

Bogdan Pojawa
Kamil Borsuk
Akademia Marynarki Wojennej

**WYZNACZENIE CHARAKTERYSTYKI
WSPÓŁPRACY OKRĘTOWEGO TURBINOWEGO
SILNIKA SPALINOWEGO
Z ODBIORNIKIEM ENERGII
Z WYKORZYSTANIEM TECHNIKI
PLANOWANIA EKSPERYMENTU**

STRESZCZENIE

Proces eksploatacji okrętowych turbinowych silników spalinowych opiera się na ich charakterystykach, w tym na charakterystyce współpracy silnika z odbiornikiem energii, szczególnie jeżeli odbiornikiem energii jest śruba o skoku nastawnym. Dokumentacja okrętowa często nie zawiera tego rodzaju charakterystyk. Istnieje zatem potrzeba opracowania metody jej wyznaczenia. Podejmując się próby wyznaczenia charakterystyki współpracy wybranego turbinowego silnika spalinowego z odbiornikiem energii, postanowiono dokonać tego w sposób analityczny, z wykorzystaniem techniki planowania eksperymentu. Mając na uwadze wstępny charakter badań, postanowiono je wykonać na stanowisku laboratoryjnym z turbinowym silnikiem spalinowym GTD-350 współpracującym z hamulcem wodnym Froude'a. W artykule przedstawiono podstawy teoretyczne planowania doświadczeń, sposób realizacji badań wstępnych oraz ich wyniki. Dla otrzymanych wyników badań przeprowadzono badanie adekwatności, w tym analizę statystyczną i merytoryczną. Na podstawie otrzymanych wyników badań adekwatności sformułowano wnioski.

Słowa kluczowe:

charakterystyki okrętowych turbinowych silników spalinowych, planowanie doświadczeń, plan eksperymentu, okrętowy turbinowy silnik spalinowy.

WSTĘP

Podczas eksploatacji wielosilnikowych układów napędowych bardzo ważnym zagadnieniem jest równomierność obciążania silników napędowych. Jest to

szczególnie ważne w przypadku, gdy występuje praca dwóch lub więcej silników na jedną linię wałów. Istnieje wiele sposobów realizacji równomierności obciążeń pracujących silników, jednak najlepszym rozwiązaniem jest sterowanie ich pracą według momentu obrotowego, który w sposób bezpośredni wyraża ilość dysponowanej energii mechanicznej. W takich przypadkach bardzo ważne są charakterystyki współpracy silników napędowych z odbiornikiem energii. Pozwalają one na określenie zastosowań silników oraz analizę ich osiągnięć, tym samym pozwalają na ustalenie strategii i kosztów ich eksploatacji. Charakterystyka współpracy pozwala eksploatacatorowi na sterowanie równomiernością obciążeń silników zgodnie z charakterystyką lub jej wykorzystanie w automatycznych układach sterowania. Przykładem może być tutaj układ automatycznego sterowania obciążeniem okrętowego turbinowego silnika spalinowego LM 2500. Układ ten realizuje program utrzymania stałej prędkości pływania okrętu, dobierając odpowiedni skok śruby nastawnej oraz wielkość strumienia paliwa. Realizacja równomierności obciążeń przebiega w oparciu o moment obrotowy wyznaczany nie na podstawie pomiaru, a na podstawie parametrów termogazodynamicznych. Realizuje to tzw. komputer momentu obrotowego, który online wyznacza moment obrotowy turbiny napędowej na podstawie pomiaru wybranych parametrów pracy silnika. Wobec braku modelu matematycznego, według którego jest on wyznaczany, wystąpiły problemy w okresowej jego weryfikacji, na przykład podczas badań diagnostycznych.

Powyższe stało się inspiracją do podjęcia badań wstępnych, których celem było opracowanie wiarygodnego modelu matematycznego pozwalającego wyznaczyć charakterystykę dla różnych warunków współpracy okrętowego turbinowego silnika spalinowego ze śrubą o skoku nastawnym. Do wyznaczenia modelu matematycznego przedmiotowej charakterystyki wykorzystano teorię planowania eksperymentu, która jednocześnie pozwala na racjonalne i efektywne badania. Przeprowadzono je na stanowisku laboratoryjnym z turbinowym silnikiem spalinowym GTD-350.

PODSTAWY TEORII PLANOWANIA EKSPERYMENTU

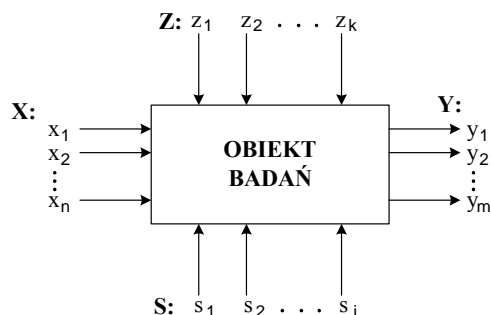
Teoria planowania eksperymentu ma charakter ogólny, niezależny od dyscypliny naukowej, łącząc w sobie teorię doświadczeń oraz teorię pomiarów. Stanowi całość czynności mających na celu wyznaczenie zależności funkcyjnych między wielkościami charakteryzującymi rozpatrywany obiekt badań. Obejmuje sobą modelowanie matematyczne, planowanie doświadczeń (eksperymentów) oraz statystyczną i merytoryczną analizę wyników pomiarów [1, 5].

M o d e l o w a n i e stanowi całość czynności związanych z określeniem zasady funkcjonowania obiektu badań. Obiektem badań doświadczalnych może być urządzenie lub zespół urządzeń, a także zbiór zdarzeń związanych z funkcjonowaniem zespołu urządzeń nazywany procesem [1, 5]. Celem modelowania jest uzyskanie wiarygodnego modelu matematycznego (z założonym stopniem uproszczenia), umożliwiającego przedstawienie rzeczywistego funkcjonowania i zachowywania się obiektu badań w różnych warunkach jego pracy [5]. W badaniach maszyn i urządzeń technicznych można wyróżnić następujące cele tworzenia modeli:

- dla potrzeb projektowania, gdzie model służy do optymalizacji struktury i parametrów konstruowanego obiektu i jest narzędziem oceny „jakości” konstrukcji, eliminacji słabych ogniw itp.;
- dla potrzeb diagnostyki, gdzie model jest podstawą do ustalenia algorytmu diagnozowania, który prowadzi do określenia stanu aktualnego (diagnozy) i przyszłego obiektu (prognozy);
- dla potrzeb użytkowania i sterowania, wykorzystującego model do podejmowania decyzji związanych z funkcjonowaniem obiektu (decyzje eksploatacyjne).

Model matematyczny obiektu badań określa się za pomocą właściwych dla niego wielkości fizycznych, pomiędzy którymi zachodzą zależności o charakterze przyczynowo-skutkowym. Zależności te są odwzorowaniem aktualnie posiadanej wiedzy o obiekcie badań, stąd też modele podlegają procesowi ciągłego doskonalenia. Przy budowie modelu matematycznego w pierwszej kolejności korzysta się z podstawowych praw i aksjomatów fizyki, wyrażających równowagę sił, momentów, bilanse energetyczne itp. Umożliwiają one analizę teoretyczną obiektu badań, która może być niezależna od badań doświadczalnych. Jeżeli jednak nieznane są podstawy teoretyczne lub zjawiska występujące w obiekcie badań są szczególnie złożone, można postępować odmiennie. Należy wówczas utworzyć model jakościowy, następnie opracować plan doświadczenia, a po zrealizowaniu doświadczenia i analizie wyników dążyć za pomocą funkcji obiektu badań, będącej jedynie funkcją aproksymującą, do utworzenia modelu matematycznego obiektu badań. Dążąc do utworzenia modelu matematycznego, należy uwzględnić to, że model jest pojęciem idealnym, abstrakcyjnym, który tworzy się na podstawie pewnych, ustalonych z góry założeń upraszczających. Model jest więc zawsze „prawdziwy” jako pojęcie matematyczne, natomiast dyskusji podlega jego adekwatność do rzeczywistego obiektu badań. Można więc stwierdzić, że obiekt badań jest tylko jeden, natomiast modeli matematycznych może być wiele. Należy więc wybrać najbardziej odpowiedni model matematyczny, uwzględniający przyjęte kryteria adekwatności do rzeczywistego obiektu badań.

Obiekt badań doświadczalnych może być przedstawiony w postaci tzw. „czarnej skrzynki” [1, 5], którą przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Wielkości charakteryzujące obiekt badań: X — wielkości wejściowe; Y — wielkości wyjściowe; Z — wielkości zakłócające; S — wielkości stałe

Źródło: Z. Polański, *Planowanie doświadczeń w technice*, PWN, Warszawa 1984.

Tak przyjęty obiekt badań określa się za pomocą właściwych dla niego wielkości fizycznych wyjściowych Y , zależnych od wielkości wejściowych X (wielkości niezależne), przy jednoczesnym oddziaływaniu czynników zakłócających Z oraz istnieniu czynników stałych S [1, 5]. Powyższa relacja może być zapisana w postaci:

$$y_m = f(x_1, x_2, \dots, x_n, z_1, z_2, \dots, z_k, s_1, s_2, \dots, s_j). \quad (1)$$

Przedstawiona zależność stanowi jakościowy model matematyczny obiektu badań, na podstawie którego, w wyniku badań doświadczalnych, możliwe jest wyznaczenie funkcji obiektu badań [1, 5]. W zależności tej wielkości wejściowe są wielkościami sterującymi obiektem badań, określającymi warunki jego działania. Wielkości wyjściowe są wielkościami decydującymi o podstawowych właściwościach obiektu badań z punktu widzenia przyjętych kryteriów (fizycznych, technicznych itp.). Czynniki zakłócające są znane i mierzalne, lecz celowo pomijane albo znane, lecz niemierzalne, albo nieznanne, a ich wpływ jest przypadkowy. Natomiast wielkości stałe są wielkościami, których wpływ z różnych względów nie interesuje badacza, jednak mogą określać obszar warunków prowadzonych badań. Często uznawane są za wielkości umowne, które dla skrócenia zapisu wyłączane są z zależności (1) opisującej jakościowy model matematyczny obiektu badań [5].

Funkcję obiektu badań można wyznaczyć jako zależność aproksymującą wyniki pomiarów [5, 6]. W ujęciu ogólnym zagadnienia aproksymacji funkcji obiektu badań dotyczą:

- wyboru funkcji mającej stanowić funkcję obiektu badań;
- wyboru metody aproksymacji wyników pomiarów za pomocą wybranej funkcji.

Funkcja obiektu badań powinna w prostej, skondensowanej postaci równania matematycznego opisywać wyniki przeprowadzonych doświadczeń. Dlatego też wybór funkcji obiektu badań spośród wielu możliwych funkcji aproksymacyjnych powinien uwzględniać zalecenia wynikające z analizy podstaw teoretycznych zjawisk występujących w obiekcie badań oraz dążenie do zgodności z wynikami pomiarów.

Zagadnienie aproksymacji wyników badań doświadczalnych dotyczy zastąpienia z określoną dokładnością zbioru wartości wielkości wyjściowych $\{y\}$, stanowiących wyniki pomiarów odpowiadających układowi wartości wielkości wejściowych $\{x\}$, pewną funkcją [5]:

$$\check{y} = \check{F}(x) \sim y = F(x). \quad (2)$$

Aproksymacja obarczona jest pewnym błędem (tzw. błędem aproksymacji), który należy oszacować [5, 6]. Do najczęściej stosowanych metod aproksymacji, znajdujących szersze zastosowanie praktyczne w badaniach doświadczalnych, zalicza się metody:

- najmniejszych kwadratów;
- interpolacji;
- interpolacji za pomocą funkcji sklepanych;
- analizy częstotliwościowej.

Kolejnym etapem badań jest planowanie doświadczenia (eksperymentu) polegające na przyjęciu odpowiedniego programu doświadczenia, według którego będą wykonywane pomiary. Program ten często nazywany jest planem doświadczenia (programem pomiarów). Pomiary powinny być wykonane z zachowaniem wymaganej niepewności pomiaru, z uprzednio wykonaną kalibracją torów pomiarowych. Wybór właściwego programu doświadczenia stanowi jedną z ważniejszych decyzji, którą podejmuje się zaraz na początku badań doświadczalnych [1, 5]. Na tę decyzję mają wpływ trzy podstawowe przesłanki:

- informacja o obiekcie badań, zwłaszcza o rodzaju obiektu i jego właściwościach;
- celowość badań, zwłaszcza określenie, czy badania mają charakter poznawczy czy użytkowy;
- określenie jakościowego modelu matematycznego (funkcji) obiektu badań, związanego bezpośrednio ze stanem znajomości właściwych temu modelowi podstaw teoretycznych.

Wybór funkcji obiektu badań spośród wielu możliwych funkcji aproksymacyjnych to kompromis uwzględniający [1, 5]:

- zalecenia wynikające z analizy podstaw teoretycznych zjawisk występujących w obiekcie badań;
- dążenie do zgodności z wynikami pomiarów — funkcja obiektu powinna w prostej, skondensowanej postaci równania matematycznego opisywać wyniki przeprowadzanych doświadczeń.

Dodatkowo należy dążyć do [1, 5]:

- wygodnego i praktycznego sposobu wykorzystania otrzymanej funkcji obiektu badań; wyraża się to np. zgodnością z tradycją „wzorów” stosowanych w danej dyscyplinie naukowej, łatwością obliczeń inżynierskich, a nawet tym, aby wzór nie był zbyt „długi”;
- uproszczenia technologii aproksymacji, czyli stosowania prostych pod względem rachunkowym sposobów aproksymacji.

Wybierając konkretny program doświadczenia, należy wziąć pod uwagę (poza powyższymi przesłankami) jego cechy i możliwe zastosowania, z uwzględnieniem trzech podstawowych kryteriów [1, 5]:

1. Realizowalności — należy sprawdzić, czy program doświadczenia jest możliwy do realizacji dla danego obiektu badań przy zastosowaniu określonych metod i środków pomiarowych. W praktyce oznacza to, że wielkości wejściowe muszą być mierzalne z niepewnością mniejszą od zakresu zmian narzucanych przez program oraz obiekt badań musi prawidłowo funkcjonować w przyjętych układach (skojarzeniach) wartości wielkości wejściowych.
2. Informatywności — określa zdolność programu do dostarczenia takiej ilości informacji na temat obiektu badań, która pozwoli spełnić ich cel. Praktycznie kryterium to sprowadza się do sprawdzenia, czy dany program doświadczenia umożliwia utworzenie modelu matematycznego obiektu badań. Każdy program doświadczenia, dla którego liczba układów n (punktów pomiarowych) jest nie mniejsza od niewiadomej liczby współczynników N_b występujących w funkcji obiektu badań, może — przy pewnych warunkach dodatkowych — spełnić tego rodzaju kryterium informatywności:

$$n \geq N_b. \quad (3)$$

Dodatkowo kryterium informatywności utożsamia się z ilościową miarą niedokładności funkcji obiektu badań. Często jest to traktowane jako dodatkowe kryterium — adekwatności. Polega ono na uzyskaniu takiej funkcji obiektu, która dobrze obrazuje jego właściwości zgodnie z przyjętymi kryteriami.

3. Efektywności — polega na sprawdzeniu, czy program doświadczenia, możliwy do realizacji i zapewniający informatywność odpowiadającą celowi badań, jest jednocześnie programem minimalizującym nakłady wymagane do jego realizacji. Sprowadza się to do czasu trwania eksperymentu oraz niezbędnych kosztów, które uzależnione są od liczby pomiarów (układów pomiarowych n).

Istnieje wiele klasyfikacji programów doświadczeń w zależności od przyjętych kryteriów. Powszechnie przyjęty jest ich podział na statyczne oraz dynamiczne. Programy statyczne stosuje się dla statycznych obiektów badań, cechują się one ustaleniem układów wartości czynników badanych x_i przed rozpoczęciem eksperymentu, a wyniki poszczególnych pomiarów nie mają wpływu na jego program [1, 5]. Programy dynamiczne stosuje się natomiast do dynamicznych obiektów badań, charakteryzują się one tym, że kolejne punkty pomiarowe wynikają z poprzednich, na przykład poprzez zastosowanie iteracyjnej metody doboru układów punktów [1, 5]. W badaniach powszechnie stosuje się programy statyczne, które dzieli się na:

1. Zdeterminowane, w których realizuje się wszystkie układy wielkości wejściowych, ustalonych przed rozpoczęciem badań doświadczalnych na podstawie danego programu. W trakcie realizacji programu układy te nie ulegają zmianie.
2. Randomizowane, w których — podobnie jak w programach zdeterminowanych — realizuje się z góry ustalone, jednak wybrane losowo układy wielkości wejściowych. Stosuje się je wówczas, gdy informacje na temat badanego obiektu są ograniczone.
3. Optymalizacyjne, w których pomimo statycznego obiektu badań — podobnie jak w programach dynamicznych — kolejne układy wielkości wejściowych wynikają z poprzednich, a celem tych programów jest uzyskanie ekstremum funkcji obiektu badań.

Dalsza kwalifikacja programów doświadczeń wyróżnia programy kompletne lub selekcyjne. Podstawową cechą planów kompletnych jest to, że liczba układów wartości wielkości wejściowych jest największą liczbą, jaka może być utworzona przy ustalonym zakresie zmienności i przyjętej dyskretyzacji tych wartości. Plany kompletne zapewniają więc maksymalną informatywność kosztem efektywności. W badaniach doświadczalnych należy dążyć do możliwie maksymalnej efektywności przy zachowaniu informatywności. Takie założenia spełniają plany selekcyjne. Plany te utworzone są w wyniku wyboru pewnych układów z programu kompletnego, przy zastosowaniu ewentualnych modyfikacji układów. Zarówno wybór, jak i modyfikacja przeprowadzone są na podstawie różnych zasad i kryteriów. Stąd wynika różnorodność programów selekcyjnych, które dzielą się na dwie zasadnicze grupy [1, 5]:

1. Programy monoselekcyjne, zwane też jednoczynnikowymi. Badania według tego programu wykonuje się w ten sposób, że zmieniając kolejno wartości jednej wielkości wejściowej x , mierzy się wartości wyjściowe z , przy czym pozostałe wielkości wejściowe w tym czasie przyjmuje się jako stałe. W wyniku tego programu otrzymuje się zbiór funkcji obiektu badań, oddzielnie dla każdej wielkości wejściowej x .
2. Programy poliselekcyjne, zwane też wieloczynnikowymi. W programach tych struktura odgrywa rolę nadrzędną i do niej należy dostosować zbiór wartości wielkości wejściowych. Przesłanki pozametodyczne (np. charakterystyka rzeczywistego obiektu badań) mają jedynie wpływ na wybór zakresu (przedziału) wartości wielkości wejściowych. Dyskretyzacja wewnątrz przyjętego przedziału jest całkowicie podporządkowana przyjętemu programowi doświadczenia. Wśród programów poliselekcyjnych wyróżnia się programy: frakcyjne, ortogonalne, rotalne, optymalne oraz specjalne.

Analiza statystyczna stanowi proces przetwarzania danych (wyników pomiarów wykonanych zgodnie z przyjętym programem doświadczenia) w celu wykrywania prawidłowości w badanych zjawiskach i ich interpretowania za pomocą metod statystyki matematycznej. Umożliwia tym samym wyznaczenie funkcji obiektu badań, która może stanowić również jego model matematyczny. Na podstawie wyników analizy statystycznej uzyskuje się użyteczne informacje dotyczące rozpatrywanego obiektu badań oraz formułuje się wnioski z przeprowadzonych badań. Najbardziej popularną miarą dopasowania otrzymanej funkcji obiektu badań do wyników pomiarów jest współczynnik determinacji R^2 . Obok analizy statystycznej należy również przeprowadzić analizę merytoryczną wyników badań. W szczególności dotyczy ona weryfikacji otrzymanego modelu matematycznego na zgodność odbywających się zjawisk fizycznych w rozpatrywanym obiekcie badań, z uwzględnieniem podstaw teoretycznych i zasad jego eksploatacji.

BADANIA WSTĘPNE

Dążąc do wyznaczenia charakterystyki współpracy okrętowego turbinowego silnika spalinowego ze śrubą o skoku nastawnym, z uwagi na zmianę skoku śruby, należy rozpatrywać nie jedną charakterystykę śrubową, ale ich rodzinę. Rodzina tych charakterystyk tworzy pole współpracy turbiny napędowej silnika turbinowego ze śrubą o skoku nastawnym. Z punktu widzenia eksploatatora oraz specyfikacji eksploatacji

okrętowych turbinowych silników spalinowych charakterystyka powinna przedstawiać zależność energii użytecznej doprowadzonej do odbiornika energii wyrażonej przez użyteczny moment obrotowy, w zależności od:

- parametru charakteryzującego stan energetyczny wytwornicy spalin silnika:
 - prędkości obrotowej wytwornicy spalin n_{WS} ,
 - temperatury spalin za komorą spalania T_3 lub za wytwornicą spalin T_{04} ,
 - ciśnienia powietrza za sprężarką p_2
- ☞ najczęściej parametrem tym jest prędkość obrotowa wytwornicy spalin n_{WS} ;
- parametru charakteryzującego współpracę turbiny napędowej silnika ze śrubą, przy określonym jej skoku
- ☞ najczęściej jest to prędkość obrotowa turbiny napędowej n_{TN} .

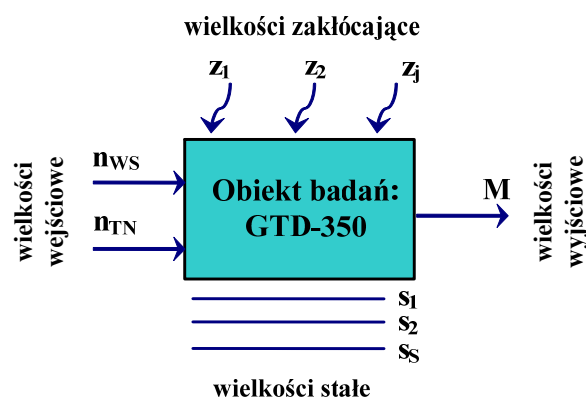
Wyznaczenia modelu matematycznego powyższej charakterystyki dokonano zgodnie z teorią planowania doświadczeń. W pierwszej kolejności dokonano scharakteryzowania oraz określenia zasad funkcjonowania obiektu badań. Badania postanowiono przeprowadzić na stanowisku laboratoryjnym z turbinowym silnikiem spalinowym GTD-350. Stanowisko przedstawia zminiaturyzowany okrętowy układ napędowy z turbinowym silnikiem spalinowym [3, 4]. Jego główne elementy stanowią: dwuwirnikowy turbinowy silnik spalinowy GTD-350, jednostopniowa przekładnia reducyjna H-564 oraz odbiornik energii w postaci hamulca wodnego Froude'a typu HWZ-3. Z uwagi na zasadę działania hamulca obciążanie silnika odbywa się podobnie jak w przypadku jego współpracy ze śrubą napędową o skoku nastawnym. Widok stanowiska przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Stanowisko laboratoryjne z turbinowym silnikiem spalinowym GTD-350

Źródło: zdjęcie wykonane przez autorów.

Następnie dokonano określenia zbioru wielkości charakteryzujących obiekt badań. Wielkości wejściowe stanowiły: prędkość obrotowa wytwornicy spalin n_{WS} oraz prędkość obrotowa turbiny napędowej n_{TN} . Wielkość wyjściową stanowił użyteczny moment obrotowy M . Do zbioru wielkości stałych (S), których wartości nie zmieniają się w trakcie badań, zaliczyć można na przykład parametry struktury rozpatrywanego obiektu badań. Wielkości stałe często pomija się ze względu na założony i niezmienny ich wpływ na wielkości wyjściowe w trakcie badań. Natomiast wielkości zakłócające (Z) to inne parametry, których wartości mogą ulegać zmianie w trakcie doświadczenia i mogą wpływać na wielkość wyjściową. Do tych parametrów zalicza się temperaturę, ciśnienie oraz wilgotność bezwzględna otoczenia lub stan techniczny poszczególnych elementów silnika. Dlatego też w dalszej części badań wyniki pomiarów sprowadzono do normalnych warunków atmosferycznych. Za normalne warunki atmosferyczne (wzorcowe) przyjmuje się: ciśnienie barometryczne $p_{0WZ} = 101325 Pa$, temperaturę bezwzględną $T_{0WZ} = 288,15 K$ i wilgotność bezwzględną $\varphi = 0$ [4]. Wielkości charakteryzujące rozpatrywany obiekt badań przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Wielkości charakteryzujące rozpatrywany obiekt badań

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie zbioru wielkości charakteryzujących obiekt badań, zgodnie z zależnością (1), określono jego jakościowy model matematyczny:

$$M(n_{WS}, n_{TN}) = 0 \quad (4)$$

oraz przyjęto funkcję aproksymacyjną w postaci wielomianu, jak również metodę aproksymacji.

Do najczęściej stosowanych wielomianów aproksymacyjnych stosuje się wielomiany [1, 2, 5]:

- liniowe;
- liniowe z interakcjami (uwzględniające współdziałania);
- kwadratowe;
- kwadratowe z interakcjami I rzędu.

Podczas badań dokonano równoczesnej analizy kilku wielomianów aproksymacyjnych w celu wybrania najbardziej dopasowanego do wyników pomiarów. Do aproksymacji wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów. Biorąc pod uwagę powyższe, przyjęto funkcje obiektu badań w postaci następujących wielomianów:

- liniową bez interakcji, wyrażoną wzorem

$$M = b_0 + b_1 \cdot n_{TN} + b_2 \cdot n_{WS}; \quad (5)$$

- liniową z interakcjami, wyrażoną wzorem

$$M = b_0 + b_1 \cdot n_{TN} + b_2 \cdot n_{WS} + b_{12} \cdot n_{TN} \cdot n_{WS}; \quad (6)$$

- kwadratową bez interakcji, wyrażoną wzorem

$$M = b_0 + b_1 \cdot n_{TN} + b_2 \cdot n_{WS} + b_{11} \cdot n_{TN}^2 + b_{22} \cdot n_{WS}^2; \quad (7)$$

- kwadratową z interakcjami pierwszego rzędu, wyrażoną wzorem

$$M = b_0 + b_1 \cdot n_{TN} + b_2 \cdot n_{WS} + b_{11} \cdot n_{TN}^2 + b_{22} \cdot n_{WS}^2 + b_{12} \cdot n_{TN} \cdot n_{WS}. \quad (8)$$

Kolejnym, bardzo ważnym etapem badań było przyjęcie odpowiedniego programu doświadczenia, według którego będą wykonywane pomiary, umożliwiające wyznaczenie przyjętych wielomianów aproksymacyjnych. Ostatecznie do dalszych badań wybrano program statyczny zdeterminowany, poliselekcyjny, rotalny. Program ten pozwala na wyznaczenie liniowej oraz kwadratowej funkcji obiektu badań, poza tym umożliwia wyznaczenie aproksymowanej wartości wielkości wyjściowej z taką samą dokładnością we wszystkich kierunkach wyznaczonej powierzchni odpowiedzi [1, 5]. Realizacja badań na podstawie programu poliselekcyjnego wymaga merytorycznie uzasadnionego kompromisu pomiędzy informatywnością a efektywnością. Niezbędna jest również wspomniana już realizowalność programu. Warunek ten w przypadku rozpatrywanego obiektu badań sprowadza się do sprawdzenia możliwych skojarzeń wartości n_{WS} i n_{TN} w poszczególnych punktach pomiarowych. Aby błąd aproksymacji był możliwie najmniejszy, poszczególne wartości

wielkości wejściowych powinny odpowiadać pierwiastkom wielomianów Czebyszewa. Pierwiastki te wyznacza się z zależności [1, 5]:

$$\hat{x}(T) = -\cos \frac{\pi \cdot (2 \cdot u - 1)}{2 \cdot n}, \quad (9)$$

gdzie:

- \hat{x} — wartość standaryzowana ($-\alpha, -1, 0, 1, +\alpha$);
- u — kolejny układ (punkt pomiarowy) programu;
- n — liczba układów programu.

Powyższe oznacza, że wielkości wejściowe przekształca się w bezwymiarowe wielkości standaryzowane (nazywane standaryzowaniem wielkości wejściowych) oraz rozwiązuje się dla nich wielomiany Czebyszewa [1, 5].

W programie rotalnym wielkości wejściowe przyjmują pięć wartości, oznaczonych symbolicznie: $-\alpha, -1, 0, 1, +\alpha$. Punkty pomiarowe składające się z kombinacji ± 1 nazywane są jądrem programu, punkty $\pm \alpha$ to tzw. punkty gwiazdne, a punkty zerowe stanowią centrum programu. Korzystając z programu rotalnego, zaleca się zwiększenie liczby pomiarów w centrum programu, szczególnie w przypadku obiektywnej niemożliwości realizacji programu w pewnym jego punkcie [1, 5]. Skorzystano z takiej możliwości i przyjęto nie jeden, a pięć pomiarów w centrum programu.

Wartości rzeczywiste poszczególnych standaryzowanych wielkości wejściowych wyznaczono z zależności:

$$x = \bar{x} + \hat{x} \cdot \Delta x, \quad (10)$$

gdzie:

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2 \cdot \alpha}; \quad (11)$$

$$\bar{x} = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}; \quad (12)$$

\bar{x} — wartość średnia;

α — wielkość standaryzowana planu doświadczenia (stabelaryzowana).

Wartość standaryzowana α nazywana jest wielkością ramienia gwiazdnego i jest stabelaryzowana. W planowanym doświadczeniu dla dwóch wielkości wejściowych ramię gwiazdne wynosi $\alpha = 1,414$ [5]. Program eksperymentu rotalnego dwuczynnikowego bez powtórzeń przedstawiono w tabeli 1. Zakresy wartości wielkości

wejściowych wynoszą: dla prędkości obrotowej wytwornicy spalin $n_{WS} \in \langle 57;80 \rangle$ oraz dla prędkości obrotowej turbiny napędowej $n_{TN} \in \langle 60;100 \rangle$.

Na podstawie powyższego programu dokonano pomiarów dla ustalonych warunków pracy silnika na każdym obciążeniu. Pomiarów dokonano za pomocą stanowiskowego systemu pomiarowo-rejestrującego. Na poszczególnych ustalonych obciążeniach dokonano pomiaru wielkości fizycznych w czasie 10 s, z częstotliwością próbkowania 10 Hz, a następnie uśredniono. W dalszej kolejności wyniki pomiarów sprowadzono do układu jednostek SI lub ich wielokrotności, uwzględniono ciśnienie otoczenia przy wyznaczaniu ciśnień bezwzględnych, a następnie wyniki pomiarów sprowadzono do normalnych warunków atmosferycznych. Na podstawie wyników pomiarów dokonano obliczeń mocy, momentu obrotowego oraz jednostkowego zużycia paliwa dla każdego z zarejestrowanych obciążeń. Prędkości obrotowe wytwornicy spalin n_{WS} oraz turbiny napędowej n_{TN} przedstawiono w [%] z uwagi na fakt występowania tej jednostki na przyrządach kontrolno-pomiarowych, według których sterowano obciążeniem silnika. Przeprowadzenie pomiarów poprzedzone było wykonaniem kalibracji poszczególnych torów pomiarowych wraz z określeniem ich niepewności pomiarowych.

Tabela 1. Program pomiarów wg programu rotalnego dla $n_{WS} \in \langle 57;80 \rangle$ oraz $n_{TN} \in \langle 60;100 \rangle$

Nr punktu pomiarowego u	Miejsce pomiaru	Wartości wejściowe standaryzowane		Wartości wejściowe rzeczywiste jako funkcje wielkości standaryzowanych	
		\hat{n}_{TN}	\hat{n}_{WS}	n_{TN} [%]	n_{WS} [%]
1	jądro pomiaru	-1	-1	65,86	60,37
2		-1	1	65,86	76,63
3		1	-1	94,14	60,37
4		1	1	94,14	76,63
5	punkty gwiazdne	1,414	0	100	68,5
6		-1,414	0	60	68,5
7		0	1,414	80	80
8		0	-1,414	80	57
9	centrum programu	0	0	80	68,5
10		0	0	80	68,5
11		0	0	80	68,5
12		0	0	70	73,5
13		0	0	70	73,5

Źródło: opracowanie własne.

ANALIZA STATYSTYCZNA I MERYTORYCZNA WYNIKÓW BADAŃ

Analizę statystyczną przeprowadzono na podstawie wyników badań. Jej celem było uzyskanie zależności aproksymującej użyteczny moment obrotowy turbiny napędowej od parametrów charakteryzujących stan energetyczny wytwornicy spalin rozpatrywanego silnika, z możliwie najlepszą dokładnością. Do wyznaczenia zależności aproksymacyjnych posłużyły przyjęte wielomiany (5), (6), (7), (8). Powyższe wielomiany aproksymacyjne poddano ocenie statystycznej, posługując się miarami dokładności przybliżenia, do których zalicza się [5, 6]:

- średni błąd szacunku współczynnika regresji S_{bi} ;
- iloraz wartości współczynników regresji i średniego błędu szacunku współczynników regresji $t = \frac{b_i}{S_{bi}}$, który poza wykorzystaniem do oceny dokładności estymacji jest jednocześnie sprawdzianem istotności parametrów w procesie weryfikacji statystycznej modelu;
- sumę reszt MS ;
- współczynnik determinacji R^2 .

Najlepiej dopasowanym wielomianem aproksymacyjnym pod względem statystycznym jest ten, dla którego suma reszt MS jest najmniejsza, a współczynnik determinacji najbliższy jedności. Dodatkowo należy zwrócić uwagę na wartość średniego błędu szacunku [5, 6]. W tabeli 2. zestawiono wartości charakterystycznych wielkości i miar oceny dopasowania funkcji aproksymacyjnych rozpatrywanego obiektu badań.

Mając na uwadze powyższe oraz dane zawarte w tabeli 2. stwierdzono, że najlepszą funkcją obiektu badań jest wielomian stopnia drugiego (kwadratowy) z interakcjami I rzędu, ze względu na najmniejszą sumę reszt oraz najbliższy jedności współczynnik determinacji. Poza tym wielomian ten charakteryzuje się małymi wartościami średniego błędu szacunku, o czym świadczą również wartości ilorazu t . Ostatecznie poszukiwaną zależność aproksymacyjną przyjęto w postaci:

$$M = 3109,007 + 3,009 \cdot n_{TN} - 109,507 \cdot n_{WS} - 0,012 \cdot n_{TN}^2 + 1,169 \cdot n_{WS}^2 - 0,152 \cdot n_{TN} \cdot n_{WS} \quad (13)$$

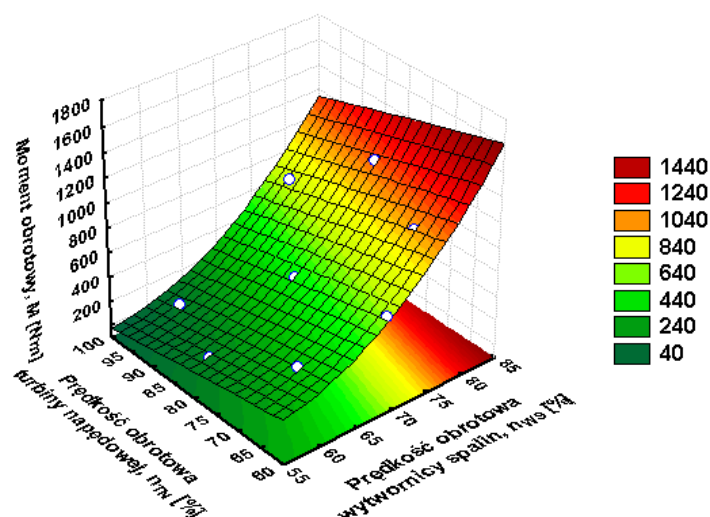
Otrzymany wielomian aproksymacyjny pozwala na wykreślenie zależności użytecznego momentu obrotowego dla dowolnych prędkości obrotowych wytwornicy spalin n_{WS} (charakteryzującej jej stan energetyczny) oraz dowolnych prędkości

obrotowych turbiny napędowej n_{TN} (charakteryzującej jej obciążenie przy współpracy ze śrubą o danym skoku). Zależności użytecznego momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej wytwornicy spalin oraz turbiny napędowej przedstawiono na rysunku 4.

Tabela 2. Zestawienie charakterystycznych wielkości i miar oceny dopasowania funkcji aproksymacyjnych obiektu badań

Lp.	Wielkość		Analizowana funkcja obiektu, $M = f(n_{TN}, n_{WS})$			
			Liniowy (bez interakcji)	Liniowy (z interakcjami I rzędu)	Kwadratowy (bez interakcji)	Kwadratowy (z interakcjami I rzędu)
1	Współczynniki regresji b_i	Stała	-1565	-1905	3873	3109
		n_{WS} (L)	41	46	-119	-110
		n_{WS} (Q)	-	-	1,15	1,17
		n_{TN} (L)	-9,4	-5,24	-7,44	3,01
		n_{TN} (Q)	-	-	-0,01	-0,012
		$n_{WS} \cdot n_{TN}$ (L)	-	-0,06	-	-0,15
2	Średni błąd szacunku S_{b_i}	Stała	243	1790	400	176
		n_{WS} (L)	2,9	26	10	4
		n_{WS} (Q)	-	-	0,07	0,03
		n_{TN} (L)	1,7	22	3,83	1,96
		n_{TN} (Q)	-	-	0,02	0,008
		$n_{WS} \cdot n_{TN}$ (L)	-	0,31	-	0,02
3	Iloraz $t = b_i/S_{b_i}$	Stała	-6,4	-1,06	10	18
		n_{WS} (L)	14	1,78	-12	-29
		n_{WS} (Q)	-	-	16	45
		n_{TN} (L)	-5,6	-0,24	-1,94	1,53
		n_{TN} (Q)	-	-	-0,53	-1,39
		$n_{WS} \cdot n_{TN}$ (L)	-	-0,19	-	-7,4
4	Suma reszt	MS	4603	5094	166	21
5	Współczynnik determinacji	R^2	0,957	0,957	0,998	0,999

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4. Zależność użytecznego momentu obrotowego M w funkcji prędkości obrotowej turbiny napędowej n_{TN} i wytwornicy spalin n_{WS} dla zakresu planu doświadczenia

Źródło: opracowanie własne.

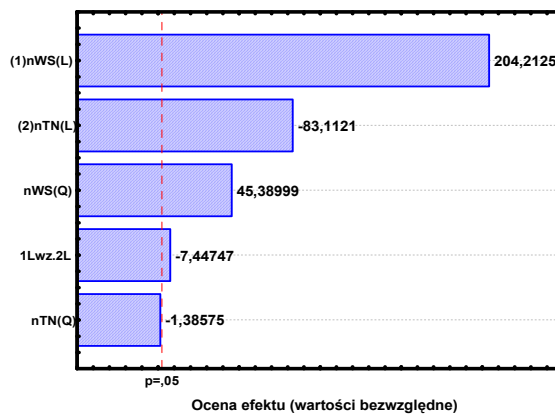
Dokładność oszacowania otrzymanej funkcji aproksymacyjnej przeprowadzono, określając odchylenie standardowe [6]:

$$\sigma[M(n_{TN}, n_{WS})] = 3,5 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (14)$$

oraz na podstawie względnego średniego błędu kwadratowego [6]:

$$\sigma_{M(n_{TN}, n_{WS})} = 0,32\%. \quad (15)$$

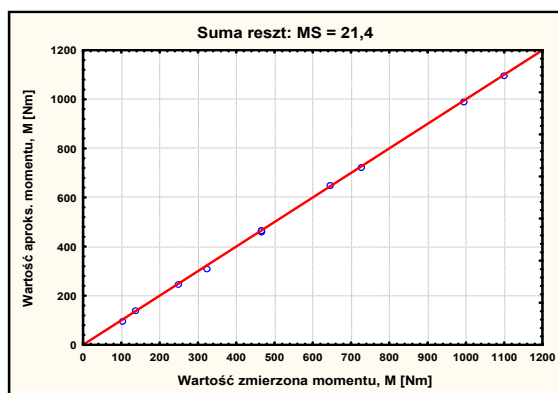
Dodatkowo wykonano wykres oceny efektów dopasowania i wpływu poszczególnych wielkości wejściowych i ich interakcji na moment obrotowy, przyjmując poziom ufności $\alpha = 0,05$, co zaprezentowano na rysunku 5. Z przedstawionego na nim wykresu można odczytać, które efekty wielkości wejściowych mają największy wpływ na określaną wielkość wyjściową. Poszczególne współczynniki są uszeregowane według ich wartości bezwzględnej, co dodatkowo jest zobrazowane w formie słupkowej. Na podstawie wartości współczynników przedstawionych na rysunku 5. stwierdza się, że zarówno prędkość obrotowa wytwornicy spalin, jak i prędkość obrotowa turbiny napędowej mają duży wpływ na użyteczny moment obrotowy. Biorąc pod uwagę przyjętą funkcję obiektu badań (13), najistotniejsze są efekty liniowe, a najmniej istotnym współczynnikiem jest efekt kwadratowy prędkości obrotowej turbiny napędowej.



Rys. 5. Wykres oceny efektów dopasowania i wpływu poszczególnych wielkości wejściowych i ich interakcji na moment obrotowy M

Źródło: opracowanie własne.

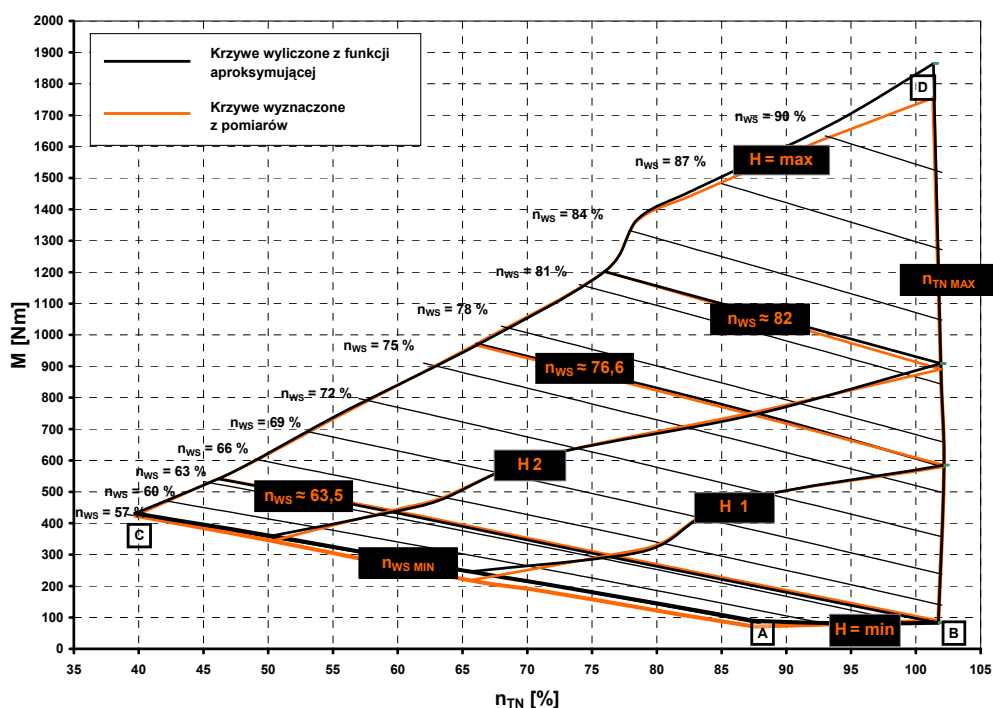
W dalszej kolejności wykonano również wykres zależności wartości zmierzonych i aproksymowanych użytecznego momentu obrotowego, co pokazano na rysunku 6. Dodatkowo umieszczono na nim sumę reszt, która po zaokrągleniu wynosi $MS = 21,4$ N·m. Powyższy wykres może posłużyć do wstępnego badania adekwatności przyjętej funkcji obiektu badań, ponieważ przedstawia porównanie wartości zmierzonej momentu obrotowego podczas pomiarów z wartościami wyliczonymi otrzymanym wielomianem aproksymacyjnym. Przyjęta funkcja obiektu badań dobrze opisuje rzeczywisty obiekt badań, ponieważ kolejne punkty układają się wzdłuż prostej, a suma reszt jest niewielka.



Rys. 6. Zależność wartości zmierzonych i aproksymowanych użytecznego momentu obrotowego M

Źródło: opracowanie własne.

Końcowy etap badań stanowiła analiza merytoryczna wyników badań polegająca na przeprowadzeniu logicznej oceny otrzymanych zależności z rzeczywistymi zjawiskami zachodzącymi w badanym obiekcie. Jedną z najczęstszych form analizy merytorycznej jest badanie adekwatności otrzymanej zależności aproksymacyjnej. Badanie adekwatności polegało na porównaniu charakterystyki współpracy turbiny napędowej silnika ze śrubą o skoku nastawnym dla wybranych nastaw skoku śruby H oraz prędkości obrotowych wytwornicy spalin n_{WS} , otrzymanej na podstawie pomiarów oraz obliczeń. Graficzną interpretację wyników badań adekwatności przedstawiono na rysunku 7. Na jego podstawie oraz po analizie wyników obliczeń zawartych w tabeli 2. stwierdzono, że otrzymany wielomian aproksymacyjny pozwala z dużą dokładnością wyznaczać pole współpracy silnika GTD-350 ze śrubą o skoku nastawnym. Mniejsze dokładności występują jedynie w obszarach, które nie były objęte planem doświadczenia. Dotyczy to w szczególności obszaru obejmującego prędkości obrotowe wytwornicy spalin bliskie nominalnym. W obszarze objętym planem doświadczenia błędy aproksymacji nie przekraczają 0,5%.



Rys. 7. Graficzna interpretacja wyników badań adekwatności

Źródło: opracowanie własne.

WNIOSKI

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań wstępnych sformułowano następujące wnioski:

1. Opracowana zależność aproksymacyjna pozwala w sposób pośredni wyznaczać użyteczny moment obrotowy turbiny napędowej od parametrów charakteryzujących stan energetyczny wytwornicy spalin rozpatrywanego turbinowego silnika spalinowego dla dowolnych parametrów stanu otoczenia.
2. Opracowana zależność pozwala na wyznaczanie użytecznego momentu obrotowego w sposób przybliżony, ale z wystarczającą w aplikacjach inżynierskich dokładnością.
3. Zdobyte umiejętności i doświadczenie obliczeniowe mogą być wykorzystane w procesie eksploatacji okrętowych turbinowych silników spalinowych, zwłaszcza do budowy systemów sterujących obciążeniem silnika według momentu obrotowego oraz systemu zabezpieczeń silnika przed przeciążeniem.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Mańczak K., *Technika planowania eksperymentu*, WNT, Warszawa 1976.
- [2] Piaseczny L., *Zastosowanie teorii planowania doświadczeń w badaniach okrętowych silników spalinowych*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2003, nr 1.
- [3] Pojawa B., *Rozwiązanie problemu niedostatecznej możliwości obciążania silnika GTD-350 na stanowisku laboratoryjnym*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2006, nr 4.
- [4] Pojawa B., *Stanowisko laboratoryjne dwuwirnikowego silnika turbinowego*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2005, nr 162K/2.
- [5] Polański Z., *Planowanie doświadczeń w technice*, PWN, Warszawa 1984.
- [6] Taylor J. R., *Wstęp do analizy błęd pomiarowego*, PWN, Warszawa 1999.

DETERMING CO-OPERATION CHARACTERISTICS OF MARINE GAS TURBINE ENGINE WITH POWER RECEIVER USING METHODOLOGY PLANNING EXPERIMENT

ABSTRACT

The process of operation of Marine turbine engines is based on their characteristics, including the characteristic of engine co-operation with the power receiver, especially if the receiver is a controllable pitch propeller. Ship documentation often does not cover this kind of characteristics. Therefore there is a need to work a method to determine it. Making an attempt to determine the co-operation characteristic of an engine with a power receiver it was decided to do it in an analytical way using experiment planning methodology. Bearing In mind the preliminary nature of the investigations it was decided to conduct them on a laboratory stand with a GTD-350 diesel engine co-operating with Froude water brake. The paper presents theoretical foundations for planning experiments, the way of conducting preliminary investigations and their results. The results obtained were checked for their adequacy, which included statistical and subject-matter analysis.

Keywords:

characteristics of marine gas turbine engine, design of experiments, experiment design, marine gas turbine engine.