

**ZESZYTY NAUKOWE NR 1(73)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

EXPLO-SHIP 2004

Zbigniew Korczewski

**Badania procesu przepływu spalin w kanale zasilającym
pulsacyjny układ turbodoładowania silnika okrętowego
dla potrzeb diagnostyki**

Słowa kluczowe: diagnostyka, silniki okrętowe, turbodoładowanie

Przedstawiono wyniki badania eksperymentalnego procesu przepływu spalin w kanale zasilającym pulsacyjny układ doładowania czterosuwowego silnika okrętowego Sulzer 6AL20/24. Badanie miało na celu identyfikację procesów gazodynamicznych, realizowanych w wydzielonej objętości kontrolnej kanału dla potrzeb diagnozowania układów cylindrowych oraz turbosprężarki w warunkach eksploatacji tego typu silników na okrętach.

**Examination of the Exhaust Flow Process
in a Passage Feeding the Pulsatory Turbocharging System
of a Marine Diesel Engine for Diagnostic Purposes**

Key words: diagnosis, marine engines, turbocharging

This article presents some experimental research results concerning the exhaust flow process in a passage feeding the pulsatory supercharging system of a four-stroke marine engine Sulzer 6AL20/24. The investigation aimed to identify gas dynamic processes taking place in a separated control gas space of the passage. The gas dynamic identification is intended for diagnosis of a cylinder system as well as a turbocharger carried out in operating conditions of such engines.

Wprowadzenie

Do napędu większości okrętów wojennych będących w wyposażeniu Polskiej Marynarki Wojennej są stosowane silniki czterosurowe o zapłonie samoczynnym szybko- lub średnioobrotowe doładowane turbosprężarkami. Turbosprężarka jako integralna część silnika stanowi dla niego źródło strumienia masy powietrza zasilającego.

Tematyka niniejszego artykułu omawia lub analizuje zagadnienie diagnozowania układów wymiany ładunku i turbodoładowania okrętowych silników spalinowych w warunkach eksploatacyjnych na podstawie badania procesów gazodynamicznych w kanale zasilającym turbosprężarkę

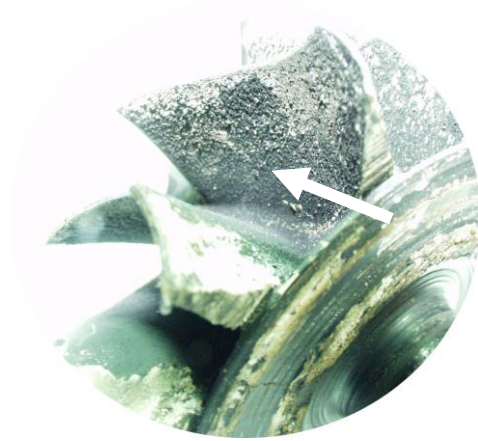
1. Stany niezdatności eksploatacyjnej turbosprężarki

W czasie pracy silnika na okręcie do kanału przepływowego układu turbodoładowania mogą się przedostawać różne substancje, zawarte z jednej strony w zasysanym powietrzu dolotowym, z drugiej zaś – w spalinach opuszczających cylindry silnika. Tworzą one na powierzchniach kanału przepływowego oraz w kanałach międzyłopatkowych zespołu wirnikowego turbosprężarki trudno usuwalne osady. Potwierdzają to zarejestrowane wyniki badań endoskopowych (rys. 1). W rezultacie powstających osadów wzrasta masa wirnika turbosprężarki i zmniejsza się jego prędkość obrotowa. Zmniejszają się czynne pola przekrojów przepływu kanałów międzyłopatkowych sprężarki i turbiny. Spada sprawność, spręż i strumień masy powietrza przepływającego przez sprężarkę, a także zapas jej statecznej pracy (szczególnie w procesach przejściowych). Ma to oczywiście negatywny wpływ na jakość wymiany ładunku w cylindrach oraz proces spalania, w tym przypadku niecałkowity i niezupełny.

W konsekwencji na powierzchniach kanału przepływowego części turbiny intensyfikuje się proces powstawania nagaru. Dotyczy to zwłaszcza łopatek kierowniczych i wirnikowych turbiny oraz uszczelnień labiryntowych. Pogłębia to niekorzystne zjawiska towarzyszące zanieczyszczeniu kanału powietrza doładowującego. Dodatkowo w wyniku powstawania osadów zanieczyszczeń na wirniku turbosprężarki może dojść do utraty stabilności układu mechanicznego i zjawiska drgań rezonansowych, powodującego z kolei przyspieszone zużycie łożysk wału, a także pęknięcia zmęczeniowe łopatek wirnika (rys. 2).

Z doświadczeń eksploatacyjnych wynika, że grubość warstwy osadu łopatek sprężarkowych może sięgać kilkudziesięciu mikrometrów, zaś łopatek turbinowych nawet kilkuset mikrometrów [1], co przy niewielkiej masie i rozmiarach zespołu wirnikowego oraz bardzo dużych prędkościach obrotowych

(do 100 000 obr/min) wywiera znaczący wpływ na osiągi i sprawność turbosprężarki i oczywiście silnika.

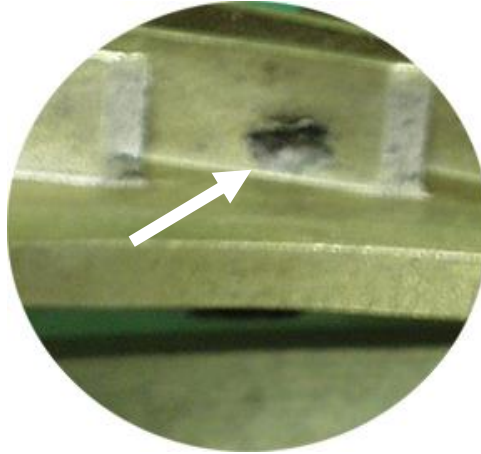


Rys. 1. Osady zanieczyszczeń na wirniku turbosprężarki
Fig. 1. Deposits on surfaces of the turbocharger rotor



Rys. 2. Pęknięcie zmęczeniowe łopatki wirnikowej turbosprężarki
Fig. 2. Fatigue crack of the turbocharger rotor blade

Innym czynnikiem eksploatacyjnym destrukcyjnie oddziałującym na strukturę konstrukcyjną turbosprężarki jest zjawisko erozji, wywołane obecnością w przepływającym czynniku roboczym twardych cząsteczek pochodzenia mineralnego – w przypadku powietrza oraz nagaru i smolistych substancji, jako produktu niecałkowitego spalania paliwa w cylindrach (rys. 3).

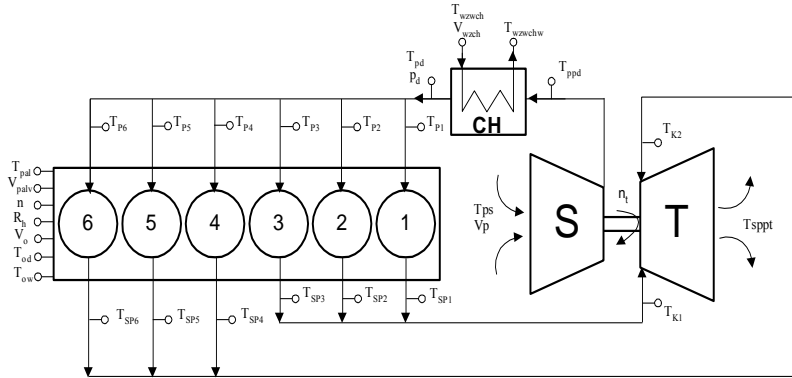


Rys. 3. Wżery erozyjne na łopatkach kierowniczych dyfuzora sprężarki
Fig. 3. Erosion pits on the compressor vane diffuser

Oba niekorzystne zjawiska są przyczyną zużywania się powierzchni kanałów przepływowych, zmiany geometrii i kształtu kanałów międzyłopatkowych sprężarki i turbiny, a także zwiększenia (nawet kilkukrotnego) chropowatości powierzchni. W konsekwencji wzrastają straty hydrauliczne przepływu czynnika roboczego w układzie turbodoładowania, przy znacznym pogorszeniu jego cech dynamicznych. Wzrastają inercje w układzie mechanicznym i gazodynamicznym, ze wszystkimi tego konsekwencjami.

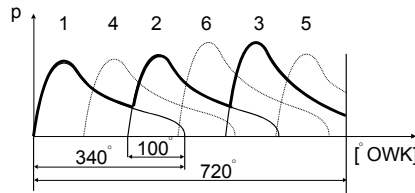
2. Obiekt badania

Przedmiotem badania jest układ turbodoładowania czterosuwowego sześciocylinrowego silnika Sulzer typu 6AL20/24 z pulsacyjnym zasilaniem turbiny Napier C-045C pracującej w tzw. systemie Buchi i chłodzeniem powietrza doładowującego (rys. 4). W skład rozpatrywanego układu wchodzi następujące podzespoły: zespół wirnikowy turbosprężarki z turbiną T i sprężarką promieniową S , kanały przepływowe powietrza i spalin, chłodnica powietrza doładowującego silnik CH . Na schemacie zaznaczono również miejsca pomiaru parametrów wolnozmiennych silnika, dokonywanych standardowo za pomocą zestawu pomiarowo-rejestrującego, opracowanego specjalnie w tym celu w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów Akademii Marynarki Wojennej. Rejestracja wartości parametrów odbywa się z częstotliwością próbkowania 10 Hz.



Rys. 4. Schemat układu turbodoładowania silnika Sulzer typu 6AL20/24
 Fig. 4. A diagram of the turbocharging system of a 6AL20/24 Sulzer diesel engine

Pojedynczy układ doładowania silnika, o kolejności wtrysku paliwa 1-4-2-6-3-5, jest wyposażony w turbinę promieniową z dwukanałowym pulsacyjnym zasilaniem spalinami. Przebieg zmienności ciśnienia spalin w kanałach przed turbiną ma charakter zbliżony do przedstawionego na rysunku 5. Takie rozwiązanie, w którym otwarcie zaworu wylotowego trwa $\alpha_w = 340^\circ$ obrotu wału korbowego, zapewnia korzystny efekt nakładania się impulsów fali ciśnienia z dwóch cylindrów przez $\alpha_w = 100^\circ$ OWK. Dzięki temu w kanałach wylotowych najniższe ciśnienie spalin jest wyższe od przeciwcisnienia wylotu. Uzyskuje się w ten sposób poprawę sprawności turbiny, jednak odbywa się to kosztem większych nakładów pracy na usuwanie spalin (większe jest przeciwcisnienie w kanale wylotu spalin).



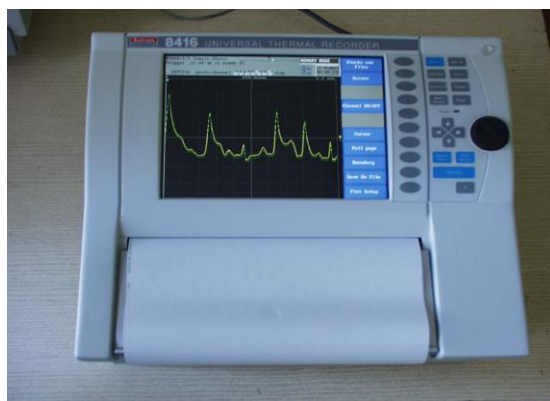
Rys. 5. Przebieg zmienności ciśnienia spalin w kanałach spalin wylotowych przed turbiną silnika Sulzer typu 6AL20/24
 Fig. 5. Exhaust gas pressure changes in outlet passages of a 6AL20/24 Sulzer diesel engine before the turbine

Z przebiegu krzywych na rysunku 5 jest widoczne również pewne zmniejszenie amplitud przepływających fal ciśnienia spalin z cylindrów położonych w środkowej części kanałów wylotowych, blisko turbiny, w stosunku do cylindrów, których ujścia do wspólnego kanału wylotowego są najbardziej oddalone

od turbiny. Zjawisko to wynika z charakteru procesu rozprężania spalin z cylindrów środkowych, gdzie rozprężanie spalin odbywa się w obu kierunkach: do turbiny i do początku kanału, co jest połączone ze znaczną stratą energii. Jest ona tym większa, im większa jest objętość bocznych odgałęzień kanału połączeniowego [2, 3].

3. Aparatura pomiarowa

Specyfika badania szybkozmiennych procesów gazodynamicznych w układzie zasilania turbosprężarki silnika okrętowego narzuca konieczność wykorzystania wysokiej klasy aparatury pomiarowej. Do badania zastosowano rejestrator cyfrowy typu SEFRAM 8416, dający możliwość jednoczesnego pomiaru i automatycznej rejestracji 16 parametrów kontrolnych z częstotliwością próbkowania do 250 kHz (rys. 6).

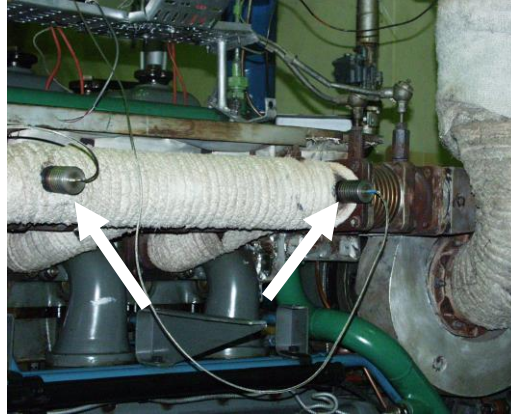


Rys. 6. Widok rejestratora cyfrowego SEFRAM 8416 – zapis przebiegu zmienności ciśnienia spalin w kanale zasilającym turbosprężarkę

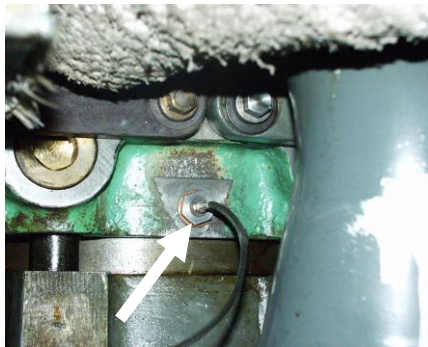
Fig. 6. SEFRAM 8416 digital recorder used for recording exhaust gas pressure changes in the passage feeding the compressor

Do pomiaru ciśnień w zbiorczym kanale spalin wylotowych zasilających turbosprężarkę silnika zastosowano dwa czujniki światłowodowe firmy OPTRAND typu C11294-Q o zakresie pomiarowym 0-7 bar i klasie dokładności 1.0 (rys. 7). Wielką zaletą tego typu czujników jest ich znikoma inercyjność 15-50 kHz ($T = 60 \mu\text{s}$).

Do indykowania ciśnienia wewnątrz cylindrowego wykonano specjalny kanał pomiarowy do komory spalania cylindra nr 6, w którym zamontowano również światłowodowy czujnik ciśnienia firmy OPTRAND typu C31294-Q o zakresie pomiarowym 0 – 200 bar i klasie dokładności 1.0 (rys. 8).



Rys. 7. Pomiar ciśnienia spalin w kanale zasilającym turbosprężarkę
Fig. 7. Places of fixing the exhaust gas pressure gauges in the passage feeding the turbocompressor



Rys. 8. Miejsce zamontowania czujnika ciśnienia wewnątrz cylindrowego
Fig. 8. Place of fixing the inside-cylinder pressure gauge



Rys. 9. Pomiar prędkości obrotowej wału korbowego silnika
Fig. 9. Place of fixing the inductive gauge for crankshaft rpm

Pomiar prędkości obrotowej wału korbowego silnika wykonywany czujnikiem indukcyjnym ze znacznika na kole zamachowym; zakres pomiarowy do 800 obr/min, przy klasie dokładności 0.1 (rys. 9). Natomiast pomiar prędkości obrotowej wirnika turbosprężarki wykonywano czujnikiem magnetoelektrycznym, wykorzystując dwa impulsy znaczników zamontowanych na wale sprężarki; zakres pomiarowy do 40 000 obr/min, przy klasie dokładności 0.5 (rys. 10).



Rys. 10. Pomiar prędkości obrotowej wirnika turbosprężarki
Fig. 10. Place of fixing the magnetoelectronic gauge for TBC rotor rpm

4. Przebieg badania

Celem badań było dokonanie wstępnej oceny wpływu zmian stanu technicznego silnika na prędkość rozchodzenia się fali ciśnienia spalin w kanale zasilającym turbosprężarkę.

Realizacja eksperymentu polegała na zakłóceniu ustalonej pracy silnika przy obciążeniu $0,4 P_{nom}$ przez wyłączenie z pracy jednego cylindra, przy zablokowanej listwie paliwowej. W ten sposób zasymulowano pracę silnika w stanie częściowej zdatności technicznej. Jednocześnie dokonywano pomiarów parametrów gazodynamicznych z częstotliwością próbkowania 20 kHz, obejmujące:

- ciśnienie wewnątrzcyldrowe układu nr 6, p_w ;
- ciśnienie dynamiczne w przekroju kontrolnym 1 kanału połączeniowego, p_{1dyn} ;
- ciśnienie statyczne w dwóch przekrojach kontrolnych 1 i 2 kanału połączeniowego znajdujących się od siebie w odległości $L = 0,583$ m, p_1, p_2 ;
- prędkość obrotową wału korbowego silnika, n ;
- prędkość obrotową wirnika turbosprężarki, n_t ,

które przeprowadzono w dwóch stanach silnika różnych od siebie:

- stan pełnej zdatności technicznej, tzw. odniesieniowy, przy nominalnym wyregulowaniu elementów sterujących;
- stan częściowej zdatności technicznej, przy wyłączonym z pracy jednym cylindrze.

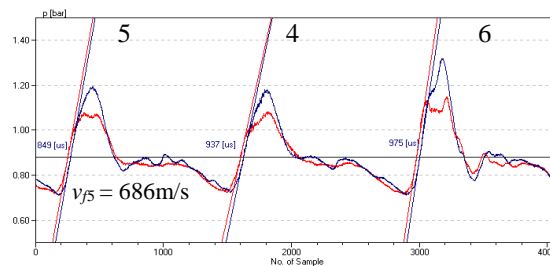
5. Analiza gazodynamiczna zarejestrowanych przebiegów

W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano przebiegi w funkcji czasu parametrów gazodynamicznych charakteryzujących stan energetyczny kanału zasilającego turbosprężarkę, jako odpowiedź na wprowadzone zakłócenie funkcjonowania silnika – wyłączenie z pracy cylindra nr 6. Na rysunkach 11 i 12 przedstawiono zarejestrowane podczas pomiarów przebiegi zmian ciśnienia spalin w wydzielonej objętości kontrolnej rozpatrywanego kanału. Przebiegi cechują deformacje, wynikające z błędów pomiaru oraz zakłóceń, związanych głównie ze zjawiskiem odbijania i nakładania się fal ciśnienia, działania regulatora prędkości obrotowej silnika itd. [2, 3, 5].

W celu odtworzenia wiarygodnych przebiegów konieczne jest zminimalizowanie wpływu czynników je zniekształcających, przez uśrednianie w dziedzinie kąta obrotu wału korbowego. Z dowolnej liczby kolejnych cykli pracy silnika (każdy cykl obejmuje dwa obroty wału korbowego) utworzono jeden przebieg uśredniony, a następnie wyznaczono średni czas przemieszczenia się narastającego zbocza impulsu fali ciśnienia spalin dla każdego cylindra, przyjmując ten parametr jako substytut czasu przemieszczania się szczytowej amplitudy adekwatnej fali ciśnienia spalin.

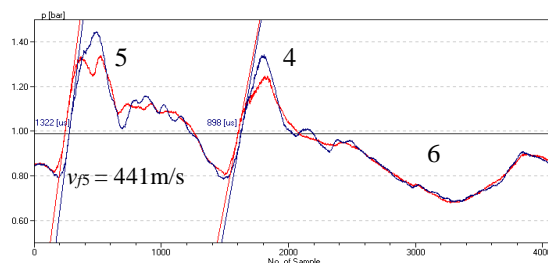
Z zarejestrowanych przebiegów wynika, że wyłączenie z pracy jednego cylindra wywołuje ilościowe i jakościowe zmiany pulsacji ciśnienia spalin w kanale zasilającym turbinę. Wyniki badań dowodzą, że nastąpiła istotna zmiana charakteru impulsów ciśnienia spalin sprzężonych z cylindrami 4 i 5, które zostały dociążone (wzrosły amplitudy impulsów). Należy sądzić, że jest to spowodowane pogorszeniem warunków wtrysku i spalania paliwa w tych cylindrach.

Z zarejestrowanych przebiegów wynika również, że istnieje korelacja pomiędzy dawką paliwa zasilającego dany układ cylindrowy a amplitudą odpowiedniego (sprzężonego z nim) impulsu ciśnienia spalin w kanale.



Rys. 11. Przebiegi zmienności ciśnienia spalin w przekrojach kontrolnych 1 i 2 kanału zasilającego turbosprężarkę silnika Sulzer 6AL20/24 w stanie pełnej zdolności technicznej

Fig. 11. Exhaust gas pressure changes in the control cross-section 1 and 2 of the passage feeding the turbocharger of a Sulzer 6AL20/24 – for the engine in full service capability state



Rys. 12. Przebiegi zmienności ciśnienia spalin w przekrojach kontrolnych 1 i 2 kanału zasilającego turbosprężarkę silnika Sulzer 6AL20/24 w stanie częściowej zdatności technicznej – przy wyłączonym z pracy cylindrze nr 6

Fig. 12. Exhaust gas pressure changes in the control cross-section 1 and 2 of the passage feeding the turbocharger of a Sulzer 6AL20/24 – for the engine in partial service capability state – at shut-down cylinder 6

Zaobserwowane zjawisko „zapadania się” amplitudy impulsu ciśnienia (rys. 12) jest wywołane najprawdopodobniej efektem cofnięcia się spalin do cylindra w okresie otwarcia zaworów wylotowych oraz interferencją fal ciśnienia pierwotnych i odbitych od dyszy turbiny [4, 6].

Oceniając wpływ symulowanego defektu na prędkość rozchodzenia się fali ciśnienia spalin w kanale można wnioskować, że wywołał prawie 70% spadek jej wartości. Spadła energia kinetyczna spalin zasilających turbinę, zmniejszyła się prędkość obrotowa wirnika turbosprężarki, a zatem również wydajność sprężarki. Oczywiście miało to bardzo istotny wpływ na parametry powietrza doładowującego silnik, na warunki wymiany ładunku w cylindrach oraz proces spalania.

Istotną trudnością podczas realizacji obliczeń parametrów gazodynamicznych jest precyzyjne i w pełni zautomatyzowane określenie przesunięcia fazowego impulsu ciśnienia spalin, przemieszczającego się pomiędzy przekrojami kontrolnymi badanego kanału przepływowego. Na tym etapie realizacji badań zaproponowano wykorzystanie odległości pomiędzy stycznymi do porównywanych przebiegów zmienności ciśnienia spalin, w punktach odpowiadających tej samej, ustalonej (bazowej) jego wartości.

Aktualnie prowadzone badania są skupione wokół doskonalenia techniki pomiarowej oraz metod „obróbki” matematycznej i diagnostycznego wykorzystania uzyskanych wyników pomiarów. Prognozuje się, że zmiana czasu przemieszczania się impulsów fal ciśnienia w kanale spalin wylotowych przed dyszą turbiny może stanowić adekwatny parametr diagnostyczny w ocenie stanu technicznego układów cylindrowych oraz układu turbodoładowania silnika.

Wnioski

W artykule zaproponowano przyjęcie miary diagnostycznej w ocenie stanu technicznego układów cylindrowych i turbodoładowania silnika: prędkości rozchodzenia się fali ciśnienia spalin w kanale zasilającym turbosprężarkę.

Uzyskane wyniki zachęcają do prowadzenia dalszych badań eksperymentalnych w zakresie wpływu regulacji układu zasilania i rozrządu silnika oraz wpływu zmian w strukturze konstrukcyjnej dyszy turbiny (symulowane będą jej zanieczyszczenia) na widmo amplitudowe pulsacji ciśnienia w kanale zasilającym turbosprężarkę, by na tej podstawie opracować alternatywną metodę badań diagnostycznych silników okrętowych (i nie tylko), w przypadku braku możliwości bezpośredniego pomiaru ciśnień wewnątrzcyldrowych (braku zaworów indykatorowych) [1].

Literatura

1. Korczewski Z., *Metoda diagnozowania silników okrętowych z turbodoładowaniem na podstawie wyników badania procesów gazodynamicznych w układzie spalin wylotowych*, Diagnostyka, Vol. 28/2003, s. 87 – 95.
2. Kordziński C., Środulski T., *Silniki spalinowe z turbodoładowaniem*, WNT, Warszawa 1970.
3. Mysłowski J., *Doładowanie bezsprężarkowe silników z zapłonem samoczynnym*, WNT, Warszawa 1995.
4. Mysłowski J., *Doładowanie dynamiczne silników spalinowych – częstotliwość drgań własnych w układzie dolotowym*, Auto-Technika Motoryzacyjna, Kwartalnik Naukowo-Techniczny nr 2/1994.
5. Sobieszczański M., *Modelowanie procesów zasilania w silnikach spalinowych*, WKiŁ, Warszawa 2000.
6. Wisłocki K., *Systemy doładowania szybkoobrotowych silników spalinowych*, WKiŁ, Warszawa 1991.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzenci

dr hab. inż. Oleh Klyus, prof. AM
dr hab. inż. Piotr Bielawski, prof. AM

Adres Autora

dr hab. inż., kmdr Zbigniew Korczewski, prof. AMW
Akademia Marynarki Wojennej, Instytut Technicznej Eksploatacji Okrętów
ul. Śmidowicza 69, 81-103 Gdynia