20/24 zarejestrowane przy różnym stanie obciążenia od 0 do 100% bez korekty

Wyniki poszukiwania poprawek i wykorzystania ich do korekty zarejestrowanych przebiegów z wykorzystaniem proponowanej metody przedstawiono w tabeli 1. i na rysunku 5a i 5b, gdzie powiększone charakterystyczne fragmenty zarejestrowanych przebiegów po zastosowaniu korekty przedstawiono w kolorze szarym, natomiast wyniki aproksymacji i ekstrapolacji w kolorze czarnym.

Tabela 1. Parametry uzyskane z badań modelowych przebiegów jak na rysunku 5.

Obciążenie [%]	Geometryczny stopień sprężania	Wykładnik politropy	Ciśnienie początkowe [Mpa]	Maksymalne ciśnienie sprężania [Mpa]	Błąd dopasowania [kPa]
0	12.9	1.295	0.125	3.39 MPa	7.84
25	12.9	1.295	0.145	3.96 MPa	7.20
50	12.9	1.300	0.183	5.04 MPa	10.28
75	12.9	1.300	0.217	5.90 MPa	8.20
100	13.0	1.305	0.241	6.81 MPa	7.50

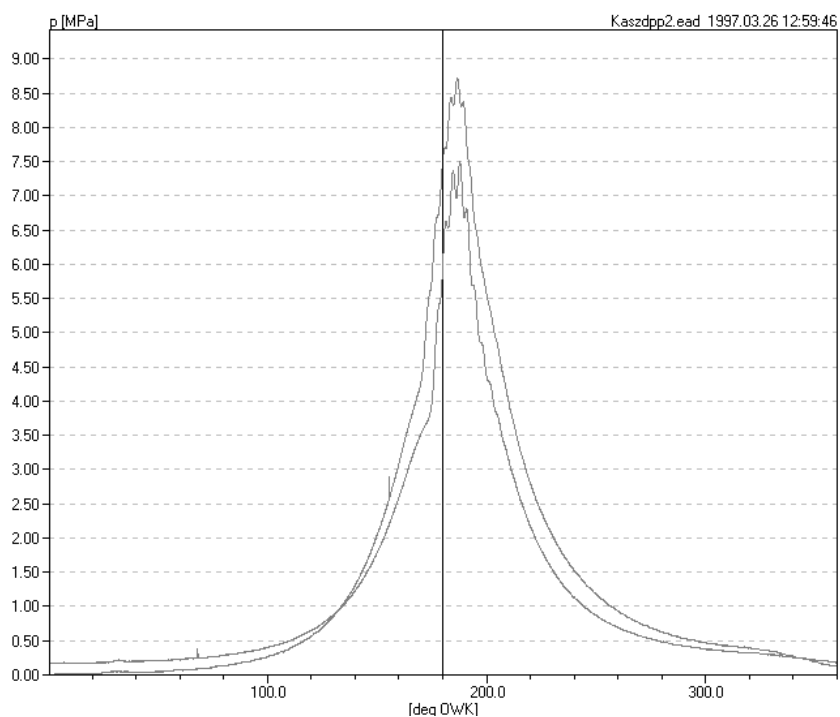
Rys. 5a. Fragment przebiegu z rysunku 5.  
po korekcie w obszarze końca dolotuRys. 5b. Fragment przebiegu z rysunku 5.  
po korekcie w pobliżu GMP

Stwierdzono, że wyznaczone tą metodą ciśnienia początkowe są adekwatne do stanu obciążenia silnika. Ich wartość jest porównywalna z ciśnieniem doładowania. Ciśnienia sprężania są również wiarygodne. Wyznaczony tą metodą stopień sprężania jest natomiast niezależny od stanu obciążenia silnika. Może więc być doskonałym parametrem diagnostycznym niewrażliwym na chwilowe zmiany obciążenia typowe w warunkach morskich.

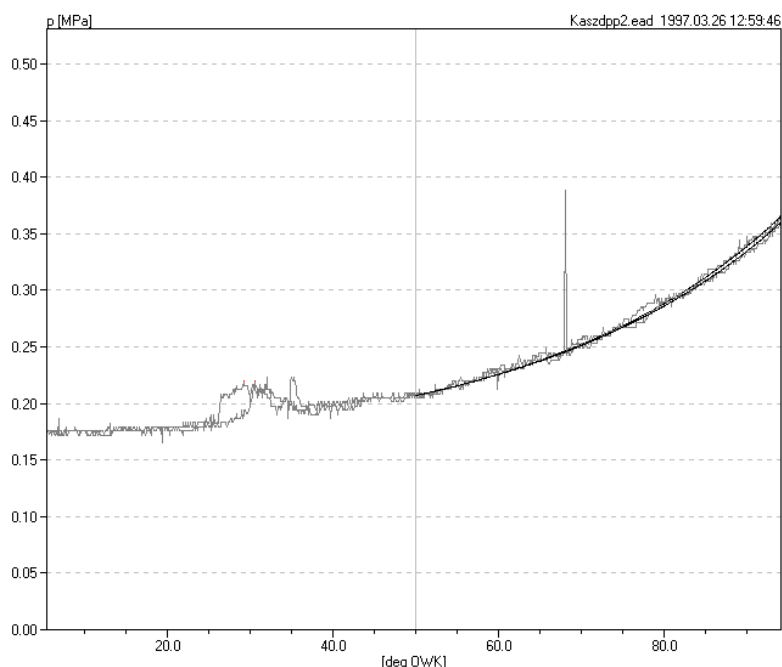


Kolejnym testem było sprawdzenie tej metody w przypadku rzeczywistej niesprawności polegającej na utracie szczelności zaworu wylotowego. Wynik pomiaru przedstawiono na rysunku 6.

Rysunek ten przedstawia wyniki pomiaru ciśnień w cylindrze sprawnym i niesprawnym. Niesprawność powoduje obniżenie ciśnienia pozornie w taki sam sposób jak zmniejszenie obciążenia. Uwzględnienie poprawek wyznaczonych z dopasowania modelu powoduje, że tak wyznaczone ciśnienia początkowe pokrywają się, co jednoznacznie rozróżnia spadek ciśnienia spowodowany niskim ciśnieniem doładowania od spadku ciśnienia spowodowanego nieszczelnością. Prezentuje to rysunek 6a.



Rys. 6. Zarejestrowany przebieg ciśnienia w cylindrze sprawnym i z nieszczelnością



Rys. 6a. Powiększony fragment przebiegów w obszarze końca dolotu po uwzględnieniu wyznaczonych poprawek

## WNIOSKI

Wstępne badania laboratoryjne wykazały, że przez aproksymację przebiegu ciśnienia wewnątrzcyldrowego ograniczonego do procesu sprężania przebiegiem uzyskanym z modelu matematycznego procesu sprężania można odtworzyć nieznanne lub niepewne parametry wejściowe dla tego modelu. Możliwe będzie zatem wyznaczenie adekwatnych miar diagnostycznych, które doprecyzują jakość stawianej diagnozy o stanie technicznym przestrzeni roboczych silnika pod względem jakościowym i ilościowym. Pozytywne wyniki uzyskane z prostym modelem skłaniają do prowadzenia dalszych prac zmierzających do uwzględnienia wymiany ciepła i wpływu kanału indykatorowego, co powinno zaowocować wyznaczeniem kolejnych parametrów trudnych do wyznaczenia innymi metodami.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Bruski S., Łutowicz M., Polanowski S., Żuralski C., *Analizatory ciśnień i obwiedni drgań do diagnozowania silników okrętowych i lokomotywowch. Eksploatacja silników spalinowych o zapłonie samoczynnym*, cz. I A, AMW, Gdynia 1992.
- [2] Cholewa W., Kiciński J., *Diagnostyka techniczna i odwrotne modele diagnostyczne*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
- [3] Cichy M., *Obliczanie procesów sprężania i rozprężania metodą różnic skończonych*, „Zeszyty Naukowe” Politechniki Gdańskiej, 1996, nr 73, Mechanika, Gdańsk.
- [4] Gałęcki W., Tomczak L., *Przenośne systemy diagnostyczne do oceny procesu spalania w okrętowych silnikach spalinowych*, III Sympozjum Naukowo-Techniczne SILWOJ, Jurata 1997.
- [5] Łutowicz M., *Badanie błędu pomiaru średniego ciśnienia indykowanego silnika okrętowego*, „Zeszyty Naukowe” Akademii Marynarki Wojennej, 2002, nr 2, Gdynia.
- [6] Łutowicz M., Polanowski S., Wontka L., *Diagnozowanie strat ciśnienia w cylindrach silników tłokowych*, IV Sympozjum Naukowo-Techniczne SILWOJ, Jurata 1999.
- [7] Łutowicz M., Polanowski S., Wontka L., *Porównanie własności czujników ciśnienia spalania w aspekcie zastosowań na silnikach okrętowych*, IV Sympozjum Naukowo-Techniczne SILWOJ, Jurata 1999.
- [8] Mitianiec W., Jaroszewski A., *Modele matematyczne procesów fizycznych w silnikach spalinowych małej mocy*, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, 1993.

## ABSTRACT

The paper presents an initial concept of processing indicator diagrams which consists in matching the compression process model to the recorded inside-cylinder pressure distribution in an internal combustion engine. In the model matching process it is possible to recreate unknown or uncertain input parameters for this model, which particularize the quality of the diagnosis related to the technical condition of the working spaces in the engine with respect to quality and quantity.

Recenzent dr hab. inż. Zdzisław Chłopek