

Andrzej Grządziela¹⁾, Pero Vidan²⁾, Nikola Racić²⁾

MONITOROWANIE DRGANIOWE UKŁADÓW WIRNIKOWYCH OKRĘTOWYCH SILNIKÓW TURBINOWYCH — MODUŁ DIAGNOSTYCZNY STANÓW NIEUSTALONYCH

VIBRATION-BASED MONITORING OF ROTOR SYSTEMS IN MARINE TURBINE ENGINES — A DIAGNOSTIC MODULE FOR TRANSIENT STATES

STRESZCZENIE W artykule przedstawiono cele i metody diagnostyki drganiowej okrętowych turbinowych silników spalinowych ze szczególnym uwzględnieniem badań w procesie rozruchu i zatrzymania silnika. Dokonano podziału metod na jakościowe i ilościowe oraz przedstawiono ich zakres stosowalności. Przedstawiono rolę baz danych identyfikujących cechy charakterystyczne parametrów drganiowych analizowanych w trybie on-line. Scharakteryzowano i sklasyfikowano metodę badań w stanach nieustalonych oraz przedstawiono wrażliwość symptomów drganiowych na występujące uszkodzenia układów wirnikowych w procesie. Przedstawiono metodykę identyfikacji uszkodzeń wybiegu silnika.

Słowa kluczowe:

diagnostyka, drgania, silniki turbinowe, stany nieustalone.

ABSTRACT The article presents objectives and methods for vibration diagnostics of marine turbine internal combustion engines with special emphasis on the start and stop processes of the engine. It divides the methods into qualitative ones and quantitative ones and shows the scope of their use. It also presents the role of data bases which identify properties of vibration parameters analyzed on-line. It characterizes and classifies the method used for investigations in transient states and it also presents the sensitivity of vibration symptoms to occurring damage. It also presents procedures used to identify damage in rotor systems in the process of engine coasting.

Keywords:

diagnostics, vibrations, turbine engines, transient states.

DOI: 10.5604/0860889X.1139630

¹⁾ Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, 81-103 Gdynia, ul. J. Śmiedowicza 69; e-mail: a.grzadziela@amw.gdynia.pl

²⁾ University of Split, Faculty of Marine Studies, Livanjska 5, 21000 Split, Croatia

WSTĘP

Badania silników turbinowych najczęściej są realizowane jako wielosymptomowe [11]. Pierwszym zbiorem danych podlegających analizie statystycznej, popartej sieciami neuronowymi lub systemami ekspertowymi, są parametry termo-gazodynamiczne [8, 18, 21]. Symptomy te identyfikują procesy występujące w transmisji energii dostarczonej na energię użyteczną. Obejmują one analizy prędkości obrotowych, temperatury, ciśnienia. Badania są ukierunkowane na identyfikację uszkodzeń mechanicznych układu wirnikowego, zanieczyszczenia traktu przepływowego, zużycia łożysk, zasolenia, uszkodzenia uszczelnień, nieprawidłową pracę wtryskiwaczy lub komór spalania itp. Metody mają charakter ilościowo-jakościowy, umożliwiają identyfikację wczesnych symptomów uszkodzeń i analizę trendu parametrów je identyfikujących.

Drugim zbiorem danych podlegających ocenie diagnostycznej są parametry drganiowe, które należy rozumieć jako analizę energii strat występujących w procesie pracy silnika. Wielkość tych strat, ich charakter oraz cechy charakterystyczne rozumiane jako symptomy w wielu wypadkach można jednoznacznie przyporządkować określonym uszkodzeniom silników turbinowych [3, 8, 9, 17]. Badania są ukierunkowane na identyfikację niewyrównoważenia wirników, odchyłek współosiowości, uszkodzeń łożysk, zmian sztywności posadowienia wirników i silnika itp. Zbiór danych parametrów drganiowych ma zarówno charakter jakościowy —

INTRODUCTION

Testing turbine engines is most often based on a multi-symptom approach [11]. The first set of data which is subject to a statistic analysis, supported with neuron networks or expert systems are thermo-gasodynamic parameters [8, 18, 21]. These symptoms identify the processes which occur in energy transmission transferred into effective energy. They include analyses of rotational speed magnitudes, temperature, and pressure. Tests are aimed at identifying pollution in a flow pipe, bearing wear, salinity, sealing failures, and the faulty performance of injectors or combustion chambers, etc. They are quantitative-qualitative methods and they can be used for the early identification of failure symptoms and analyze the trend in the parameters that identify them.

The second set of data subject to diagnostic evaluation is the vibration parameters, which must be understood as an analysis of energy losses during engine performance. The amount of loss, its character and features understood as symptoms can, in many cases, be attributed to specific failures of a turbine engine [3, 8, 9, 17]. The tests are aimed at identifying the unbalance of rotors, coaxiality deviation, bearing damage, and changes in the foundation rigidity of an engine or a rotor, etc. The set of vibration data has both the quantitative and qualitative character — tests of changes in the magnitude of the first harmonic of speed or vibration displacement. On-line test

badania zmian wartości pierwszej harmonicznej prędkości lub przemieszczeń drgań. Oba zbiory charakteryzują się możliwością zastosowania technik badawczych typu on-line.

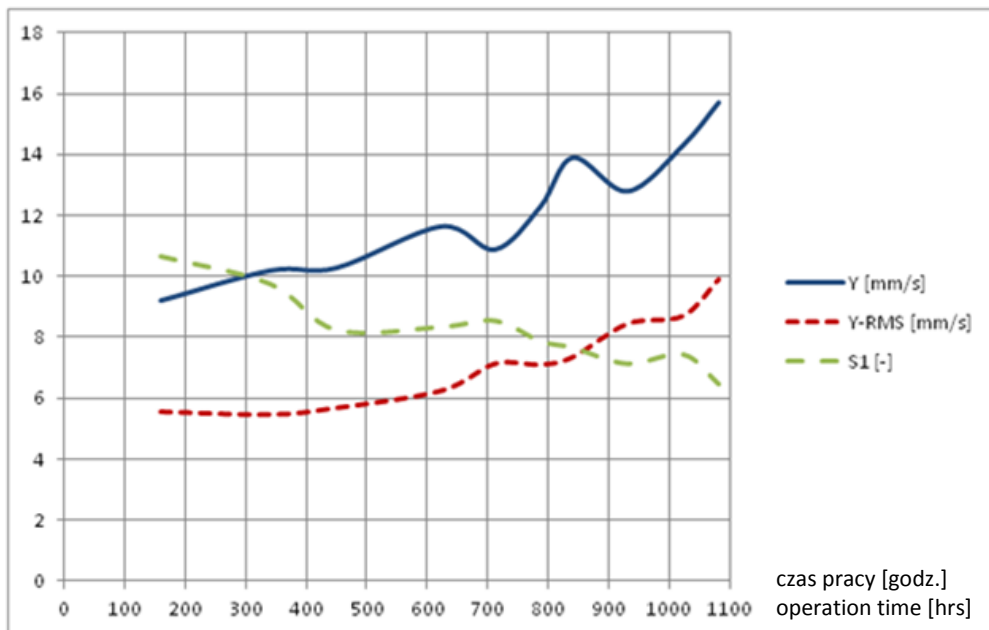
Badania endoskopowe oraz parametry fizyko-chemiczne oleju smarowego są trzecim zbiorem danych diagnostycznych realizowanych w trybie off-line. W wielu wypadkach parametry te identyfikują uszkodzenia stwierdzone w dwóch pierwszych procedurach oraz jednoznacznie i dokładnie wskazują na miejsce uszkodzenia [5, 8, 10]. Badania te może wykonać dobrze przeszkolony personel techniczny na okręcie.

Badania parametrów drganiowych w trybie on-line w stanach ustalonych są typową procedurą realizowaną przez producentów i wykonawców profesjonalnych systemów diagnostycznych. Firma Bentley Nevada rekomenduje monitoring parametrów drganiowych dla turbinowych silników przemysłowych w obszarze identyfikacji uszkodzeń łożysk tocznych i oporowych, zmian średniej prędkości obrotowej i fazy drgań, drgań kadłuba silnika oraz odchyłek współosiowości elementów wirujących w układzie transmisji mocy [16]. Systemy monitoringu analizują zwykle zmiany wartości pierwszej harmonicznej, zarówno amplitudy prędkości, jak i przemieszczeń drgań, w dwóch prostopadłych osiach poprzecznych do osi obrotu wałów oraz RMS w zakresie średnioprzepustowego filtra w paśmie częstotliwości 40–350 Hz [16]. Wyniki badań są archiwizowane w bazach danych i analizowane w postaci trendów zidentyfikowanych wartości parametrów diagnostycznych (rys. 1.).

techniques can be applied to both the two sets.

The third set of diagnostic data, used off-line, is endoscopic tests and the physical-chemical features of lubrication oil. In many cases these parameters identify failures found during the first two procedures, and unequivocally and precisely indicate the place of failure [5, 8, 10]. These tests can be carried out by well-trained technical personnel aboard a ship.

Testing vibration parameters on-line at steady states is a typical procedure applied by both producers as well as makers of professional diagnostic systems. The firm Bentley Nevada recommends monitoring vibration parameters in industrial turbine engines to identify failures in slide bearings, axial bearings, changes in average rotational speed and vibration phase, crankcase vibration and the coaxiality deviations of elements rotating in a power transmission system [16]. Monitoring systems usually analyze changes in the first harmonic magnitude relating to both the speed amplitude and vibration displacements in two axes transverse to the shaft rotation axis and RMS at the right angle, within the range of a medium-capacity filter in the frequency band of 40–350 Hz [16]. The results are stored in data bases and analyzed in the form of trends in the identified diagnostic parameter magnitudes (fig. 1).



Rys. 1. Przykładowy trend parametrów drganiowych silnika DR 77:

Y — pierwsza harmoniczna prędkości drgań wirnika SNC (LPC), Y_{RMS} — wartość skuteczna prędkości drgań w zakresie filtra średnioprzepustowego 35–400 Hz, S1 — stosunek wartości pierwszej harmonicznej prędkości drgań wirnika SNC (LPC) do wartości drugiej harmonicznej

Fig. 1. An example of a trend relating vibration parameters in the engine DR77:

Y — the first harmonic of vibration speed in the rotor SNC (LPC), Y_{RMS} — effective magnitude of vibration speed within the range of a medium capacity filter 35–400 Hz, S1 — proportion of the first harmonic of rotor vibration speed SNC (LPC) to the second harmonic

W diagnozowaniu silników turbinowych coraz częściej wykorzystuje się sieci neuronowe i systemy ekspertowe jako narzędzia identyfikacji symptomów uszkodzeń oraz ich analizy [20, 21]. Systemy te definiują poszczególne elementy silników jako odrębne elementy, realizują model diagnostyczny i skupiają się na identyfikacji najbardziej rozpoznawalnych symptomów, wykorzystując na przykład analizy falkowe. Zidentyfikowane modele umożliwiają rozpoznanie w ten sposób typowych uszkodzeń oraz wprowadzanie uszkodzeń wirtualnych celem określenia miar rzeczywistych symptomów [20].

In diagnostics of turbine engines more and more often neuron networks and expert systems are used as tools for identifying failure symptoms, and for analyzing them [20, 21]. These systems define particular elements of an engine as separate elements, realize a diagnostic model and focus on e.g. wavelet analyses. The identified models enable, this way, recognizing typical failures and introducing virtual failures in order to determine measures for real symptoms [20].

Building a diagnostic model and forecasting changes in boundary magnitudes

Budowanie modelu diagnostycznego oraz prognozowanie zmian wartości granicznej symptomów diagnostycznych jest jednym z najbardziej obiecujących kierunków badań parametrów w stanach ustalonych [2]. Rozwiązanie takie w dużym stopniu zabezpiecza przed wywołaniem fałszywych alarmów w sytuacji silnika sprawnego technicznie. Kolejną zaletą jest możliwość przenoszenia zdobytych doświadczeń na inne typy silników, których konstrukcja jest podobna do zidentyfikowanego już obiektu.

Powszechność stosowania systemów monitoringu on-line w zakresie diagnostyki drganiowej wynika głównie z możliwości jednoczesnego pozyskiwania symptomów termo-gazodynamicznych i drganiowych oraz wykorzystania ich jako zbioru symptomów w inteligentnych systemach diagnostycznych. Rozwiązanie takie nie obejmuje diagnostyki procesów przejściowych, jakimi są rozruch lub zatrzymanie silnika. Oznacza to świadomą rezygnację z możliwości analiz parametrów drganiowych w zakresie niższych prędkości obrotowych.

Przedstawione wyniki badań drganiowych parametrów diagnostycznych są z lat 2002–2013. Realizowano je na okrętowych silnikach turbinowych typu LM 2500, DR 76 i DR77 [8, 9, 10].

ANALIZA SYGNAŁÓW DRGANIOWYCH W STANACH NIEUSTALONYCH

Analiza parametrów drganiowych w stanach nieustalonych jest narzędziem diagnostycznym stosowanym nie tylko w eksploatacji silników turbinowych,

of diagnostic symptoms is one of the most promising directions in the field of testing parameters at steady states [2]. This solution offers protection, to a large extent, against starting false alarms when an engine is in good working order. Another advantage is the possibility of using the experience gained with regard to other types of engine, whose design is similar to the already identified object.

The common use of on-line monitoring systems for vibration diagnostics results mainly from the fact that thermogasodynamic and vibration symptoms can be obtained and used at the same time as a set of symptoms in intelligent diagnostic systems. This solution does not include diagnostics of transient processes, such as starting or stopping an engine. This means a conscious resignation from the possibility of analyzing vibration parameters in the range of lower rotational speeds.

The test results of vibration diagnostic parameters cover the period 2002–2013. The tests were done using marine turbine engines type LM 2500, DR 76 and DR77 [8, 9, 10].

THE ANALYSIS OF VIBRATION SIGNALS AT TRANSIENT STATES

The analysis of vibration parameters at transient states is a diagnostic tool commonly used not only in the course of operating turbine engines but also in mining, wind power plants, and auto and chemical industries [4, 15]. Variable load conditions and a wide

ale także w górnictwie, elektrowniach wiatrowych oraz przemyśle motoryzacyjnym i chemicznym [4, 15]. Zmienne stany obciążeń oraz szerokie spektrum eksploatacyjnych prędkości obrotowych lub ich niestacjonarność wymagają analiz sygnałów drganiowych z użyciem sygnałów synchronizujących [1, 6]. Analizy te są realizowane na wiele sposobów, jednakże wszystkie mają na celu wykonanie zabiegu pseudostacjonarności analizowanego sygnału w dziedzinie czasu lub prędkości obrotowej [7, 19]. Najczęstszymi sposobami analizy parametrów drganiowych mierzonymi w stanach niestabilnych są:

- synchronizm sygnału w dziedzinie prędkości obrotowej poprzez wyzwalanie jednego lub wielu sygnałów synchronizujących przypadających na jeden obrót wału maszyny;
- nadpróbkowanie sygnału [13];
- śledzenie rzędów [18];
- autośledzenie rzędów [18].

Pozyskiwanie sygnału synchronizującego najczęściej odbywa się za pomocą następujących metod:

- czujnikiem optycznym;
- czujnikiem laserowym;
- prądnicą tachometryczną;
- czujnikiem indukcyjnym.

W artykule przedstawiono wyniki badań zrealizowane z wykorzystaniem synchronizmu sygnału oraz śledzenia rzędów przy pozyskiwaniu sygnału synchronizującego z wirników silników turbinowych dwoma metodami: optyczną (LM 2500) oraz z wykorzystaniem prądnicy tachometrycznej (DR 76 i DR 77).

spectrum of rotational speed magnitudes or their non-stationarity require using synchronizing signals to carry out vibration signal analyses [1, 6] Although these analyses can be carried out in many ways all of them are aimed at performing pseudo-stationarity of an analyzed signal in the time domain or in the rotational speed domain [7, 19]. The most often used ways of analyzing vibration parameters measured in transient states are:

- signal synchronism in the domain of rotational speed through freeing one or many synchronizing signals per one shaft rotation;
- signal oversampling [13];
- tracking of orders [18];
- autotracking of orders [18].

In order to gain a synchronizing signal the most often used methods are as follows:

- with an optical sensor;
- with a laser sensor;
- with a tachometric generator;
- with an inductive sensor.

This article presents the results of tests in which a synchronizing signal or tracking of orders were used to obtain a synchronizing signal from rotors of turbine engines by means of two methods: optical (LM 2500) and one employing a tachometric generator (DR 76 i DR 77).

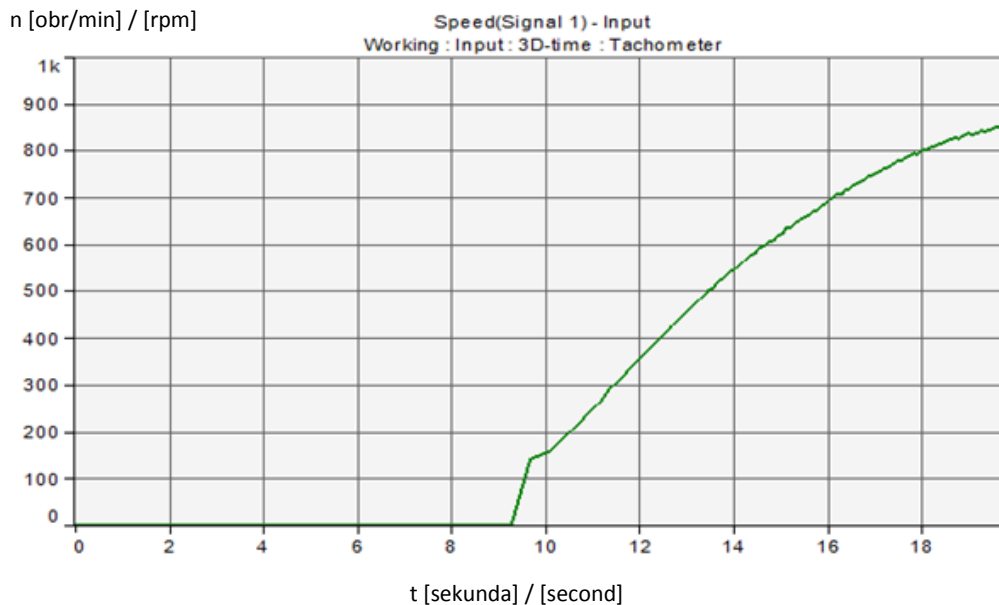
DIAGNOZING THE PROCESS OF ENGINE STARTING

The diagnostics analysis of turbine engines in transient states has been

DIAGNOZOWANIE PROCESU ROZRUCHU SILNIKA

Analiza diagnostyczna silników turbinowych w stanach nieustalonych jest przedmiotem wielu publikacji [13, 14]. Autorzy analizują za pomocą sieci neuronowych model silnika w procesie rozruchu [14] lub odnoszą parametry gazodynamiczne do czasu rozruchu [12]. Prezentowane wyniki wprawdzie wykazują wrażliwość opisywanych w modelu uszkodzeń, ale w zależności od typu rozruchu symptomy mogą być niejednoznaczne. Każdy z modeli zakłada całkowitą sprawność instalacji rozruchowej sprężonego powietrza, hydraulicznej czy elektrycznej, ale nawet przyjęcie takiego założenia skłania do wątpliwości, czy proces rozruchu silnika zimnego i gorącego zaraz po zatrzymaniu będzie miał identyczne drganiowe parametry diagnostyczne. Ponadto sam proces inicjacji spalania paliwa jest wysoce energetyczny, co może skutecznie maskować drganiowe symptomy uszkodzeń. Z tego powodu dla potrzeb diagnostyki drganiowej interesująca wydaje się raczej analiza zimnego rozruchu (bez podania paliwa i zapłonu), co pozwala na jednoznaczną identyfikację uszkodzeń związanych z procesami tarcia, zużycia oraz ubytku lub przyrostu masy na skutek zanieczyszczeń. W procesie akceleracji prędkości obrotowej w trakcie zimnego rozruchu silnika (rys. 2.) istnieje możliwość analizy parametrów elektrycznych rozrusznika oraz czasu uzyskania prędkości znamionowej zimnego rozruchu. Pozwala to na ocenę oporów tarcia układu wirnikowego.

covered in many publications [13, 14]. The authors analyze using neuron networks, an engine model during the starting process [14] or relate gasodynamic parameters to the starting time [12]. The results presented, in fact, indicate vulnerability described in the model failures but depending on the type of starting the symptoms may not be unequivocal. Each of the models assumes the full efficiency of the starting installation: hydraulic, electric or based on compressed air. Even when such an assumption is made, there are doubts if the starting process of a cold or a hot engine will have identical vibration diagnostic parameters just after it has been stopped. In addition the initiation process of fuel burning is highly energetic, which may effectively camouflage vibration-based failure symptoms. Therefore, regarding vibration diagnostics it is an analysis of cold starting that seems to be interesting (without fuel delivery and ignition). It allows for unequivocal identification of failures related to friction processes, wear or the decrement in mass increase as a result of pollution. In the rotational speed acceleration process when starting a cold engine (fig. 2) there exists a possibility to carry out an analysis of the electric parameters of a starter or the time used to obtain the rated speed following cold starting. This allows for an estimation of friction in the resistance magnitudes of a rotational system.



Rys. 2. Przebieg akceleracji wirnika SNC w procesie rozruchu zimnego silnika DR 77

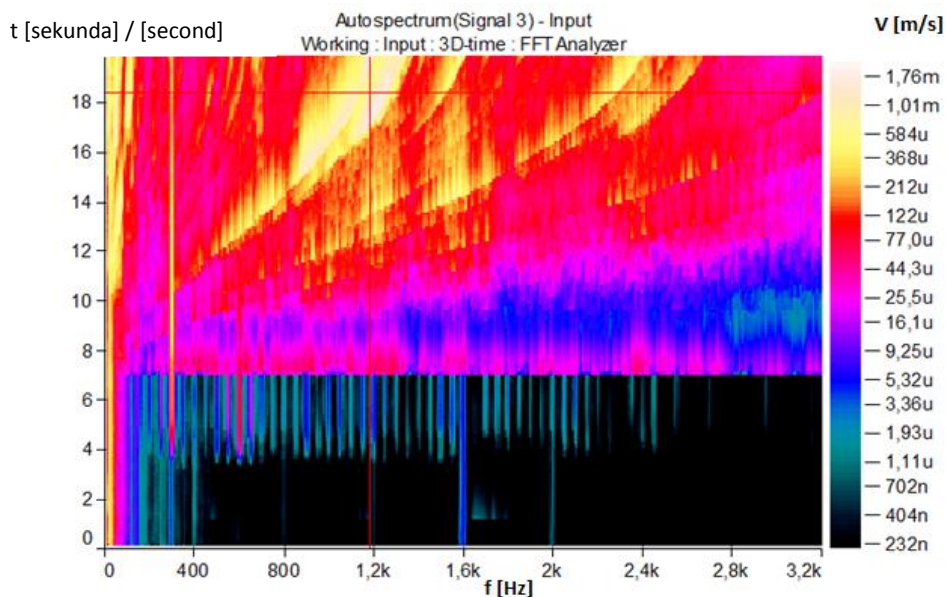
Fig. 2. An acceleration distribution for the rotor SNC when starting a cold engine DR 77

Synchroniczny pomiar drgań pozwala zidentyfikować poprawność rozruchu lub wykryć ewentualne rezonanse, których pojawienie się powinno być indywidualną cechą charakterystyczną dla każdego z silników turbinowych (rys. 3.).

Zastosowanie analizy rzędów umożliwia w procesie rozruchu identyfikację cech charakterystycznych w postaci rezonansów indywidualnych dla każdego egzemplarza silnika (rys. 4.). Widoczne wzmocnienia sygnału pierwszego rzędu dla prędkości obrotowej $n_{SNC} = 1100$ obr/min (Hz) i $n_{SNC} = 1490$ obr/min (Hz) odpowiadają częstościom drgań własnych wirnika SNC zidentyfikowanym w modelu wykonanym w MES z dokładnością częstotliwości do 1,5 Hz.

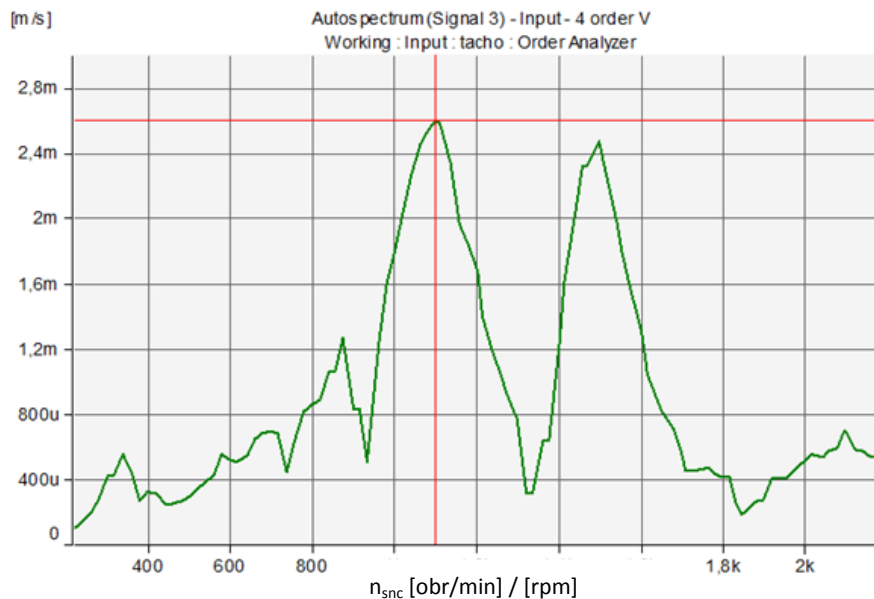
A synchronic measurement of vibrations allows for identification of correctness in the starting or detection of eventual resonance magnitudes, whose occurrence should be an individual feature of each turbine engine (fig. 3).

Using order analysis in the starting process can allow for identification of features in the form of individual resonance magnitudes for each engine (fig. 4) The noticeable strengthening of the first order signal at the rotational speed $n_{SNC} = 1100$ rpm (Hz) and $n_{SNC} = 1490$ rpm (Hz) corresponds to the SNC rotor own vibration frequencies, identified in the model developed in MES with frequency accuracy up to 1.5 Hz.



Rys. 3. Pomiar drgań silnika typu DR 77 podczas zimnego rozruchu z zastosowaniem synchronizmu sygnału od wirnika SNC

Fig. 3. The measurement of vibrations in the engine type DR 77 in the course of cold engine starting using signal synchronism from the SNC rotor



Rys. 4. Przykładowa charakterystyka pierwszego rzędu od SNC silnika DR 77 w procesie zimnego rozruchu

Fig. 4. An example of the first order characteristic from the SNC of the engine DR 77 in the course of cold starting

DIAGNOZOWANIE PROCESU WYBIEGU SILNIKA

Badania diagnostyczne w procesie wybiegu silnika turbinowego nie są zbyt często stosowane, aczkolwiek można znaleźć rozwiązania wysoce zaawansowane technologicznie, oparte na badaniach modelowych [17]. Wstępną identyfikację stanu technicznego układu łożyskowego i traktu przepływowego można przeprowadzić, analizując proces deceleracji wirników w czasie (rys. 5.).

Proces analizy polega na doprowadzeniu silnika do minimalnej prędkości obrotowej bez obciążania tzw. biegu jałowego, a po jego wychłodzeniu (około pięć minut) pomiarze parametrów w trakcie deceleracji. Ocena odcinków czasu pomiędzy prędkością $n_{GG} = 5000$ obr/min a poszczególnymi kontrolnymi prędkościami, tj. $n_{GG} = 3000$ obr/min, 2000 obr/min i 1000 obr/min, pozwala na jakościową, porównawczą analizę stanu łożyskowego układu wirnikowego. Zmniejszenie się czasu pomiędzy punktami kontrolnymi oznacza wzrost oporów tarcia na skutek degradacji układu łożyskowego lub wzrost oporu aerodynamicznego w łopatkach i kierownicach. Wzrost czasu wybiegu w poszczególnych punktach kontrolnych, rzadko spotykany, może być efektem zanieczyszczenia wnętrza bębna wirnikowego w wyniku uszkodzenia uszczelnień i powstania nagaru olejowego. Efekt ten powoduje wzrost masy wirnika, który skutkuje przyrostem czasu etapów wybiegu.

Analizę ilościową można prowadzić z wykorzystaniem procedury analitycznej

DIAGNOSING AN ENGINE COASTING PROCESS

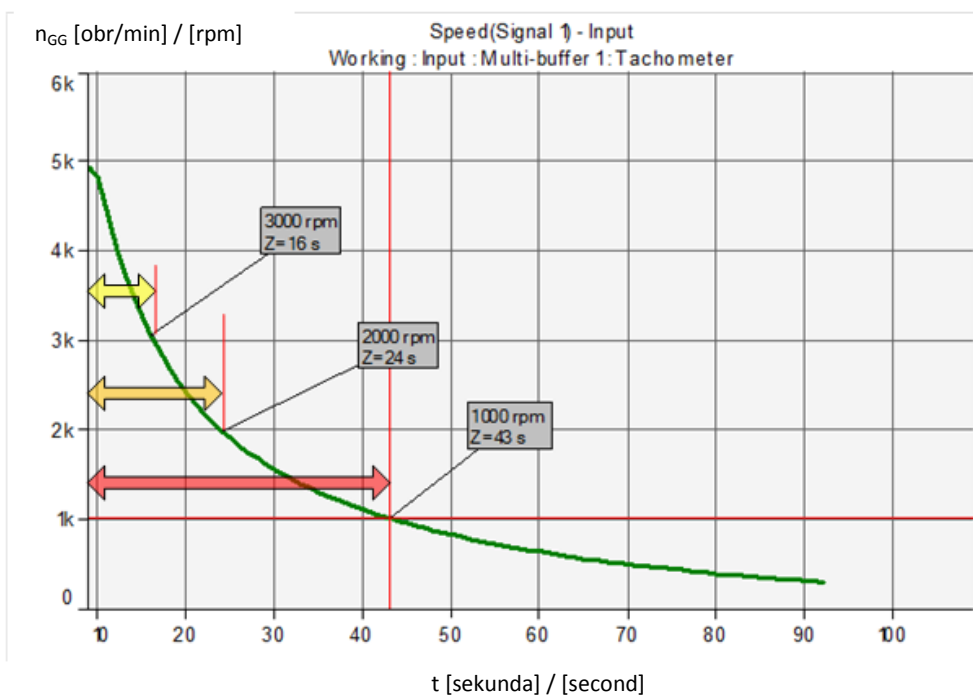
Diagnostic tests relating to the process of a turbine engine coasting are not very frequent. However, there are highly advanced technologies developed on the basis of model centered studies [17]. The preliminary identification of the technical condition of a bearing set and a flow duct can be made by analyzing the deceleration process in engines over time (fig. 5).

The analysis process involves bringing an engine to the minimum rotational speed without putting the so called idle running under load, and measuring the deceleration parameters after it has cooled (approx. 5 minutes). The evaluation of time periods between the speed $n_{GG} = 5000$ rpm and the individual control speed magnitudes i.e. $n_{GG} = 3000$ rpm, 2000 rpm and 1000 rpm, allows for qualitative, comparative analysis of the condition of a bearing set in a rotational system. Time decrease between particular control points indicates increase in friction resistance caused by bearing system degradation or by increase in aerodynamic resistance in vanes and stators. Time increase relating to coasting at individual control points, rarely recorded, may be a result of polluting the inside of rotor drums caused by sealing failures and formation of oil residues. This causes increase in the weight of rotor, which in turn causes increase in the amount of time relating to each coasting stage.

A quantitative analysis can be carried out using the analytical procedure of

śledzenia rzędów [18]. Badania odniesione do poszczególnych rzędów, charakteryzujących stałe wartości harmonicznych przy ich zmianach wartości w dziedzinie częstotliwości, umożliwiają identyfikację charakterystyk dynamicznych silnika w procesie wybiegu.

tracking orders [18]. Tests related to the particular orders, which characterize constant harmonic magnitudes with regard to their changes in the frequency domain, allow for identification of engine dynamic characteristics in the coasting process.



Rys. 5. Analiza czasu wybiegu wirnika silnika turbinowego

Fig. 5. An analysis of coasting time in a turbine engine rotor

Przedstawiona na rysunku 6. charakterystyka pierwszego rzędu wytwornicy spalin silnika LM 2500 obrazuje zmiany wartości przyspieszeń drgań w dziedzinie czasu. Znając charakterystykę czasową wybiegu (rys. 4.), poszczególnym punktom czasowym można przyporządkować określone prędkości obrotowe wirnika. Dzięki takiemu zabiegowi kolejne zmiany wartości pierwszego rzędu dla prędkości wytwornicy spalin pozwalają zidentyfikować lokalne rezonanse oraz częstości drgań własnych

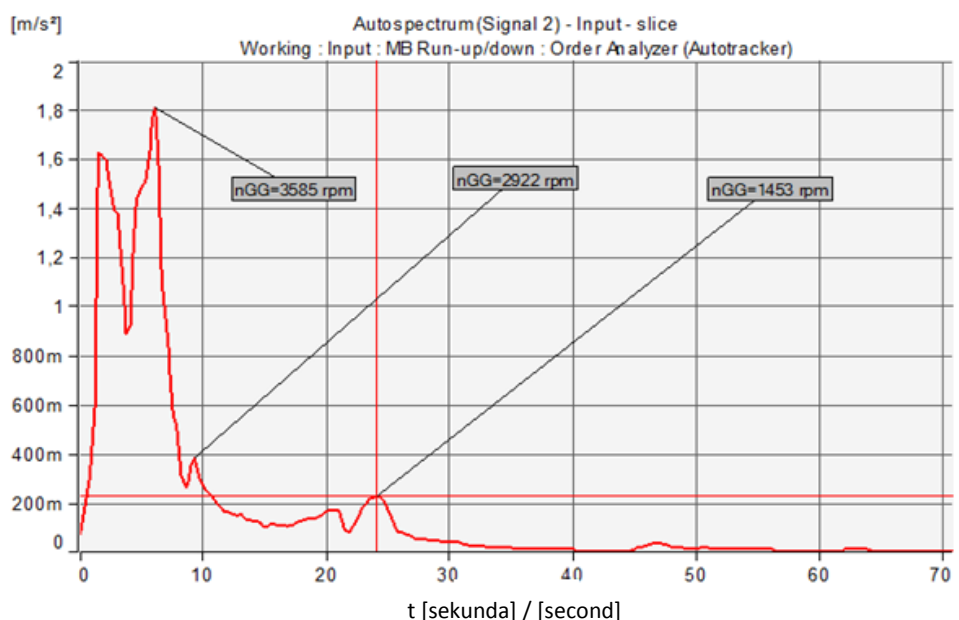
The first order characteristic of an engine gases generator LM 2500 presented in figure 6 illustrates changes in the vibration acceleration magnitude in the time domain. Knowing the time characteristic relating to coasting (fig. 4) specific rotor rotational speed magnitudes can be ascribed to the particular time points. Owing to this action, the successive first order changes relating to gases generator allow for identification of local resonance magnitudes and own vibration frequencies relating to the

charakterystycznych dla układu wirnikowego w zakresie analizowanych częstotliwości. Wykonanie takiej charakterystyki dla nowego, sprawnego silnika umożliwia stworzenie charakterystyki wzorcowej i obserwację ewentualnych zmian eksploatacyjnych w dziedzinie amplitudy i częstości. Podobną charakterystykę dla silnika DR 77 przedstawia rysunek 7.

Zmiany wartości amplitud odnoszą się do zmian wyrównoważenia wirników, natomiast zmiany w dziedzinie częstotliwości charakteryzują zmiany sztywności posadowienia wirników, a więc zmiany stanu technicznego układów łożyskowych. Przeprowadzone badania umożliwiły przedstawienie charakterystyk zmian jako trendu amplitud i częstotliwości (rys. 8. i 9.).

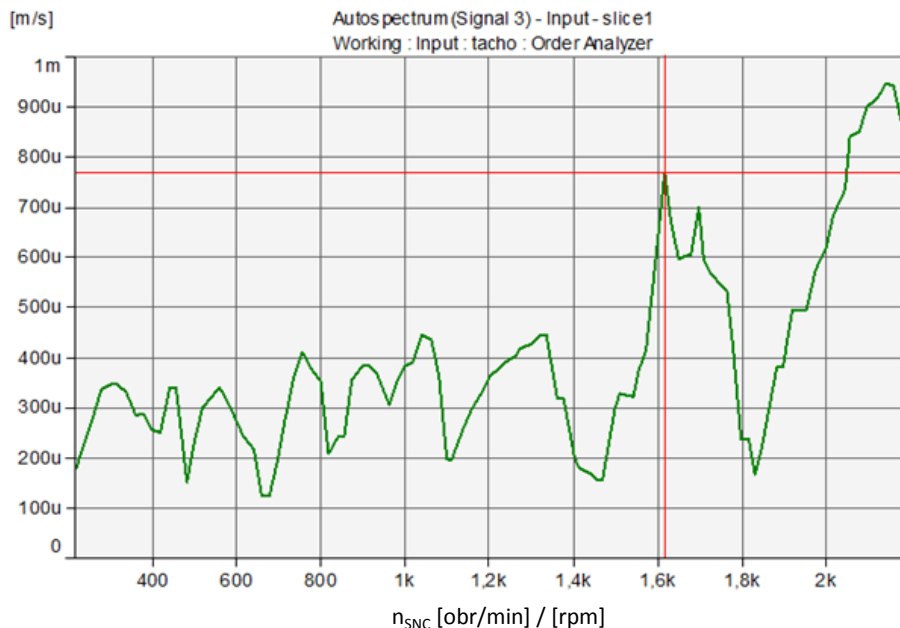
rotor set with regard to the range of the analyzed frequencies. Working out such a characteristic for a new, being in working condition, engine allows for developing a model characteristic and observation of eventual operating changes in the domain of amplitude and frequency. A similar characteristic for the engine DR 77 is presented in figure 7.

Changes in amplitude magnitudes refer to changes in rotor balancing, whereas the changes in the frequency domain are characterized by changes in rigidity of rotor mounting, i.e. changes in the technical condition of bearing sets. The tests carried out have been used to present the change in characteristics as an amplitude and frequency trend (fig. 8 and 9).



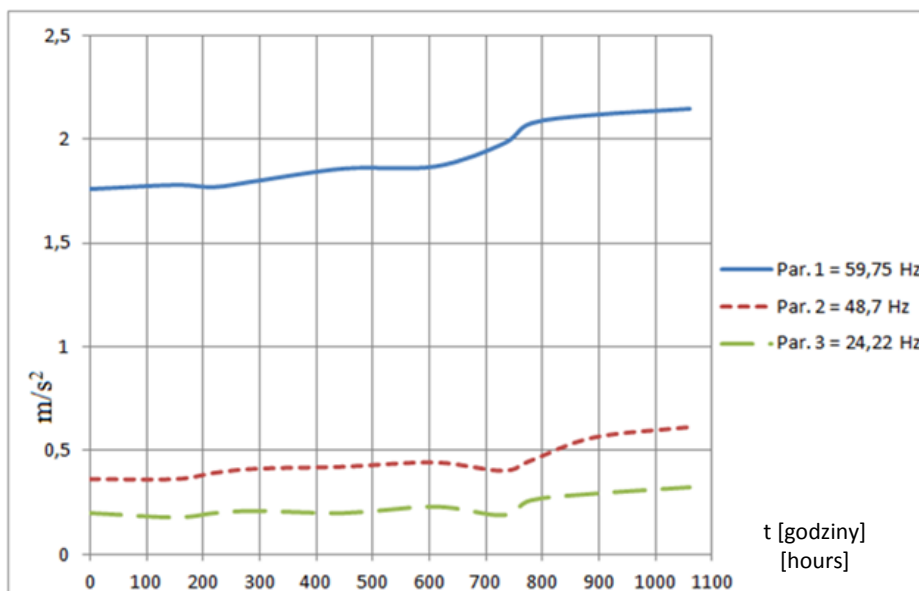
Rys. 6. Przykładowa analiza śledzenia pierwszego rzędu GG silnika LM 2500 w funkcji czasu wybiegu

Fig. 6. An example of analysis of the first order tracking for the GG engine LM 2500 in the function of coasting time



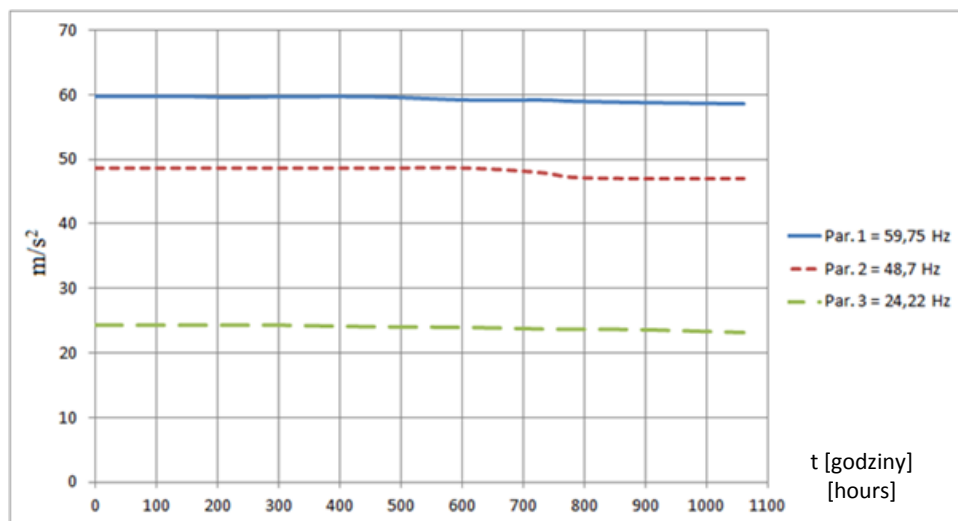
Rys. 7. Przykładowa analiza śledzenia pierwszego rzędu SNC silnika DR 77 w funkcji zmian prędkości wybiegu (deceleracja)

Fig. 7. An example of analysis of the first order tracking for the SNC engine DR 77 in the function of changes in coasting speed (deceleration)



Rys. 8. Przykładowa analiza trendu charakterystycznych pierwszego rzędu GG silnika LM 2500

Fig. 8. An example of trend-related analysis of the first order characteristics for the GG engine LM 2500



Rys. 9. Przykładowa analiza trendu wartości charakterystycznych pierwszego rzędu GG silnika LM 2500

Fig. 9. An example of trend-related analysis of the first order characteristic magnitudes for the GG engine LM 2500

Proces degradacji stanu technicznego układu wirnikowego wskazuje na wzrost wartości amplitud wszystkich trzech częstotliwości charakterystycznych dla pierwszego rzędu oraz zmniejszenie się wartości częstotliwości charakterystycznych w trakcie eksploatacji, co jest efektem zmniejszenia się sztywności podpór łożyskowych.

WNIOSKI

Badania wielosymptomowe okrętowych turbinowych silników spalinowych są obecnie powszechnie stosowaną praktyką diagnostyczną. Monitorowanie parametrów termo-gazodynamicznych i drganiowych oraz wykorzystanie systemów eksperckich lub sieci neuronowych umożliwia w trybie on-line wczesne wykrycie symptomów uszkodzeń lub zużycia. Systemy takie są najczęściej wykorzystywane w identyfikacji uszkodzeń po uzyskaniu określonej prędkości

The degradation process of the technical condition of a rotor set indicates an increase in amplitude magnitudes with regard to all three frequencies characteristic of the first order and decrease in frequency magnitudes characteristic of the operating process, which is the result of a decrease in the rigidity of bearings.

CONCLUSIONS

Multi-symptom tests of marine turbine engines are, at present commonly used in diagnostics. Monitoring thermogasodynamic and vibration parameters as well as the use of expert systems or neuron networks allow for the detection of failure or wear symptoms on-line. Such systems are most often used to identify failures after the engine reaches a specific rotational speed in order to avoid errors in identifying failures, e.g. too low lubrication oil

obrotowej przez silnik w celu uniknięcia błędów identyfikacji uszkodzeń, na przykład zbyt niskiego ciśnienia oleju smarowego w procesie rozruchu. Oznacza to eliminację prędkości niższych niż eksploatacyjne z procedur diagnostycznych. Badania w trybie off-line realizowane w stanach nieustalonych powinny stanowić uzupełnienie zakresu badań diagnostycznych, tym bardziej że mogą potwierdzić niektóre z diagnoz realizowanych w trybie on-line lub zidentyfikować inne, nierozpoznawalne przez systemy monitoringu.

Podstawowymi zaletami zastosowania procedur diagnostycznych w procesie zimnego rozruchu i wybiegu silnika są:

- większa wrażliwość wyników pomiarów ze względu na eliminację zakłóceń wynikających z dyssypacji energii w procesie spalania paliwa;
- możliwość identyfikacji zmian sztywności podpór łożyskowych obserwowanych w analizie rzędów;
- możliwość wykonywania badań w porcie bez konieczności uruchamiania silników — rozruchy zimne;
- możliwość wykonywania analiz trendu szerokiej gamy parametrów drganiowych wrażliwych na wczesne zmiany stanu technicznego układów wirnikowych.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Bendat J. S., Piersol A. G., *Random data: Analysis and measurement procedures*, 2nd ed., John Wiley, New York 1986.
- [2] Byington C. S., Watson M., Roemer M. J., Galie T. R., McGroarty J. J., *Prognostic Enhancements to Gas Turbine Diagnostic Systems*, Aerospace Conference Proceedings, 'IEEE', 2002, Vol. 6, pp. 2815–2824.
- [3] Czech P., Wojnar G., Burdzik R., Konieczny Ł., Warczek J., *Application of the discrete wavelet transform and probabilistic neural networks in IC engine fault diagnostics*, 'Journal of Vibroengineering', Vol. 16, Issue 4, 2014, pp. 1619–1639.
- [4] Dąbrowski Z., Dziurdź J., Klekot G., *Studies on propagation of vibroacoustic energy and its influence on structure vibration in a large-size object*, 'Archives of Acoustics', 2007, Vol. 32, No 2, pp. 231–240.

pressure in the starting process. This means eliminating speed magnitudes from the diagnostic procedures lower than the operating speed. Testing off-line relating to transient states should be a supplement to diagnostic tests, the more so as they can positively verify some of the diagnoses made on-line, or identify others, unrecognizable by the monitoring system.

The main advantages of using diagnostic procedures in the process of engine cold starting and coasting are:

- higher sensitivity of measurement results due to elimination of interference caused by dissipation of energy during the fuel burning process;
- capacity to identify changes in bearing rigidity observed during an analysis of particular orders;
- capacity to carry out tests in port, without a necessity to start engines — cold starting;
- capacity to do trend-related analyses with regard to a wide range of vibration parameters sensitive to early changes in the technical condition of rotor sets.

- [5] Devaney M., Cheetham B., *Case-Based Reasoning for Gas Turbine Diagnostics*, 18th International FLAIRS Conference (FLAIRS-05), pp. 1–6.
- [6] Downham E., Woods R., *The rationale of monitoring vibration on rotating machinery*, ASME Vibration Conference, Paper 71-Vib-96, September 1971.
- [7] Dziurdź J., *Transformation of Nonstationary Signals into Pseudostationary Signals for the Needs of Vehicle Diagnostics*, 'Acta Physica Polonica' A, 2010, Vol. 118, pp. 49–53.
- [8] Grządziela A., Charchalis A., *Diagnosing of naval gas turbine rotors with the use of vibroacoustic parameters*, International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, COMADEM 2001, Manchester, UK, pp. 495–502.
- [9] Grządziela A., *Diagnosing of Naval Gas Turbine Rotors*, International Carpathian Control Conference, Krynica 2001, pp. 461–466.
- [10] Grządziela A., *Dynamic problems of shaftlines*, 'Diagnostyka', 2007, No 4, pp. 5–10.
- [11] Joly R. B., Ogaji S. O. T., Singh R., Probert S. D., *Gas-turbine Diagnostics Using Artificial Neural-networks for a High Bypass Ratio Military Turbofan Engine*, 'Applied Energy', 2004, Vol. 78, Issue 4, pp. 397–418.
- [12] Kim K., Uluyol O., Parthasarathy G., Mylaraswamy D., *Fault Diagnosis of Gas Turbine Engine LRUs Using the Startup Characteristics*, Annual Conference of Prognostics and Health Management Society, 2012, pp. 1–10.
- [13] Krzyworzeka P., Adamczyk J., Cioch W., Jamro E., *Monitoring of nonstationary states in rotating machinery*, Kraków 2008.
- [14] Li Y. G., *A Gas Turbine Diagnostic with Transient Measurements*, 'Journal of Power and Energy', 2003, Vol. 217, No 2, pp. 169–177.
- [15] Łazarz B., Wojnar G., *Averaging of The Vibration Signal with the Synchronizing Impulse Location Correction in Tooth Gear Diagnostics*, 'Diagnostyka', 2007, No 4, pp. 19–24.
- [16] Maalouf M., *Gas Turbine Vibration Monitoring — An Overview*, 'ORBIT', 2005, Vol. 25, No 1, pp. 49–62.
- [17] May D., Farber S., Poirier V., Chen Ch. Y., Stiharu I., *Design of a Comprehensive Condition Monitoring System for Gas Turbine Engines*, Proceedings of the Canadian Engineering Education Assosation, May 2004.
- [18] Pedersen T. F., Gade S., Harlufsen H., Konstantin-Hansen H., *Order tracking in Vibro-acoustic Measurements: A Novel Approach Eliminating the Tacho Probe*, 'Technical Review', 2006, No 1, Brüel & Kjær, pp. 15–28.
- [19] Randall R. B., *Frequency Analysis*, Brüel & Kjær, Denmark 1987.
- [20] Sarkar S., Mukherjee K., Ray A., Yasar M., *Fault Diagnosis and Isolation in Aircraft Gas Turbine Engines*, American Control Conference, Westin Seattle Hotel, Seattle — Washington, June 11–13, 2008, pp. 2166–2177.
- [21] Stamatis A. G., *Engine Condition Monitoring and Diagnostics*, Engine Condition Monitoring and Diagnostics, Progress in Gas Turbine Performance, Chapter 8, pp. 187–212.