

## DIAGNOZOWANIE OKRĘTOWYCH TURBINOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH Z ZASTOSOWANIEM METOD STATYSTYCZNYCH

Andrzej ADAMKIEWICZ

AKADEMIA MARYNARKI WOJENNEJ, Wydział Mechaniczno-Elektryczny,  
Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Okrętu, ul. Śmidowicza 69, 81-103 Gdynia, e-mail: [aadam@amw.gdynia.pl](mailto:aadam@amw.gdynia.pl)

### Streszczenie

Referat prezentuje statystyczną metodę przetwarzania wyników eksploatacyjnych pomiarów parametrów pracy w diagnozowaniu okrętowych turbinowych silników spalinowych. Wartości zmiennych jednej sekwencji czasowej obserwacji przyporządkowane są losowym zakresom obciążeń silników. Powoduje to konieczność przetwarzania wyników pomiarów w celu stworzenia warunków porównywalności estymowanych wartości parametrów na jednakowych zakresach obciążeń silników z wartościami dopuszczalnymi. Badając związki między zmiennymi zastosowano metodę funkcji opisującej do diagnozy chwilowej. Przedstawiono algorytm zastosowania elementów analizy regresji do diagnozy chwilowej oraz wybrane wyniki badań.

Słowa kluczowe: okrętowy turbinowy silnik spalinowy, diagnoza, parametry pracy, modele regresji.

### DIAGNOSING MARINE GAS TURBINE ENGINE WITH THE APPLICATION OF STATISTICAL METHODS

#### Summary

This paper presents a statistical method of transformation of experimental results of operational parameters for diagnosing marine turbine engines. Values of variables of one observation time sequence are assigned to random ranges of engine loads. It leads to the necessity of transformation of experimental results in order to obtain comparable conditions for the estimated values of parameters at engine load ranges equivalent to those of accepted values. A descriptive function for instant diagnosis have been used. Algorithm for application of elements of regression analysis and selected experimental results have been presented.

Keywords: marine gas turbine engine, diagnosis, operation parameter, regression model

## 1. WPROWADZENIE

Konieczność przejścia na dynamiczne sposoby utrzymania turbinowych silników spalinowych na okrętach dyktuje wdrożenie strategii eksploatacji według rzeczywistego stanu silników. Ograniczenie dostępu przez producentów do informacji o charakterystykach silników spowodowało poszukiwanie nowych metod wykorzystania parametrów pracy, zapewniających wiarygodną jednoznaczną diagnozę chwilową, lokalizację niesprawności oraz prognozowanie czasu, do osiągnięcia przez parametry wartości granicznych.

Referat przedstawia metodę przetwarzania wyników pomiarów zarejestrowanych w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych, dostosowaną do potrzeb diagnozy chwilowej, okrętowych turbinowych silników spalinowych. Integralną składową prezentowanej metody stanowi zastosowanie regresji wielokrotnej do estymacji predykcji w prognozowaniu stanu silników, co będzie przedmiotem oddzielnej publikacji.

## 2. METODA BADAŃ

Wybór momentu obserwacji parametrów pracy silników turbinowych wyznacza bieżąca realizacja zadań okrętu, a losowy charakter jej wyników jest konsekwencją: warunków atmosferycznych i hydrometeorologicznych w akwencie pływania, stanu charakterystycznego układu energetycznego okrętu w momencie obserwacji oraz oddziaływania czynników nie uwarunkowanych wykonywaniem funkcji użytkowych. Pomiarów wykonywane są podczas funkcjonowania układu energetycznego okrętu, a kolejne obserwacje rozdzielają różne okresy czasu. Uwarunkowania takie spowodowały konieczność specjalnego sposobu opracowania wyników pomiarów, uwzględniającego:

- eliminację wpływu zmiennych warunków eksperymentu na wyniki pomiarów,
- konieczność opisu wyników pomiarów parametrów pracy każdej obserwacji zależnością: parametr pracy jako funkcja mocy silnika,
- historię użytkowania w ocenie wpływu czasu, na wartości mierzonych parametrów.

Badania przeprowadzono dla temperatury spalin za turbiną, ciśnienia powietrza za sprężarką i ciśnienia paliwa za pompą wysokiego ciśnienia dwóch, jednowirnikowych silników pomocniczych typu GTU-6A układu energetycznego niszczyciela [1,2].

### 3. ELIMINACJA WPŁYWU ZMIENNYCH WARUNKÓW EKSPERYMENTU NA WYNIKI POMIARÓW

Wartości zmiennych w wieloelementowej próbie jednej sekwencji obserwacji przyporządkowane są losowym zakresom obciążeń silników. Powoduje to konieczność przetwarzania wyników pomiarów w celu stworzenia warunków porównywalności wartości parametrów sygnałów diagnostycznych z parametrami wzorcowymi, na jednakowych zakresach obciążeń silników.

W projektowych warunkach pracy okrętowy turbinowy silnik spalinowy jest zasilany paliwem spełniającym wymagania standardu wytwórcy oraz powietrzem o parametrach atmosfery wzorcowej zgodnie z ISO 2314. Minimalizację wpływu warunków środowiska okrętowego na wyniki badań zapewniono:

- w zakresie realizacji eksperymentu, zasilając wszystkie silniki paliwem i powietrzem o składzie i własnościach zalecanych przez wytwórcę,
- w zakresie opracowania wyników pomiarów:
  1. redukując wyniki pomiarów poszczególnych obserwacji, do parametrów atmosfery wzorcowej za pomocą związków wynikających z dynamicznego podobieństwa przepływów,
  2. stosując w opracowaniu wyników pomiarów i modelach silników normowane: zmienne stanu, moc i czas pracy.

Podczas  $k$ -tej obserwacji, dokonywano rejestracji wartości parametrów przy różnych, technicznie niepowtarzalnych mocach silników. Ich stan energetyczny definiowały niezależne parametry stanu, zmienne sterujące oraz parametry powietrza atmosferycznego, składające się na parametry sygnału diagnostycznego, w postaci:

$$P_{ekz} = \Omega_1(d_{1kz}, \dots, d_{ikz}, p_{0k}, T_{0k}, \theta_k) \quad (1)$$

gdzie dla mocy silników  $P_{ekz}$  wartości parametrów pracy oznaczono odpowiednio  $d_{1kz}, d_{2kz}, \dots, d_{ikz}$ .

### 4. DOBÓR FUNKCJI OPISUJĄCEJ OBSERWOWANE PARAMETRY

Celem zastosowania funkcji opisującej wyniki pomiarów parametrów pracy silnika turbinowego z jednej sekwencji czasowej jest:

- pozyskanie narzędzia do porównywania wartości parametru pracy na jednakowych mocach silnika: w stanie obserwacji i wzorcowym np. dopuszczalnym,
- ocena stopnia rozrzutu tegoż parametru i tworzenia korelacji z innymi parametrami.

*Brak takich związków eliminuje parametr jako przydatny diagnostycznie.*

Przyporządkowując mocy jeden parametr sygnału diagnostycznego określano powiązania między zaobserwowanymi wartościami poszczególnych parametrów i mocą silnika ( $d_{ik}, P_{ek}$ ) w postaci funkcji regresji I stopnia. Jej obraz graficzny dla trzech wybranych parametrów pracy silnika jednowirnikowego, dla kilku kolejnych obserwacji indeksowanych normowanym czasem pracy, przedstawiono w pracy [2]. Przypisując wartościom zmiennych niezależnych średnie warunkowe zmiennej zależnej zdefiniowano zależności między analizowanymi zmiennymi w postaci [2,3]

$$\hat{D}_{ik} = f(P_e) = \alpha + \beta \bar{P}_{ei} + \varepsilon \quad (2)$$

gdzie:

$\hat{D}_{ik}$  - zbiór wartości teoretycznych wyznaczonych dla mocy normowanej  $\bar{P}_e$ , która jest przybliżeniem wartości faktycznej,

$\alpha, \beta$  - parametry liniowej funkcji regresji,

$\varepsilon$  - składnik losowy, wyrażający wpływ wszystkich czynników, które obok  $P_e$  wpływają na zmienną objaśnianą.

Bezpośrednio zależność taka w diagnostowaniu silników turbinowych jest nieprzydatna, a postać analityczna funkcji jest nieznana. Zmierzone wartości parametrów pracy dla ustalonej mocy silnika są zmiennymi niezależnymi. W bezdemontażowej diagnozie chwilowej, wartości parametrów pracy występujących w prawych stronach zależności (1) są porównywane z wartościami parametrów stanów dopuszczalnych

$$\mathfrak{R}_2(D_{k,dop}) \in D_k \times D_{dop} \quad (3)$$

i granicznych

$$\mathfrak{R}_2(D_{k,gr}) \in D_k \times D_{gr} \quad (4)$$

zgodnie z relacjami diagnostycznymi drugiego rodzaju. Jednak porównania te mogą być dokonywane jeżeli zapewniono:

- stały poziom zakłóceń, osiągnięty przez redukcję zmierzonych parametrów do wartości, jak przy parametrach atmosfery wzorcowej,
- jednakowe moce silników, najwygodniej takie same, dla jakich producent wyznaczył wartości dopuszczalne i graniczne parametrów.

O ile pierwsze wymaganie jest spełniane bez trudności przy przetwarzaniu wyników pomiarów, to realizacja drugiego powoduje konieczność opracowania metody budowy relacji II rodzaju [3,4]. Wstępnego doboru analitycznej postaci modeli regresji dokonywano na podstawie:

- źródeł poza statystycznych dotyczących badanej dziedziny zjawiska, np. na podstawie obrazu graficznego parametrów funkcyjnych, wyznaczonych przez producenta dla stanów wzorcowych silników,
- wykresu rozrzutu parametrów,

– analizy materiału statystycznego.

Obraz graficzny linii regresji podpowiada typ funkcji opisującej powiązanie między badanymi parametrami. Zapisana w ogólnej postaci zależność

$$\hat{d}_{ik} = f(a, b, \bar{P}_e) \quad (5)$$

może okazać się typu liniowego lub nieliniowego. Wartości parametrów funkcji liniowej szacowano na podstawie  $z$  – elementowej próby, składającej się z par obserwacji  $(d_{ik}, P_{eik})$ , a poszukiwana funkcja regresji posiada wówczas postać

$$\hat{d}_{ik} = a + b\bar{P}_e + e_i \quad (6)$$

gdzie:  $a, b$  – parametry regresji, szacowane klasyczną metodą najmniejszych kwadratów [3,4],

$$e_i = d_i - \hat{d}_i - \text{zmienna losowa.}$$

Poszukując funkcji opisującej wyniki pomiarów parametrów pracy dla każdej serii pomiarowej, rozpatrywano liniowe modele regresji w postaci

$$\hat{d}_i = \hat{a} + \hat{b}\bar{P}_e \quad (7)$$

oraz nieliniowe, wykładnicze

$$\hat{d}_i = \hat{a} \exp(\hat{b}\bar{P}_e) \quad (8)$$

Zaletą modeli regresji (7) i (8), w odróżnieniu od innych typów, np. wielomianowych, potęgowych itp. modeli, jest dogodność fizycznej interpretacji wartości ich współczynników oraz najlepsza korelacja z wynikami eksperymentu. Zakładając początkowo, że czas pracy silników nie wpływa na wartości mierzonych wielkości w sekwencjach czasowych obserwacji, wyboru funkcji opisującej dokonywano po weryfikacji przyjętej hipotezy o postaci funkcji, kierując się wartościami [3,4]:

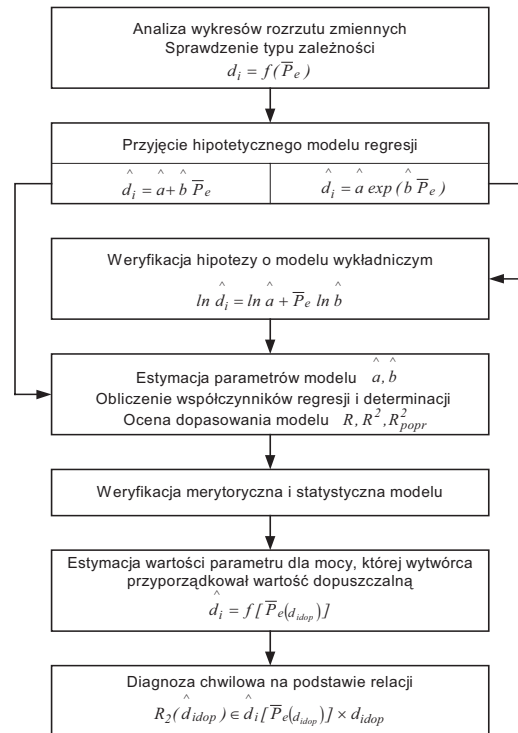
- współczynników korelacji liniowej Pearsona  $R$ ,
- współczynnika determinacji  $R^2$ ,
- poprawionego współczynnika determinacji dla modeli nieliniowych, jako miary skorygowanej liczbą stopni swobody.

Dla każdej serii pomiarowej wyznaczono równanie opisujące zależność wartości parametru pracy od wartości mocy, zgodnie z przyjętym modelem. Weryfikacji hipotezy w przypadku doboru funkcji wykładniczej dokonywano dokonując jej linearyzacji przez logarytmowanie. Na rys. 1 przedstawiono zastosowany algorytm elementów analizy regresji dla serii pomiarowej jednej obserwacji. Otrzymane modele określone zostały dla stanu technicznego silników w chwili obserwacji. Wnioski wynikające z estymowanych przy ich pomocy relacji parametrów z wartościami dopuszczalnymi i granicznymi, mogą stanowić podstawę diagnozy chwilowej.

### 3. WYNIKI BADAŃ I PODSUMOWANIE

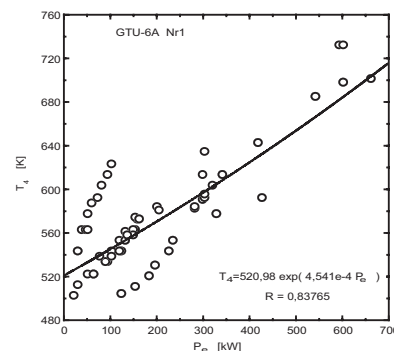
Niewielkie różnice wyznaczonych wartości współczynników regresji modeli liniowego i wykładniczego tej samej obserwacji oraz niepewności błędów estymacji ich parametrów spowodowały, iż

podjęto próbę poprawy wiarygodności oceny parametrów modeli, przez zastosowanie modeli uwzględniających historię użytkowania silników.



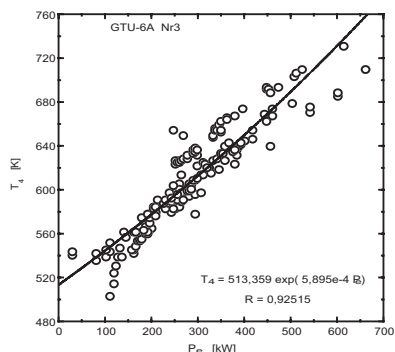
Rys. 1. Algorytm zastosowania elementów analizy regresji do diagnozy chwilowej

Zweryfikowana hipoteza postaci funkcji opisującej, jednakowa dla wszystkich serii pomiarowych każdego z parametrów sygnału diagnostycznego silnika była podstawą do doboru typu funkcji opisującej wyniki wszystkich obserwacji. Na rys. 2 – 6 przedstawiono graficznie dobrane typy modeli regresji, wraz z postaciami matematycznymi funkcji, o najwyższych wartościach współczynników korelacji.

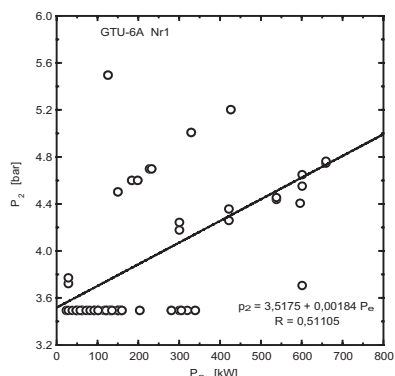


Rys. 2. Wykres opisujący rozrzut temperatury spalin za turbiną jako funkcji mocy silnika GTU – 6A Nr 1

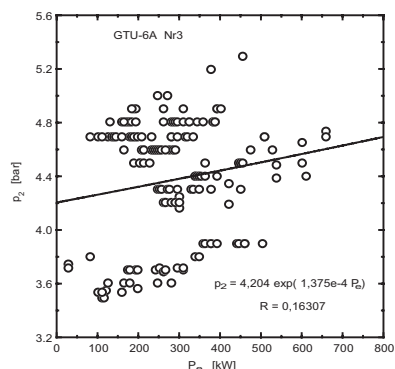
Najsilniejsze związki korelacyjne wykazała wśród nich temperatura spalin za turbiną, opisana funkcją wykładniczą i potwierdzona wynikami dla dwóch silników (rys. 2 i 3). Analizowane modele wykazały zdecydowanie słabsze związki korelacyjne ciśnienia powietrza za sprężarką przy czym dla silnika Nr 1 (rys. 4) okazał się nim model liniowy, dla silnika



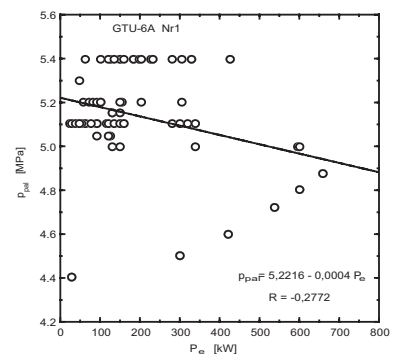
Rys.3. Wykres opisujący rozrzut temperatury spalin za turbiną jako funkcji mocy silnika GTU – 6A Nr 3



Rys.4. Wykres opisujący rozrzut ciśnienia powietrza za sprężarką jako funkcji mocy silnika GTU – 6A Nr 1



Rys. 5. Wykres opisujący rozrzut ciśnienia powietrza za sprężarką jako funkcji mocy silnika GTU – 6A Nr 3



Rys. 6. Wykres opisujący rozrzut ciśnienia paliwa za pompą wysokiego ciśnienia jako funkcji mocy silnika GTU – 6A Nr 1

Nr 3 wykładniczy (5). Mało przydatne w diagnozowaniu okazało się ciśnienie paliwa (rys. 6), ujawniając prawie całkowity brak związków korelacyjnych z mocą. Tym samym, zmierzone wartości parametrów pracy i uzyskane modele poświadczą najbardziej wiarygodną przydatność w diagnozowaniu temperatury spalin za turbiną, mniejszą ciśnienia powietrza za sprężarką oraz minimalną ciśnienia paliwa.

## LITERATURA

- [1] Adamkiewicz A.: *Possibilities of marine gas turbine engine maintenance decisions based on regression analysis of measurements results of a chosen operational parameter*. Marine Technology Transactions, Polish Academy of Sciences, Branch in Gdańsk 2002, Vol 13.
- [2] Adamkiewicz A., Pakuła M.: *Temperatura spalin wylotowych jako ogólny parametr diagnostyczny okrętowych silników spalinowych*. Politechnika Radomska, Instytut Technologii Eksploatacji, Problemy Eksploatacji – Zeszyty Naukowe 4/2001, Radom 2001.
- [3] Bobrowski D.: *Probabilistyka w zastosowaniach technicznych*. WNT W-wa 1986.
- [4] Greń J.: *Statystyka matematyczna. Podręcznik programowany*. PWN, Warszawa 1987.



Andrzej ADAMKIEWICZ  
dr inż., ukończył studia na Wydz. Technicznym Wyższej Szkoły Mar. Woj. w Gdyni, uzyskując w 1971 r. dyplom inżyniera elektro-mechanika. W latach 1971-1973 pełnił funkcję oficera mechanika na okręcie szkolnym Mar. Woj. W 1976 r ukończył specjalistyczne studia magisterskie II stopnia na Wydziale Budownictwa Okrętowego Akademii Marynarki Wojennej w Leningradzie, na kierunku: okrętowe napędy paro i gazo - turbinowe, po czym rozpoczął pracę na Wydziale Mechaniczno – Elektrycznym Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni. Doktoryzował się w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku (promotor prof. dr hab. inż. Jerzy Krzyżanowski), badając zagadnienie wpływu dwufazowego aerozolu morskiego na pracę okrętowego silnika turbospalinowego. Prowadzi zajęcia dydaktyczne z okrętowych turbinowych silników spalinowych. W latach 1991 – 2004 pełnił funkcję prodziekana ds. dydaktycznych WME AMW. Zainteresowania naukowe obejmowały zagadnienia eksploatacji turbinowych silników spalinowych w układach energetycznych okrętów. Opublikował cztery skrypty, podręcznik oraz ponad 70 artykułów i referatów w czasopiśmie o zasięgu krajowym i zagranicznym. Jest wice-prezydentem Rady Technicznej Polskiego Rejestru Statków w Gdańsku. Był współorganizatorem kilku konferencji naukowych, między innymi, takich jak: Kongres Diagnostyki Technicznej 1996 r., Inżynieria Łożyskowania 1999 r., Arbeitsgemeinschaft Turbomaschinen`2001.