

## Diagnostic tolerances evaluation method of the start-up exhaust temperature of a naval gas turbine

*The conducted investigations aimed at developing of the method of marking diagnostic tolerances of the exhaust temperature of a gas turbine observed during engine start-up. The diagnostic tolerances were determined by means of statistical inference by creating the hypothesis about a normal distribution of the start-up exhaust temperature dispersion in the moment of initial operation, which was subsequently verified applying a non-parametric statistical test  $\chi^2$  of the compliance between the empirical and the assumed normal distribution. A satisfactory convergence of the compared distributions was obtained as the result of a testing of the created hypothesis, which represented the basis for the acceptance of the three-sigma boundaries of diagnostic tolerances for the considered engine control parameter.*

Key words: technical diagnostics, naval gas turbines, exhaust temperature, diagnostic tolerances

### Metoda wyznaczania diagnostycznych tolerancji temperatury spalin wylotowych okrętowego turbinowego silnika spalinowego

*Przeprowadzono badania, których istotą było opracowanie metody wyznaczania diagnostycznych tolerancji temperatury spalin wylotowych okrętowego turbinowego silnika spalinowego, obserwowanej w procesie rozruchu. Tolerancje diagnostyczne wyznaczono metodą wnioskowania statystycznego, wysuwając hipotezę o normalnym rozkładzie rozrzutu rozruchowej temperatury spalin w początkowej chwili eksploatacji, którą zweryfikowano, stosując nieparametryczny test statystyczny  $\chi^2$  zgodności rozkładu empirycznego z założonym rozkładem normalnym. W wyniku testowania postawionej hipotezy uzyskano zadowalającą zbieżność porównywanych rozkładów, co stanowiło podstawę do przyjęcia trzysigmowych granic tolerancji diagnostycznych rozpatrywanego parametru kontrolnego silnika.*

Słowa kluczowe: diagnostyka techniczna, okrętowe turbinowe silniki spalinowe, temperatura spalin, tolerancje diagnostyczne

#### 1. Introduction

A general evaluation of a marine gas turbine technical condition might be formulated on the basis of values of basic parameters in general characterizing the quality of its performance: the power, specific fuel consumption, rotational speed of the rotors, mass flow rate of the fuel as well as the thermodynamic medium flowing through the engine passages [1, 2, 3]. However, in the majority of serial engines, at natural conditions of their operation inside the ship engine room, there is no direct possibility to evaluate the basic parameters (it is complicated or economically unjustified) that, on the other hand, do not deliver sufficiently detailed information about the course of physical processes carried out in the basic functional modules of the engine (gas flow paths, kinematic system, fuel feed system, automatic control system etc.) [4, 5]. Hence, within the operational diagnostics of gas turbine engines the set of auxiliary (control) parameters is evaluated. They indirectly reflect the basic parameters, additionally giving the possibility of indication of the places where the largest energy losses form as well as identification and location of the well-known and recognizable failures of components and constructional elements during current operation of the engine.

Every control parameter differs from its computational value, which results from productive differences (inaccuracy of technological process), influence of external factors (temperature, humidity, dust, vibration, sea wavy motion

#### 1. Wprowadzenie

Ogólną ocenę stanu technicznego okrętowego turbinowego silnika spalinowego można sformułować na podstawie wartości podstawowych parametrów charakteryzujących, w sposób ogólny, jakość funkcjonowania silnika: moc, jednostkowe zużycie paliwa, prędkości obrotowe zespołów wirnikowych, natężenie przepływu paliwa zasilającego i czynnika termodynamicznego przepływającego przez silnik [1, 2, 3]. Jednak w większości silników seryjnych, w warunkach ich eksploatacji w siłowni okrętowej, nie ma, z jednej strony, bezpośredniej możliwości wyznaczenia wartości parametrów podstawowych (jest to skomplikowane lub ekonomicznie nieuzasadnione), choć z drugiej strony nie dostarczają one dostatecznie szczegółowych informacji o przebiegu procesów fizycznych realizowanych w podstawowych układach funkcjonalnych silnika (część przepływowa, układ kinematyczny, instalacja paliwowa, układ automatycznego sterowania itd.) [4, 5]. Z tego względu w diagnostyce eksploatacyjnej silników turbinowych wyznacza się zbiór parametrów pomocniczych (kontrolnych), które w sposób pośredni odzwierciedlają parametry podstawowe, dając dodatkowo możliwość wskazania miejsc powstawania największych strat energetycznych oraz identyfikacji i lokalizacji znanych i rozpoznawalnych uszkodzeń podzespołów i elementów konstrukcyjnych w bieżącej eksploatacji silnika.

Każdy parametr kontrolny różni się od swojej wartości obliczeniowej, co wynika z różnic produkcyjnych

etc.) as well as dirt, aging and deterioration of constructional elements (reversible and irreversible changes in the surface layer) [6]. Such influences have a random character (they are random events), determining the random changes of values of the structure parameters [1, 4]. Their impact on the engine technical condition causes changes of the parameter values of the probability distribution of their occurrence – the expected value and average deviation (dispersion around the averaged value for the engine set being operated). The smaller the changes of the expected value and the smaller the average deviation of the control parameter, the larger the accuracy of the engine performance and thus, its life span and reliability.

The functioning accuracy of a module or constructional system and also the whole turbine engine is defined by the parameter tolerances that reflect the most desirable and admissible course of the realized physical processes:

- operation tolerances (maximally admissible) – defined by the manufacturer (the constructor) on the basis of investigations carried out on prototype copies, specify the maximum range in which the values of control parameters can be contained during the engine operation. At the same time, the engine performance cannot be reduced below the admissible values – undisturbed, reliable functioning and guaranteed technical durability, according to hourly and calendar limits of usable potential have to be maintained. An excess value of any assigned control parameter beyond the adjusted boundaries of operating tolerances indicates an inadmissible disturbance of energy-related processes posing a risk of damage (e.g. an unstable work of the compressor – surging phenomenon) [2, 4, 5, 8, 9];
- diagnostic tolerances – these are evaluated by means of statistical inference of research results of the sufficiently numerous set of new, correctly adjusted (regulated) engines (in full serviceable state) as well as the results of operating investigations of the same engines in successive stages of operation. The condition that the precise functioning according to the changes of the values of the basic parameters is maintained has to be fulfilled. In such a situation the values of the control parameters, approaching the boundaries of the diagnostic tolerance indicate the symptoms of slight changes of the technical condition, which is characteristic of the "imminent" unserviceable state. Moreover, they reflect a dependence of the engine technical condition on the time of the engine operational use (changes of the expected value of the control parameters as well as their average deviations in different stages of the engine operational use).

The following conclusions could be drawn – the value tolerances of the control parameters assigned for diagnostic purposes ought to be considerably smaller than the operation tolerances.

## 2. Method of evaluation of diagnostic tolerances

The measurements of the control parameters that characterize the quality of the engine operation during start-up, lay-off, rotor acceleration and deceleration as well as the engine running in steady ranges are carried out in the initial stage

(niedokładność procesu technologicznego), oddziaływania czynników zewnętrznych (temperatura, wilgotność, pył, drgania, falowanie morza) oraz zanieczyszczenia, starzenia i zużycia elementów konstrukcyjnych (odwracalne i nieodwracalne zmiany warstwy wierzchniej) [6]. Oddziaływania te mają charakter losowy (są zdarzeniami losowymi), determinując losowe zmiany wartości parametrów struktury [1, 4]. Ich wpływ na stan techniczny silnika powoduje zmiany wartości parametrów rozkładu prawdopodobieństwa ich występowania – wartości oczekiwanej i odchylenia średniego (rozrzutu wokół wartości średniej dla zbioru eksploatowanych silników). Im mniejsze są zmiany wartości oczekiwanej i odchylenia średniego parametru kontrolnego, tym większa jest dokładność funkcjonowania silnika, a więc jego trwałość i niezawodność.

Dokładność funkcjonowania modułu czy układu konstrukcyjnego, a także całego silnika turbinowego określana jest tolerancjami parametrów, które odzwierciedlają najbardziej pożądany i dopuszczalny przebieg realizowanych procesów fizycznych:

- tolerancje eksploatacyjne (maksymalnie dopuszczalne) – określane przez producenta (konstruktora) na podstawie badań egzemplarzy prototypowych – precyzują maksymalny przedział, w którym mogą zawierać się wartości parametrów kontrolnych w procesie użytkowania silnika, nie zmniejszając przy tym jego osiągnięć poniżej wartości dopuszczalnych oraz zachowując niezakłócone i niezawodne funkcjonowanie, a także gwarantowaną trwałość techniczną, zgodnie z godzinowymi i kalendaryzowymi limitami potencjału użytkowego. Wyjście wartości którejkolwiek z wyznaczonych parametrów kontrolnych poza ustalone granice tolerancji eksploatacyjnej sygnalizuje niedopuszczalne zakłócenie procesów energetycznych realizowanych w silniku, grożące jego awarią (np. niestateczna praca sprężarki) [2, 4, 5, 8, 9];
- tolerancje diagnostyczne – wyznaczane na drodze wnioskowania statystycznego wyników badania dostatecznie licznej zbioru nowych, poprawnie wyregulowanych silników (w stanie pełnej zdadności technicznej) oraz wyników badań eksploatacyjnych tych samych silników w kolejnych etapach eksploatacji, pod warunkiem, że zachowują one precyzyjne funkcjonowanie określone według zmian wartości parametrów podstawowych. W takiej sytuacji wartości parametrów kontrolnych, zbliżając się do granic przedziału tolerancji diagnostycznej, sygnalizują symptomy nieznacznych zmian stanu technicznego, charakterystyczne dla „zbliżającego się” stanu niezdatności. Odzwierciedlają jednocześnie zależność stanu technicznego silnika od czasu użytkowania (zmiany wartości oczekiwanej parametrów kontrolnych i ich odchyleni średnich w różnych etapach użytkowania).

Wynika stąd wniosek, że tolerancje wartości parametrów kontrolnych dla celów diagnostycznych muszą być znacznie mniejsze od tolerancji eksploatacyjnych.

of engine operation, directly after fitting in the engine room [11, 12]. Discrete values of diagnostic parameters, evaluated in this way, are modeled as single-dimension, continuous random variables of the definite probability distribution, the expected value as well as the variance, as a measure of dispersion of the results of the conducted measurements. In such a situation the method of marking diagnostic tolerances verifies itself, first of all, in a determination of a shape of the dispersion distribution of the observed discrete value of the diagnostic parameter around the average value of the whole population of operated engines, and then in a qualification of this distribution parameters. The hypothesis verification that an examined dispersion of a discrete value of the diagnostic parameter can be equalized with the assumed theoretical distribution that is described with a well-known function of the probability density of the random variable in a moment of  $t = 0$  [1, 7] represents one of the inference statistical methods of the shape of the random variable distribution. Having known the function form of theoretical distribution and its characteristic parameters (the expected value  $m$  and average deviation  $\sigma$ ) the tolerated range of diagnostic parameter values might be marked e.g.  $m \pm 3\sigma$  for the normal (Gaussian) distribution.

A way of the evaluation of the boundaries of the tolerance diagnostic field for an intensity of exhaust temperature stream growth measured behind the gas generator during the start-up process<sup>1)</sup>  $dT_{42}^*/d\tau$  will be demonstrated on the population of 46 Zorya gas turbine engines UGT3000 type put into operation [11, 12]. The evaluated diagnostic tolerances take into account the productive uniqueness as well as the impact of external operating factors. Table 1 contains the set of realizations of the numerical values of the start-up temperature registered during the start up process of brand new engines (or after a rebuild) being in full serviceable state (the values reduced to normal atmospheric conditions according to International Standard Atmosphere [2, 10]).

Assuming, that the values dispersion of the considered diagnostic parameter in a moment of  $t = 0$  has got the normal distribution, which is confirmed by the diagnostic investigations of aviation engines [1], a zero hypothesis  $H_0$  is put out

## 2. Metoda wyznaczania tolerancji diagnostycznych

Pomiary parametrów kontrolnych charakteryzujących jakość funkcjonowania silnika turbinowego w procesie rozruchu, akceleracji i deceleracji zespołów wirnikowych, pracy na ustalonych zakresach obciążenia oraz wyłączenia silnika z ruchu dokonuje się w początkowym etapie użytkowania, bezpośrednio po zabudowaniu w siłowni okrętowej [11, 12]. Wyznaczane w ten sposób dyskretne wartości parametrów diagnostycznych modeluje się jako jednowymiarowe zmienne losowe ciągłe o określonym rozkładzie prawdopodobieństwa, wartości oczekiwanej i wariancji, jako miary rozproszenia wyników przeprowadzonych pomiarów. W takiej sytuacji metoda wyznaczania tolerancji diagnostycznych sprowadza się przede wszystkim do określenia kształtu rozkładu rozrzutu obserwowanej wartości dyskretnej parametru diagnostycznego wokół wartości średniej dla całej populacji eksploatowanych silników, a następnie do określenia parametrów tego rozkładu. Jedną z metod wnioskowania statystycznego o kształcie rozkładu zmiennej losowej jest weryfikacja hipotezy, że badany rozrzut dyskretnej wartości parametru diagnostycznego można wyrównać założonym rozkładem teoretycznym opisanym znaną funkcją gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej w chwili  $t = 0$  [1, 7]. Znając postać funkcji rozkładu teoretycznego i jego parametrów charakterystycznych (wartość oczekiwana  $m$  i odchylenie średnie  $\sigma$ ) można wyznaczyć tolerowany przedział wartości parametrów diagnostycznych, np.  $m \pm 3\sigma$  dla rozkładu normalnego.

Sposób wyznaczenia granic diagnostycznego pola tolerancji intensywności narastania temperatury strumienia spalin mierzonej za wytwornicą spalin w procesie rozruchu<sup>1)</sup>  $dT_{42}^*/d\tau$ , które uwzględniają niepowtarzalność produkcyjną oraz wpływ zewnętrznych czynników eksploatacyjnych, zademonstrowany zostanie na populacji 46 turbinowych silników spalinowych Zorya typu UGT3000 wdrażanych do eksploatacji [11, 12]. Tabela 1 zawiera zbiór realizacji wartości liczbowych temperatury rozruchowej zarejestrowanych w procesie rozruchu nowych (lub bezpośrednio po naprawie głównej) silników w stanie pełnej zdadności tech-

Table 1. A set of realizations of numerical values of the start-up temperature  $dT_{42}^*/d\tau$  (random variable  $X(t)$ ) during the start-up process registered in the initial moment of fan operation of UGT3000 engine fitted in a ship engine room

Tabela 1. Zbiór realizacji wartości liczbowych temperatury rozruchowej  $dT_{42}^*/d\tau$  (zmienna losowa  $X(t)$ ) podczas rozruchu zarejestrowane w początkowej chwili eksploatacji silników UGT3000 zabudowanych w siłowni okrętowej

No.	$x_i$ [K/s]	$n_i$	No.	$x_i$ [K/s]	$n_i$
1	12	1	8	20	5
2	13	2	9	21	4
3	14	3	10	22	3
4	15	4	11	23	3
5	16	4	12	24	3
6	17	5	13	25	2
7	19	6	14	29	1

<sup>1)</sup> In short „start-up temperature” hereinafter.

<sup>1)</sup> W dalszej części artykułu określanej również krócej: „temperatura rozruchowa”.

that an empirical distribution function introduced in Tab. 1 is compatible with a normal distribution function. In order to verify the zero hypothesis a non-parametric statistical test  $\chi^2$  was applied. It does not require a command of normal distribution parameter: an expected value  $m$  and variance  $\sigma^2$  [7]. In such a situation the statistical estimation of the expected value and variance for the counted statistics is made on the basis of an arithmetical average  $\bar{x}$  and standard deviation  $\bar{\sigma}$  of the measurement results.

In order to carry out the test, the area, in which the values of a random variable contain  $X(t) = \{x_i\}$ , has been divided into six equal ranges of 3.0 K/s in length (the widths of the ranges do not need to be equal) – Tab. 2. Boundaries of the ranges have been chosen in such a way as not to make the numbers within the individual ranges too small (5–8 results in one range).

- arithmetic average  $\bar{x} = 18.97826$
- standard deviation  $\bar{\sigma} = 3.784919$

If the number of measurement results in the range is smaller than 5, one should be connected with any neighboring range [7].

In the successive stages of calculations the following values are evaluated:

- normalized range boundaries relative to  $\bar{x}$ , recalculated in unit:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\bar{\sigma}} \quad (1)$$

nicznej (wartości zredukowane do normalnych warunków atmosferycznych [2, 10]).

Zakładając, że rozrzut wartości rozpatrywanego parametru diagnostycznego w chwili  $t = 0$  ma rozkład normalny, co potwierdzają badania diagnostyczne silników lotniczych [1], wysuwa się hipotezę zerową  $H_0$ , że dystrybuanta rozkładu empirycznego przedstawionego w tabeli 1 jest zgodna z dystrybuantą rozkładu normalnego. Do weryfikacji hipotezy zerowej zastosowano nieparametryczny test statystyczny  $\chi^2$ , który nie wymaga znajomości parametrów rozkładu normalnego: wartości oczekiwanej  $m$  i wariancji  $\sigma^2$  [7]. W takiej sytuacji statystyczną estymację wartości oczekiwanej i wariancji dla obliczanej statystyki dokonuje się na podstawie średniej arytmetycznej  $\bar{x}$  i odchylenia standardowego  $\bar{\sigma}$  wyników pomiarów.

W celu przeprowadzenia testu, obszar w którym zawierają się wartości zmiennej losowej  $X(t) = \{x_i\}$  podzielono na sześć równych przedziałów o długości 3,0 K/s (szerokości przedziałów nie muszą być jednakowe) – tab. 2. Granice przedziałów dobrano w taki sposób, aby liczebności w poszczególnych przedziałach nie były zbyt małe (5–8 wyników w przedziale): – średnia arytmetyczna  $\bar{x} = 18,97826$ , – odchylenie standardowe  $\bar{\sigma} = 3,784919$ .

Jeżeli liczba wyników pomiarowych w przedziale jest mniejsza niż 5, należy je połączyć z jednym z przedziałów sąsiednich [7].

W kolejnych etapach obliczeń wyznacza się wartości: – unormowanych granic przedziałów względem  $\bar{x}$ , przeliczonych w jednostkach  $\bar{\sigma}$  – wzór (1), przy czym począt-

Table 2. Calculation scheme of  $\chi^2$  statistics

Tabela 2. Schemat obliczeń statystyki  $\chi^2$

Range number/ numer przedziału	Ranges boundaries/ granice przedziałów $x_i$ [K/s]	Numbers of measurement results in the i-th range $n_i$ /liczba wyników pomiarów w i-tym przedziale	Normalized range boundaries/ unormowane granice przedziałów $z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\bar{\sigma}}$	Value of the Laplace'a function for beginnings of the ranges $\Phi_p(z_i)$ /wartość funkcji Laplacea dla początków przedziałów
1	2	3	4	5
1	11...14	6	–...–1.32	–0.5
2	14...17	13	–1.32...–.52	–0.4064
3	17...20	11	–.52...+0.27	–.1985
4	20...23	10	0.27...1.06	0.1065
5	23...26	5	1.06...1.86	0.3507
6	26...29	1	1.86...+∞	0.4687
Total	–	46	–	–
Range number/ numer przedziału	Theoretical probability of getting the result from the i-th range/prawdopodobieństwo teoretyczne uzyskania wyniku z i-tego przedziału $p_i = \Phi_p(z_{i+1}) - \Phi_p(z_i)$	Theoretical results' number in the i-th range/ teoretyczna liczba wyników w i-tym przedziale $n \cdot p_i$	Statistics' value for the i-th range/ wartość statystyki dla i-tego przedziału $\chi_i^2 = \frac{(n_i - n \cdot p_i)^2}{n \cdot p_i}$	
1	6	7	8	
1	0.0936	4.3056	0.6668	
2	0.2079	9.5634	1.2349	
3	0.3050	14.0300	0.6544	
4	0.2442	11.2332	0.1354	
5	–	–	–	
6	0.1493	6.8678	0.1097	
Total	1.0000	46	2.8012	

the beginning of the first range and  $-\infty$  represents the end of the last range, however the end of the previous range represents simultaneously the beginning of the next range;

- normalized Laplace's function of the normal distribution for the beginnings of the range  $\Phi_p(z_i)$  – from statistical tables [7];
- theoretical probability of getting the result from the  $i$ -th range:

$$p_i = \Phi_p(z_{i+1}) - \Phi_p(z_i) \quad (2)$$

- theoretical number of results in the  $i$ -th range:  $n \cdot p_i$ ;
- statistics  $\chi_i^2$  for each range:

$$\chi_i^2 = \frac{(n_i - n \cdot p_i)^2}{n \cdot p_i} \quad (3)$$

In the last step of calculations a value of the statistics for the considered realization set of the random variable is evaluated:

$$\chi_0^2 = \sum_{i=1}^n \chi_i^2 = 2.8012 \quad (4)$$

A counted value of  $\chi_0^2$  statistics should be compared to its critical value defined from the statistical tables [7], at the assumed significance level  $\alpha$  and the number of freedom degrees  $f$  evaluated from the formula, as follows:

$$f = l - k - 1 \quad (5)$$

where:  $l$  – number of ranges in distributive series,  $k$  – number of estimated parameters of the verified distribution.

A critical value of the statistic, read from the statistical tables of  $\chi^2$  distribution, equals  $\chi_{kr}^2 = 5.991$  for the number of freedom degrees  $f = 2$  ( $l = 5$ ,  $k = 2$  – there have been estimated two parameters characterizing a normal distribution:  $\bar{x}$  i  $\bar{\sigma}$ ) and the assumed significance level  $\alpha = 0.05$  [7].

The calculated value of the statistics equals  $\chi_0^2 = 2.8012$  and it is smaller than the critical value  $\chi_{kr}^2(\alpha = 0.05, f = 2) = 5.991$ . This leads to the conclusion that there is no basis to reject the zero hypothesis, and furthermore, that the empirical distribution might be considered as the normal distribution. In this connection the probability function of the random variable  $X(t) = \{x_i\}$  in the initial stage of operation (in the moment  $t = 0$ ) can be defined with a formula:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(x - \bar{x})^2}{2 \cdot \sigma^2}\right] \quad (6)$$

Having known a distribution function and its basic parameters as a consequence it is possible to evaluate boundaries of the diagnostic field of tolerance. In such a situation the value range  $m \pm 3\sigma$  is treated as the boundary diagnostic condition for the observed control parameter. There has been evaluated the expected value  $m = \bar{x} = 18.98$  K/s and average deviation  $\sigma = \bar{\sigma} = 3.78$  K/s for the considered start-up temperature, which gives the diagnostic tolerances of the objective control parameter:

kierm pierwszego przedziału jest  $-\infty$ , a końcem ostatniego  $+\infty$ , natomiast koniec poprzedzającego przedziału stanowi jednocześnie początek kolejnego przedziału;

- unormowanej funkcji Laplace'a rozkładu normalnego dla początków przedziałów  $\Phi_p(z_i)$  – z tablic statystycznych [7];
- teoretycznego prawdopodobieństwa uzyskania wyniku z  $i$ -tego przedziału (2);
- teoretycznej liczby wyników w  $i$ -tym przedziale:  $n \cdot p_i$ ;
- statystyki  $\chi_i^2$  dla każdego przedziału (3).

W ostatnim kroku obliczeń wyznacza się wartość statystyki dla rozpatrywanego zbioru realizacji zmiennej losowej (4).

Obliczoną wartość statystyki  $\chi_0^2$  należy porównać z jej wartością krytyczną określaną z tablic statystycznych [7], przy przyjętym poziomie istotności  $\alpha$  i liczbie stopni swobody  $f$  wyznaczanej z zależności (5), gdzie:  $l$  – liczba przedziałów w szeregu rozdzielczym,  $k$  – liczba szacowanych parametrów weryfikowanego rozkładu.

Dla liczby stopni swobody  $f = 2$  ( $l = 5$ ,  $k = 2$ ) – na podstawie danych empirycznych – oceniano dwa parametry charakteryzujące rozkład normalny:  $\bar{x}$  i  $\bar{\sigma}$  i założony poziom istotności  $\alpha = 0,05$ ; wartość krytyczna statystyki odczytana z tablic rozkładu  $\chi^2$  wynosi  $\chi_{kr}^2 = 5,991$  [7].

Wartość obliczeniowa statystyki wynosi  $\chi_0^2 = 2,8012$  i jest mniejsza od wartości krytycznej  $\chi_{kr}^2(\alpha = 0,05, f = 2) = 5,991$ . Oznacza to, że brak jest podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej, a zatem badany rozkład empiryczny można uznać za zgodny z rozkładem normalnym. W związku z tym funkcję gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej  $X(t) = \{x_i\}$  w początkowym etapie eksploatacji (w chwili  $t = 0$ ) można określić formułą (6).

Znając funkcję rozkładu i jego podstawowe parametry, można wyznaczyć granice diagnostycznego pola tolerancji, przyjmując przedział wartości  $m \pm 3\sigma$  jako diagnostyczne warunki graniczne obserwowanego parametru kontrolnego. Dla rozpatrywanej temperatury rozruchowej wyznaczono wartość oczekiwaną  $m = \bar{x} = 18,98$  K/s oraz odchylenie średnie  $\sigma = \bar{\sigma} = 3,78$  K/s, co daje tolerancje diagnostyczne przedmiotowego parametru kontrolnego – wzór (7).

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że tolerancje diagnostyczne intensywności narastania temperatury spalin wylotowych w procesie rozruchu silnika turbinowego typu UGT3000 są ograniczone jednostronnie, co oznacza, że graniczna wartość tego parametru oceniana na potrzeby diagnostyczne, w przypadku silnika nowego, nie powinna przekraczać 30 K/s.

Wykorzystując z kolei symetrię rozkładu normalnego i wartości funkcji Laplace'a  $\Phi_p(z_i)$  można wyznaczyć prawdopodobieństwo przyjęcia przez zmienną losową  $X(t)$  wartości zawierających się w tym przedziale – wzór (8).

Tak więc przyjęcie trzysigmowych granic tolerancji diagnostycznych rozpatrywanego parametru kontrolnego oznacza, że tylko niecałe 3%<sub>00</sub> (maksimum 3 na 1000) możliwych wyników pomiarowych różni się od wartości oczekiwanej o więcej niż 3 $\sigma$ .

$$7.64 \leq x_{t=0} \leq 30.32 \quad (7)$$

It results from the conducted calculation, that the diagnostic tolerances of the growth intensity of the exhaust temperature during the start-up process of UGT300 gas turbine engine are limited one-sidedly. It leads to a conclusion that the boundary value of this parameter estimated for diagnostic purposes, in case of a brand new engine, must not exceed 30 K/s.

The probability that values of the random variable  $X(t)$  fit into this range might also be evaluated. It could be worked out using a symmetry of the normal distribution and the values of Laplace function:

$$P\{X \in (m \pm 3\sigma)\} = \Phi_p(3) - \Phi_p(-3) = 0.9973 \quad (8)$$

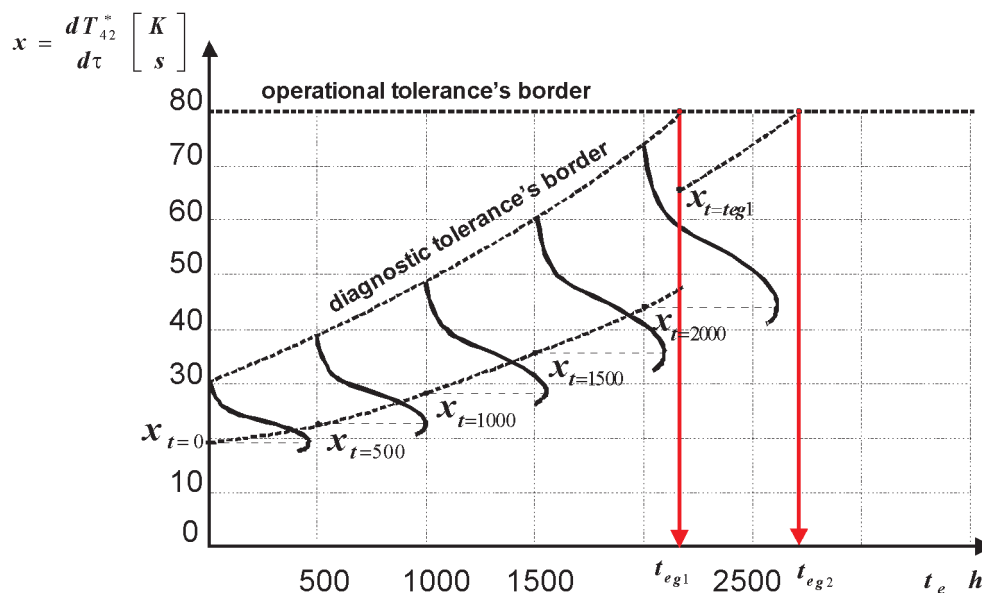


Fig. 1. Deformation of the course of the function of probability density of the considered random variable during operation of a marine gas turbine engine

Rys. 1. Deformacje przebiegu funkcji gęstości prawdopodobieństwa rozpatrywanej zmiennej losowej w czasie użytkowania turbinowego silnika spalinowego

Therefore, taking three-sigma boundaries of diagnostic tolerances of the considered control parameter means, that only less than 3‰ of (maximum 3 on 1000) of the possible measurement results differ from the expected value by more than  $3\sigma$ .

Because of an influence of unfavorable operational factors on the engine running in the vessel engine room, aging, wear and tear and dirt processes of the constructional elements occur. These are the continuous and irreversible processes that are always associated with the operation of combustion engines in sea conditions. Hence, a waste of the usable potential follows denoted by deformations of the course of the probability function as determined with the changes of the expected value and average deviation while the protected profile of the normal distribution of the random

W procesie użytkowania silnika na okręcie, w wyniku oddziaływania niekorzystnych czynników eksploatacyjnych następuje starzenie, zużycie i zanieczyszczenie elementów konstrukcyjnych, jako procesy ciągłe i nieodwracalne zawsze towarzyszące eksploatacji silników spalinowych w warunkach morskich. Z tego względu następuje zużycie potencjału użytkowego, którego miarą są deformacje przebiegu funkcji gęstości prawdopodobieństwa zdeterminowane zmianami wartości oczekiwanej i odchylenia średniego, przy zachowaniu normalnego rozkładu zmiennej losowej (rozrzutu rozpatrywanego parametru kontrolnego). W konsekwencji wzrasta dyspersja intensywności narastania temperatury strumienia spalin w procesie rozruchu silnika, rozszerzają się granice tolerancji diagnostycznych, które w żadnym razie nie mogą przekraczać granic tolerancji eksploatacyjnych – rys. 1. Godzimy się zatem, że w miarę zwiększania całkowitego czasu pracy silnika, jego funkcjonowanie będzie mniej

precyzyjne, jednak przy zachowaniu wszelkich wymogów bezpiecznego użytkowania.

Z wartości liczbowych przedstawionych na rys. 1 wynika, że wyznaczając kształt funkcji gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej w kolejnych etapach eksploatacji silnika (np. w rocznych cyklach kontrolno-pomiarowych lub co 500 godzin pracy), można określić linie trendu zmian wartości oczekiwanej oraz górnej granicy tolerancji zbioru realizacji parametru diagnostycznego. Możliwe jest również wyznaczenie horyzontu prognozy czasu poprawnej pracy silnika (bez uszkodzeń) do chwili  $t_{eg1}$

z punktu przecięcia przebiegu górnej granicy tolerancji diagnostycznych z linią eksploatacyjnej granicy tolerancji. W tym momencie należy przeprowadzić pomiar wartości parametru diagnostycznego, na badanym silniku (np. punkt  $x_{t=tegl} = (dT_{42}^*/d\tau)_{t=tegl}$ ) i ekstrapolować górną granicę tolerancji diagnostycznych do przecięcia się z linią eksploatacyjnej granicy tolerancji (chwila  $t_{eg2}$ ) itd. W ten sposób wprowadza się strategię eksploatacji silnika według aktualnego stanu technicznego, którego odtwarzanie (regulacja, naprawa, wymiana elementu) zależy od indywidualnych cech degradacji struktury konstrukcyjnej, związanych z główną mierzą z charakterem zmienności jego obciążeń (liczba rozruchów, wyłączeń z ruchu, akceleracji i deceleracji zespołów wirnikowych, manewrowania oddzielną turbiną napędową itd.).

variable is preserved (dispersion of the considered control parameter). As a consequence dispersal of the growth intensity of the exhaust stream temperature increases during the engine start-up and the boundaries of diagnostic tolerances widen. But they must not exceed the boundaries of the operational tolerances – Fig. 1. It means that we therefore agree on the situation that the total time of engine operation enlarges its performance but reduces its operating accuracy. It is only acceptable on the condition that all the requirements of the safe engine running are fulfilled.

Numerical values introduced in Fig. 1 show that by means of precise evaluation of the shape of the probability function of the random variable in successive operation stages of the engine (e.g. in annual control-measuring cycles, or every 500 working hours) trend lines of the expected changes of the value as well as the upper boundary of the tolerances of the set of the diagnostic parameter realization might be determined. It is also possible to evaluate the forecast horizon of the time of the engine proper operation (without failures) until the moment  $t_{eg1}$  – from the cross point of the upper boundary of diagnostic tolerance and the line of the operational tolerance boundary. Then the measurement of the diagnostic parameter's value should be conducted on the examined engine (e.g. the point  $x_{t=tegl} = (dT_{42}^*/d\tau)_{t=tegl}$ ) and to extrapolate the upper diagnostic tolerance boundary to cross-cut with the line of the operational tolerance boundary (moment  $t_{eg2}$ ) etc. In this way the engine operation strategy according to a current technical condition is introduced. The engine technical condition is reproduced (adjustment, repair, element's exchange) taking into consideration the individual features of constructional structure degradation, mainly associated with the nature of the loads variability (the number of start-ups, lay-offs, rotors accelerations and decelerations, free power turbine maneuverings etc.).

### 3. Conclusions

The authors have limited the paper to present only one example of the proposed method application to evaluate the diagnostic tolerances of the control parameter of a marine gas turbine engine – a growth intensity of the exhaust temperature recorded during a start-up process. In general, a total number of the analyzed start-up processes equaled 46. The assumption that in the initial stage of the usage the engines maintain accurate functioning, defined according to the values of the basic parameters represented the necessary condition for the conducted statistical inference. In such a situation the value of the observed control parameter, approaching to the ranges boundaries of diagnostic tolerances indicates the symptom of insignificant changes of a technical condition, which is characteristic of the "imminent" unserviceable state, and simultaneously this value reflects a dependence between the engine technical condition and the time of its usage (changes of the expected values of the control parameter and its average deviations in different stages the engine's usage).

*Paper reviewed/Artykuł recenzowany*

### 3. Podsumowanie

W artykule ograniczono się do zaprezentowania jednego przykładu zastosowania proponowanej metody wyznaczenia tolerancji diagnostycznych parametru kontrolnego okrętowego turbinowego silnika spalinowego – szybkości wzrostu temperatury spalin wylotowych rejestrowanej w procesie rozruchu. Ogółem liczba przeanalizowanych procesów rozruchowych wynosiła 46. Niezbędnym warunkiem przeprowadzonego wnioskowania statystycznego było założenie, że w początkowym etapie użytkowania silniki zachowują precyzyjne funkcjonowanie, określane według wartości parametrów podstawowych. W takiej sytuacji wartość obserwowanego parametru kontrolnego, zbliżając się do granic przedziału tolerancji diagnostycznych, sygnalizuje symptom nieznaczących zmian stanu technicznego, charakterystyczny dla „zbliżającego się” stanu niezdatności, a jednocześnie odzwierciedla zależność stanu technicznego silnika od czasu jego użytkowania (zmiany wartości oczekiwanych parametru kontrolnego i jego odchyłeń średnich w różnych etapach użytkowania).

### Bibliography/Literatura

- [1] Boliński B., Stelmazczyk Z.: Napędy lotnicze. Eksploatacja silników turbinowych. WKiŁ, Warszawa 1981.
- [2] Cohen H., Rogers G.F.C., Saravanamuttur H.I.H.: Gas turbine theory. Longman Scientific & Technical, New York 1987.
- [3] Hardin J.R. and others: A gas turbine condition – monitoring system. Naval Engineers Journal, November, USA 1995.
- [4] Korczewski Z.: Metoda diagnozowania części przepływowej okrętowego turbinowego silnika spalinowego w eksploatacji. AMW (praca doktorska), Gdynia 1992.
- [5] Korczewski Z.: Identyfikacja procesów gazodynamicznych w układzie sprężarkowym okrętowego turbinowego silnika spalinowego dla potrzeb diagnostyki. AMW Gdynia 1999.
- [6] Korczewski Z.: Endoskopia silników okrętowych. AMW, Gdynia 2008.
- [7] Korzyński M.: Metodyka eksperymentu. WNT, Warszawa 2006.
- [8] Orkisz M.: Wybrane zagadnienia z teorii turbinowych silników odrzutowych. ITE, Radom 1995.
- [9] Pawlak W., Wiklik K., Morawski J.M.: Synteza i badanie układów sterowania lotniczych silników turbinowych metodami symulacji komputerowej. Instytut Lotnictwa, Warszawa 1996.
- [10] Wiśniewski S.: Pomiary temperatury w badaniach silników i urządzeń cieplnych. WNT, Warszawa 1983.
- [11] Dokumentacja techniczna i eksploatacyjna okrętowych turbinowych silników spalinowych GTU6a, DE59, Zorya typu UGT, General Electric LM2500.
- [12] Sprawozdania z badań diagnostycznych tłokowych i turbinowych silników spalinowych eksploatowanych na okrętach MWRP – Prace badawcze AMW, Gdynia 1992-2008.

Zbigniew Korczewski, DSc., DEng. – doctor in the Faculty of Ocean Engineering and Ship Technology at Gdansk University of Technology.

*Dr hab. inż. Zbigniew Korczewski – doktor habilitowany na Wydziale Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej.*

e-mail: [z.korczewski@gmail.com](mailto:z.korczewski@gmail.com)

