

Ryszard Zadrag
Akademia Marynarki Wojennej
Wydział Mechaniczno-Elektryczny
Katedra Siłowni Okrętowych

KRYTERIA DOBORU PARAMETRU DIAGNOSTYCZNEGO NA POTRZEBY DIAGNOSTYKI OKRĘTOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

Streszczenie: Zmiana niektórych parametrów struktury silnika wpływa na zmianę emisji składników szkodliwych w spalinach. Dotyczy to przede wszystkim uszkodzeń następujących w układzie wymiany ładunku a także w układzie paliwowym i układzie doładowania silnika. W referacie przedstawiono model diagnostyczny silnika, w którym symptomami diagnostycznymi są wskaźniki i charakterystyki emisji gazowych składników spalin. Model uzupełniono wynikami badań na stanowisku jednocylindrowego silnika badawczego ZS. Badanie modelu ukazuje różną wrażliwość zmian wybranych parametrów struktury silnika na parametry diagnostyczne.

Słowa kluczowe: składniki spalin silnika, silniki okrętowe, diagnostyka silników

1. WSTĘP

Tłokowy silnik spalinowy stanowi w dalszym ciągu najbardziej rozpowszechnione źródło napędu środków transportu, w tym również transportu morskiego. Jego dalszy rozwój determinują wciąż zaostrzane kryteria emisji toksycznych składników spalin oraz problemy energetyczne świata, zmuszające do coraz oszczędniejszego gospodarowania paliwami. Spełnienie coraz ostrzejszych wymagań stawianych przed silnikiem można uzyskać dwiema drogami, mianowicie poprzez stałe doskonalenie procesu spalania oraz poprzez poszukiwanie nowych technologii materiałowych i rozwiązań konstrukcyjnych. Pomimo to, wraz ze zmianą parametrów struktury, w wyniku zużycia trybologicznego zmianie ulega między innymi poziom związków toksycznych emitowanych w spalinach.

Najbardziej narażonymi na zużycie i jednocześnie w sposób bezpośredni wpływającymi na procesy fizyko-chemiczne powstawania związków toksycznych są dwa układy funkcjonalne silnika: wymiany ładunku oraz zasilania paliwem. W przypadku układu zasilania paliwem jest to o tyle niebezpieczne, że jego niesprawność w konsekwencji prowadzi do często poważnego uszkodzenia silnika. W celu zabezpieczenia przed takim

rozwojem wypadków, przede wszystkim w przypadku nowych rozwiązań, stosuje się szeroko rozbudowane systemy stałego nadzoru (monitoringu), które taką ewentualność eliminują. W przypadku starszych rozwiązań, najczęściej z uwagi na koszty, obiekt eksploatacji poddawany jest jedynie okresowej kontroli. Ten właśnie model nadzoru w dalszym ciągu jest podstawowym w przypadku eksploatacji okrętowych silników spalinowych. W tym miejscu należy wspomnieć, że na chwilę obecną, pomimo szybkiego postępu i w tej dziedzinie, nie ma doskonałej metody diagnozowania stanu technicznego tłokowych silników spalinowych. Tak więc problem diagnostyki tłokowych silników spalinowych oraz ograniczenia w dotychczas stosowanych, zarówno metodach, jak i aktualnie wykorzystanych w tym procesie typowych wskaźników ich pracy, jest jak najbardziej aktualny. Należy przy tym podkreślić, że większość parametrów diagnostycznych silnika spalinowego nie spełnia jednocześnie podstawowych wymagań, to znaczy: kryterium wartości informacyjnej oraz kryterium stopnia lokalizacji niesprawności czy też ich jednoznaczności i szerokości zmian. Potwierdza ten stan analiza oceny wybranych i najczęściej stosowanych parametrów diagnostycznych tłokowych silników spalinowych [4]. Wynika stąd konieczność poszukiwania parametrów diagnostycznych powiązanych ściśle z określonymi parametrami struktury, które charakteryzowałyby się jednocześnie wysoką wartością informacyjną oraz stopniem lokalizacji niesprawności. Poszukiwanie jednak pojedynczego, „idealnego” parametru wydaje się być zagadnieniem z jednej strony trudnym, z drugiej zaś nieefektywnym, zwłaszcza w aspekcie współczesnych metod pomiarowych. Metody te wykorzystywane w diagnostyce dają bowiem możliwość jednoczesnej, w czasie rzeczywistym, rejestracji parametrów. Pomiedzy tymi parametrami istnieją współzależności, interakcje, których wielokryterialna analiza pozwala na dogłębne poznanie zjawisk zachodzących w obiekcie, co z kolei ułatwia wnioskowanie diagnostyczne.

Posługując się przedstawionym wyżej tokiem rozumowania oraz na podstawie wyników realizowanych wcześniej badań własnych uznano, że występują realne możliwości wykorzystania wskaźników związanych z emisją związków toksycznych spalin w modelowym opisie stanu technicznego silnika. Wstępna analiza wykazała, że wskaźniki emisji związków toksycznych, a zwłaszcza tlenku węgla, węglowodorów i tlenków azotu mogą spełniać wymagania parametru diagnostycznego podstawowych układów funkcjonalnych silnika – układu zasilania paliwem i układu wymiany ładunku [3,4]. Wzajemne zależności pomiędzy poszczególnymi składnikami spalin analizowano za pomocą modeli wielorównaniowych. Ich zastosowanie daje więcej swobody podczas analizy wyników pomiarowych, gdyż umożliwia jednoczesną analizę efektów i interakcji wielu zmiennych wyjściowych [1].

2. METODYKA PROWADZENIA BADAŃ

Podstawą poprawnie przeprowadzonego badania diagnostycznego jest odpowiedni poziom wiedzy o obiekcie diagnostyki [2,4]. Wyczerpujący opis formalny złożonych procesów fizyko-chemicznych, cybernetycznych i energetycznych zachodzących w rzeczywistym silniku jest praktycznie niemożliwy i dlatego przedmiotem analizy staje się zazwyczaj jego uproszczony model (uproszczony model obiektu diagnostyki). Forma tego

modelu, jego złożoność oraz stopień wierności z jaką opisuje on rzeczywisty silnik, zależą przede wszystkim od poziomu wiedzy o silniku oraz wynikają z określonego zadania diagnostycznego. Z możliwie najbardziej uproszczonego modelu diagnostycznego silnika wynika, że oprócz parametrów wyjściowych (pośród których znajdują się parametry diagnostyczne) i parametrów struktury, występują także parametry wejściowe opisujące oddziaływanie innych współpracujących obiektów (np. śruby napędowej), materiałów eksploatacyjnych (np. rodzaju paliwa, oleju smarującego lub jego zmieniających się w czasie użytkowania właściwości itp.) oraz warunków otoczenia (ciśnienia, temperatury i wilgotności względnej powietrza otaczającego), w których pracuje silnik.

W celu identyfikacji wpływu stanu technicznego układu zasilania paliwem na parametry energetyczne jednocylindrowego silnika badawczego [4], będącego obiektem badań, określono zbiory wielkości wejściowych (parametrów zadawanych) oraz wielkości wyjściowych (parametrów obserwowanych).

Do zbioru wielkości wejściowych zaliczono parametry określające punkt pracy silnika, czyli prędkość obrotową i moment obrotowy oraz parametry opisujące zmiany struktury układu zasilania paliwem, między innymi: nieszczelności w skojarzeniach poszczególnych elementów aparatury wtryskowej, czy określających stopień erozji otworów rozpylaczy, czy też stopień napięcia sprężyny wtryskiwacza.

Do zbioru wielkości wyjściowych zaliczono parametry istotne z uwagi na oddziaływanie na nie parametrów struktury konstrukcyjnej układu zasilania paliwem, są to między innymi: średnie ciśnienie indykowane, maksymalne ciśnienie spalania, temperatura spalin wylotowych, kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa, kąt wtrysku paliwa, czy też godzinowe zużycie paliwa. Oprócz tego do zbioru wielkości wyjściowych zaliczono stężenia związków toksycznych, zarówno w kolektorze wylotowym, jak i w skrzyni korbowej. Rozpatrywano stężenia tlenków azotu, tlenku węgla i niespalonych węglowodorów. Na potrzeby niniejszej pracy dalszą analizę ograniczono do właśnie tej grupy wielkości wyjściowych.

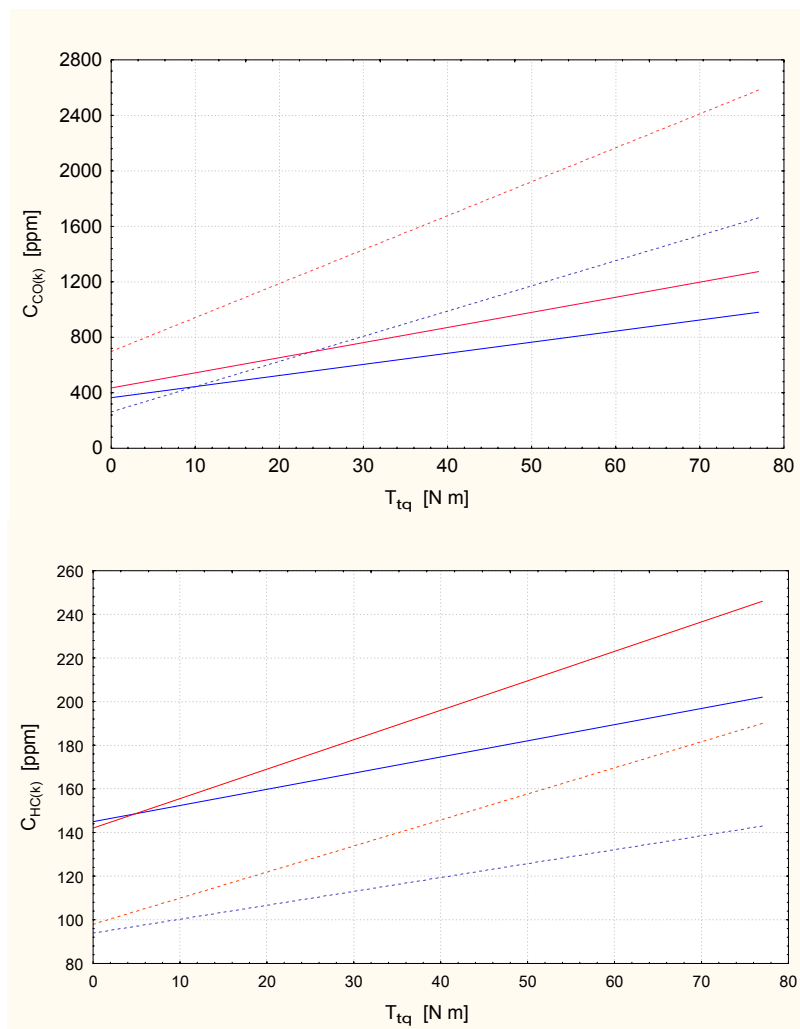
3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

W wyniku przeprowadzonej analizy, zgodnie z teorią eksperymentu, do zrealizowania laboratoryjnych badań symulacyjnych opracowano dwuwartościowy plan frakcyjny o możliwie największej rozdzielczości oraz maksymalnym niewikłaniu interakcji wielkości opisujących funkcjonalny model empiryczny układu zasilania silnika paliwem. Uzyskano tym samym model liniowy, uwzględniający interakcje dwuczynnikowe, dla którego wszystkie wielomiany aproksymujące wielkości wyjściowe charakteryzują się najwyższą wartością współczynnika determinacji $R^2 = 1$ oraz sumą reszt $MS = 0$. Wartości tych miar wskazują, że przyjęty model jest najbardziej adekwatny [2,4].

Wyznaczone wielomiany aproksymujące pozwalają określić dowolne zależności pomiędzy poszczególnymi zmiennymi, a także obliczyć i ocenić wpływ wprowadzonych (symulowanych) uszkodzeń (zużycia) elementów aparatury wtryskowej paliwa na wskaźniki pracy i toksyczności silnika [3,4]. Zakłada się także możliwość określenia powiązań (współzależności) pomiędzy parametrami struktury oraz wskaźnikami toksyczności spalin bezpośrednio lub pośrednio poprzez wskaźniki pracy silnika i tym

samym wyłonić spośród nich parametry diagnostyczne określonych elementów czy zespołów aparatury paliwowej silnika.

Postać graficzną, bardziej przejrzystą, zmian wybranych wskaźników pracy silnika w następstwie zmian wartości parametrów struktury elementów aparatury wtryskowej, przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Zmiany wskaźników pracy silnika

$C_{CO(k)}$ – stężenie tlenu węgla w kolektorze wylotowym, $C_{HC(k)}$ – stężenie węglowodorów w kolektorze wylotowym, T_{tq} – moment obrotowy, kolor niebieski $n = 850$ obr/min, kolor czerwony $n = 1100$ obr/min, linia ciągła – silnik sprawny, linia przerywana – niesprawny układ zasilania paliwem.

Z analizy wykresów na rys. 1 wynika, że stężenie tlenu węgla w kolektorze wylotowym spalin $C_{CO(k)}$ pod wpływem niesprawności układu zasilania paliwem ulega istotnej zmianie, przy czym jest ono zróżnicowane zarówno pod względem wartości bezwzględnych, jak i kierunku wzrostu. Najbardziej wrażliwe warunki występują przy $T_{tq} = 77$ Nm, $n = 1100$ obr/min, a następnie $n = 850$ obr/min.

W przypadku stężenia węglowodorów w kolektorze wylotowym spalin $C_{HC(k)}$ wskutek niesprawności układu zasilania paliwem są jednoznaczne i jednocześnie nieoczekiwane,

Współczynniki $\pi_{i0}, \pi_{i1}, \dots, \pi_{iN}$, $i = 1, 2, \dots, M$ powyższego układu równań dobrano, tak aby funkcjonały $J_i(\pi_{i0}, \pi_{i1}, \dots, \pi_{iN})$ osiągały minimum, a sam problem wyboru najlepszego modelu z klasy równań (5) w sensie minimalizacji wskaźników jakości identyfikacji rozwiązano korzystając z twierdzenia o rzucie ortogonalnym [1].

Kolejnym krokiem analizy jest określenie macierzy wariancji i kowariancji estymatora Π , zbadanie przedziałów ufności dla poszczególnego współczynnika regresji wielorakiej π_{ij} , będącego współczynnikiem macierzy Π , określenie współczynnika korelacji wielorakiej R [1].

Budując model regresji należy uwzględnić w nim te wszystkie zmienne, które ewentualnie mogą mieć wpływ na kształtowanie się wartości zmiennej Y . Nie wszystkie z tych zmiennych odgrywają istotną rolę w modelu, dlatego też należy zastosować dla każdego z otrzymanych współczynników modelu przy poszczególnych zmiennych test istotności. Test ten pozwala na zweryfikowanie przypuszczenia, że wartość współczynnika regresji wynosi zero. Dopiero po odrzuceniu takiej możliwości możemy twierdzić, że dana zmienna odgrywa istotną rolę w modelu regresji liniowej [1].

Zgodnie z (1), po redukcji (uwzględnieniu istotności współczynników), przyjęto równania:

$$y_1 = b_{12}y_2 + b_{17}y_7 + a_{10} + a_{12}x_2$$

$$y_2 = b_{21}y_1 + b_{23}y_3 + b_{24}y_4 + b_{25}y_5 + b_{26}y_6 + b_{27}y_7 + a_{20} + a_{21}x_1 + a_{22}x_2$$

$$y_3 = b_{32}y_2 + b_{35}y_5 + b_{37}y_7 + a_{38}x_8$$

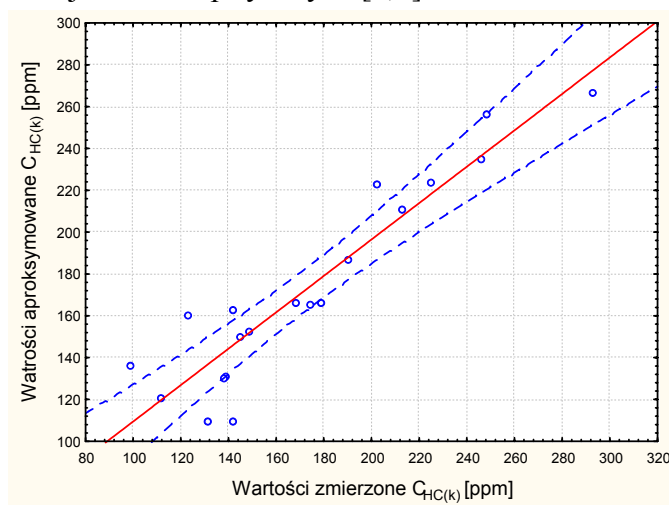
$$y_4 = b_{41}y_1 + b_{45}y_5 + b_{47}y_7 + a_{40} + a_{44}x_4 + a_{45}x_5 + a_{46}x_6$$

$$y_5 = b_{52}y_2 + b_{53}y_3 + b_{54}y_4 + b_{57}y_7 + a_{50}$$

$$y_6 = b_{61}y_1 + b_{67}y_7 + a_{60} + a_{64}x_4 + a_{65}x_5 + a_{67}x_7$$

$$y_7 = b_{71}y_1 + b_{72}y_2 + a_{70} + a_{72}x_2$$

Analizując otrzymane w wyniku badania modelowego równania należy stwierdzić, że otrzymane wyniki zbieżne są z teorią przedmiotu, jak również z wynikami prowadzonych wcześniej badań empirycznych [4,5].



Rys. 2. Zależności wartości aproksymowanych i zmierzonych w modelu wielorównaniowym dla stężenia węglowodorów w kolektorze

Świadczy o tym przykład przebiegów rozrzutu przedstawiony na rys. 2. Z jego analizy wynika, że dopasowanie uzyskanego modelu do wartości uzyskanych w czasie eksperymentu jest znaczne.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawiony opis przestrzeni eksperymentu czynnego za pomocą modeli wielowymiarowych daje wielkie możliwości w analizie danych pomiarowych i wnioskowaniu naukowym. Ponadto istnieje możliwość, przy założeniu ortogonalności macierzy współczynników Π^T , wykonania zadania odwrotnego, czyli szacowania, z założoną istotnością, przy znanych zmiennych wejściowych opisujących punkt pracy, tj.: prędkości obrotowej silnika n i obciążenia momentem obrotowym T_{tq} , pozostałych wielkości wejściowych. Temu zagadnieniu autor zamierza poświęcić w najbliższej przyszłości swoją uwagę.

Bibliografia

1. Koško M., Osińska M., Stepińska J.: Ekonometria współczesna. TONiK. Toruń 2007.
2. Piaseczny L. i inni: Metody ograniczenia emisji związków toksycznych tłokowych silników spalinowych eksploatowanych w siłowniach okrętowych. Sprawozdanie z projektu badawczego nr T12D 006 13. AMW, Gdynia 2000.
3. Piaseczny L., Zadrąg R.: The influence of selected damages of engine ZS type on the changes of emission of exhaust gas componente, COMBUSTION ENGINES, 2009-SC1, ISSN 0138-0346, Poznań, 2009
4. Zadrąg R. i inni: Modele identyfikacji stanu technicznego silnika na podstawie oceny emisji składników spalin. Sprawozdanie z projektu badawczego nr 4T12D 055 29. AMW, Gdynia 2008.
5. Zadrąg R.: The multi-equational models in the analysis of results of marine diesel engines research, JOURNAL OF POLISH CIMAC, Vol. 4, No. 2, ISSN 1231-3998, ISBN 83-900666-2-9, Gdańsk, 2009.

CRITERIA OF CHOOSING THE DIAGNOSTIC PARAMETER FOR THE MARINE DIESEL ENGINE DIAGNOSIS

Abstract: Change of some structure parameters of engine influence on the change of toxic compounds emissions. First of all this concerns following damages in the system of load exchange and in the fuel system and supercharge system of engine as well. The paper presents the diagnostic model of engine where diagnostic symptoms are factors and characteristics of gas emissions of exhausts compounds. The model has been supplemented with test results on the test stand of single-cylinder test engine ZS. Test on the model shows different sensitivity of changes of selected structure parameters of engine on diagnostic parameters.

Keywords: exhaust components of engine, vessel engines, engine diagnostic