

Leszek Chybowski

**Eksploracje w układach powietrza rozruchowego
silników okrętowych – przyczyny,
zapobieganie i minimalizacja skutków**

*Pracę niniejszą dedykuję
Mojej Żonie Dorocie
– Przyjaciółce i Szczerej Doradczynie*

W pracy przedstawiono rezultaty realizacji tematu badań statutowych 1/S/KPBMIM/21 pn. „Poprawa efektywności funkcjonowania systemów technicznych poprzez modyfikację ich struktury i wykorzystanie nowoczesnych materiałów”, prowadzonego w Katedrze Podstaw Budowy Maszyn i Materiałoznawstwa na Wydziale Mechanicznym Akademii Morskiej w Szczecinie.

Leszek Chybowski

**Eksploracje w układach powietrza rozruchowego
silników okrętowych – przyczyny,
zapobieganie i minimalizacja skutków**

**Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie
Szczecin 2022**

Leszek Chybowski

***Eksplzje w układach powietrza rozruchowego silników okrętowych
– przyczyny, zapobieganie i minimalizacja skutków***

Autor jest pracownikiem Wydziału Mechanicznego
Akademii Morskiej w Szczecinie



Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz

prof. dr hab. inż. Andrzej Teodorczyk

Redaktor naukowy:

dr hab. inż. Artur Bejger, prof. AMS

© Copyright by Leszek Chybowski & Akademia Morska w Szczecinie 2022

Na okładce wykorzystano rysunek pojedynczego rurociągu zasilającego z bezpiecznikiem membranowym stanowiącego element układu rozruchowego silników MAN B&W S60MC

Opracowanie wydawnicze: Paulina Mańkowska

Projekt okładki: Tomasz Kwiatkowski

Skład komputerowy: Irena Hajdasz

ISBN 978-83-64434-39-6

Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie
70-506 Szczecin, ul. T. Starzyńskiego 8, www.wydawnictwo.am.szczecin.pl
Wydanie I. Nakład 200 egz. Format B5. Objętość 7.25 ark. wyd.
Druk: Soft Vision Mariusz Rajski, Ustowo 39, 70-001 Szczecin

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń	7
Od Autora	9
1. Wprowadzenie	11
2. Instalacje powietrza rozruchowego silników okrętowych	17
2.1. Podstawowe informacje o instalacjach rozruchowych	17
2.2. Sterowanie zaworami rozruchowymi powietrza	19
2.3. Podstawowy układ rozruchowy	20
3. Przyczyny i skutki eksplozji w układach powietrza rozruchowego	29
3.1. Pożar i wybuch	29
3.2. Czynniki inicjujące eksplozję	31
3.3. Parametry termodynamiczne gazu w kolektorze podczas rozruchu ...	33
3.4. Skutki eksplozji w układach rozruchowych	36
4. Minimalizacja zagrożenia eksplozją w układach rozruchowych	41
4.1. Obsługa instalacji powietrza rozruchowego	41
4.2. Regeneracja i stanowiskowa kontrola zaworów rozruchowych	42
4.3. Kontrola szczelności wewnętrznej zaworów rozruchowych	45
4.4. Kontrola szczelności osadzenia zaworów rozruchowych w głowicach	46
4.5. Kontrola szczelności komór spalania podczas pracy silnika	48
5. Minimalizacja skutków eksplozji w układach rozruchowych	51
5.1. Wymagania ogólne	51
5.2. Przerywacze płomienia	54
5.3. Bezpieczniki membranowe	56
5.4. Zawory bezpieczeństwa	60
5.5. Odwodnienia kolektora powietrza rozruchowego	64
5.6. Blokada wtrysku paliwa w trakcie rozruchu	66
6. Systemy do diagnozowania szczelności zaworów rozruchowych	71
6.1. Koncepcja wykorzystania temperatur w kručach przyzaworowych .	71
6.2. Prototypowy system diagnostyki zaworów rozruchowych	77

7. Kształcenie w tematyce eksplozji w układach powietrza rozruchowego ...	83
7.1. Ogólne wytyczne w zakresie wyszkolenia mechaników okrętowych	83
7.2. Symulator pneumatycznego układu rozruchowego	86
8. Wnioski końcowe	95
Piśmiennictwo cytowane	99
Wykaz rysunków	107
Wykaz tabel	111
Streszczenie	113
Abstract	115

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I OZNACZEŃ

AHD	– kierunek obrotów silnika „naprzód” (ang. <i>ahead</i>)
AST	– kierunek obrotów silnika „wstecz” (ang. <i>astern</i>)
ClassNK	– japońskie towarzystwo klasyfikacyjne (jap. <i>Nippon Kaiji Kyōkai</i>)
CMK	– centrala manewrowo-kontrolna maszynowni
DMP	– dolne martwe położenie tłoka (dolny martwy punkt, zwrot wewnętrzny)
GMP	– górne martwe położenie tłoka (górny martwy punkt, zwrot zewnętrzny)
DNV	– norweskie towarzystwo klasyfikacyjne (nor. <i>Det Norske Veritas</i>) działające pod tą nazwą do września 2013 roku (patrz: DNV GL), a od marca 2021 roku nazwę tę przyjęło towarzystwo DNV GL
DNV GL	– towarzystwo klasyfikacyjne powstałe we wrześniu 2013 roku, w wyniku połączenia towarzystw DNV i GL. W marcu 2021 roku zmieniło nazwę na DNV
GL	– niemieckie towarzystwo klasyfikacyjne działające jako niezależny podmiot do września 2013 roku (patrz: DNV GL) (niem. <i>Germanischer Lloyd</i>)
IACS	– Międzynarodowe Stowarzyszenie Towarzystw Klasyfikacyjnych (ang. <i>International Association of Classification Societies</i>)
IMAS	– zintegrowany system alarmów i nadzoru siłowni okrętowej (ang. <i>Integrated Monitoring Alarm System</i>)
l	– położenie tłoka w cylindrze
k	– licznik iteracji w algorytmie diagnostycznym
LED	– dioda elektroluminescencyjna (ang. <i>light-emitting diode</i>)
LR	– brytyjskie towarzystwo klasyfikacyjne – Rejestr Lloyd’a (ang. <i>Lloyd’s Register of Shipping</i>)
n	– liczba cylindrów silnika
°OWK	– stopień kątowy obrotu wału korbowego
p	– ciśnienie (oznaczenie ogólne)
p_d	– ciśnienie powietrza w zasobniku powietrza zasilającego, ciśnienie doładowania
p_k	– maksymalne ciśnienie sprężania
$p_{\max}$	– maksymalne ciśnienie spalania
p_o	– ciśnienie otoczenia

PRS	– Polski Rejestr Statków (ang. <i>Polish Register of Shipping</i>)
RMMV	– oznaczenie statków dalekomorskich przewożących pocztę na podstawie kontraktu z Brytyjską Poczta Królewską (ang. <i>Royal Mail Motor Vessel</i>)
R	– rezystancja
S	– skok tłoka
$S_1, S_2 \dots S_n$	– oznaczenia włączników
SCADA	– system informatyczny nadzorujący przebieg procesu technologicznego (ang. <i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>)
SHD	– zatrzymanie silnika (ang. <i>shut down</i>)
SLD	– zmniejszenie prędkości/obciążenia silnika (ang. <i>slow down</i>)
SOLAS	– międzynarodowa konwencja o bezpieczeństwie życia na morzu (ang. <i>International Convention for the Safety of Life at Sea</i>)
STCW	– Międzynarodowa Konwencja o wymaganiach w zakresie wykształcenia marynarzy, wydawania im świadectw oraz pełnienia wacht (ang. <i>Standards of Training, Certification and Watch-keeping</i>)
$t_1, t_2, t_3, \dots t_n$	– temperatury zarejestrowane przez czujniki nr 1, 2, 3, ... n
t_{kr}	– krytyczna różnica temperatury
t_{sr}	– średnia arytmetyczna wartości temperatury z zadanego zbioru
USB	– uniwersalna magistrala szeregową (ang. <i>Universal Serial Bus</i>)
V	– objętość cylindra silnika
VLCC	– bardzo duży zbiornikowiec do przewozu ropy naftowej (ang. <i>Very Large Crude Carrier</i>)

OD AUTORA

Książka jest poradnikiem omawiającym wybrane rodzaje zagrożeń występujących podczas eksploatacji silników spalinowych. Skierowana jest głównie do mechaników okrętowych oraz studentów wydziałów mechanicznych szkół morskich. Publikacja stanowi kontynuację mojej poprzedniej pracy zatytułowanej „Eksploduje w skrzyniach korbowych silników okrętowych – przyczyny, zapobieganie i minimalizacja skutków”, w której zakończeniu wskazałem na konieczność publikacji w języku polskim poradnika, o którym mowa powyżej. W opracowaniu, przekazywanym na ręce czytelników omawiam kolejne źródło zagrożeń eksplozyjnych i pożarowych, jakim są kolektory powietrza rozruchowego. Według mojej wiedzy jest to jedno z nielicznych opracowań poruszających ten temat, a zarazem pierwsza pozycja książkowa omawiająca to zagadnienie szczegółowo.

Pracę podzieliłem na osiem rozdziałów, w których podjąłem się próby syntezy wiedzy i przedstawienia dotąd rozproszonych w nielicznych publikacjach naukowych oraz instrukcjach i tzw. listach serwisowych producentów silników informacji o przyczynach i zapobieganiu eksplozjom w kolektorach powietrza rozruchowego oraz minimalizacji skutków takich eksplozji. Mam nadzieję, że książka w pewnym stopniu zapełnia tę lukę.

Publikację rozpoczyna wprowadzenie do tematyki eksplozji w układach rozruchowych silników okrętowych. Następnie omawiam budowę i funkcjonowanie instalacji powietrza rozruchowego. Przybliżam podstawowe pojęcia związane z paleniem się ciał oraz zjawiskami pożaru i eksplozji. Zestawiam i podsumowuję wytyczne eksploatacyjne mające na celu zminimalizowanie zagrożenia eksplozją w kolektorach powietrza rozruchowego. Opisuję środki techniczne wymagane przez towarzystwa klasyfikacyjne, które mają na celu minimalizację ryzyka eksplozji i zmniejszenie jej ewentualnych konsekwencji. Przedstawiam możliwości diagnozowania stanu zaworów rozruchowych podczas pracy silnika. Przybliżam też propozycje dotyczące kształcenia mechaników okrętowych w zakresie prewencji eksplozji w kolektorach powietrza rozruchowego.

W pracy wykorzystałem wiele źródeł, które umożliwiły mi przedstawienie tematyki eksplozji w kolektorach powietrza rozruchowego w możliwie holistyczny sposób. Szczególne miejsce zajmują tu materiały firm MAN i Wärtsilä, treści zawarte na stronie internetowej Marine Diesels oraz książki i artykuły autorstwa Ildefonsa Piotrowskiego, Kazimierza Witkowskiego, Jana Kazimierza Włodarskiego,

Antoniego Podsiadło, Stefana Kluja, Yuzhonga Songa i Seniichiego Sasakiego, a także komputerowy symulator systemu sterowania silników MAN Diesel K/L/S 50-70 MC autorstwa Rajana Bhandariego i Kevana Lokego.

Chciałbym podkreślić, że informacje przedstawione w monografii należy traktować jako zestaw wskazówek i często zaleceń ogólnych, a nie jako absolutnie obowiązujące zasady postępowania. Wynika to ze specyfiki i różnorodności silników okrętowych dostępnych na rynku oraz wciąż zmieniających się wytycznych prawnych i technicznych. W związku z tym szczegółowe zasady użytkowania i obsługiowania każdorazowo mogą się różnić od przedstawionych w pracy i muszą zawsze być zgodne z aktualnymi przepisami i informacjami dostarczonymi przez producenta silnika.

Składam podziękowanie Robertowi Grzebieniakowi i Damianowi Kaziencie – moim współpracownikom i współtwórcom przedstawionych w rozdziale szóstym urządzeń diagnozujących stan zaworów rozruchowych podczas pracy silnika okrętowego. Chciałbym podziękować również Włodzimierzowi Markiewiczowi za udostępnienie materiału źródłowego, w tym zdjęciowego oraz instrukcji techniczno-ruchowych nowoczesnych, dwupaliwowych silników okrętowych. Bardzo dziękuję recenzentom monografii Profesorowi Jerzemu Merkiszowi i Profesorowi Andrzejowi Teodorczykowi, których wartościowe uwagi i sugestie przyczyniły się do poprawy jakości merytorycznej i technicznej książki. Dziękuję też za uwagi techniczne, którymi podzielili się ze mną Profesor Katarzyna Gawdzińska oraz Profesor AMS Artur Bejger. Jednocześnie dziękuję p. Redaktor Paulinie Mańkowskiej za opracowanie wydawnicze, a także p. Irenie Hajdasz i p. Tomaszowi Kwiatkowskiemu za pomoc w opracowaniu strony graficznej publikacji.

Pracę niniejszą dedykuję moje Żonie – Dorocie Chybowskiej w podziękowaniu za pomoc, wyrozumiałość i cierpliwość.

Życzę Państwu przyjemnej lektury i proszę o kierowanie do mnie wszelkich uwag i propozycji, które mogłyby przyczynić się do poprawy jakości tej i kolejnych publikacji.

Leszek Chybowski

PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

1. Allianz Global Corporate & Specialty *Safety and shipping review 2019*; Munich, 2019.
2. UNCTAD *Review of Maritime Transport*; United Nations: Genewa, 2020.
3. Piotrowski, I.; Witkowski, K. *Okrętowe silniki spalinowe*; 3. Ed.; Trademar: Gdynia, 2013; ISBN 978-83-62227-48-8.
4. Chybowski, L.; Kazienko, D. The Development of an Explosion Protection System in the Starting Air Manifold of a High Power Engine. *Syst. Saf. Hum. – Tech. Facil. – Environ.* **2019**, *1*, 26–34, doi:10.2478/czoto-2019-0004.
5. Marine Diesels Horror Stories. Air Start Explosion On The Capetown Castle Available online: [http://www.marinediesels.info/Horror Stories/cape_town_castle.htm](http://www.marinediesels.info/Horror%20Stories/cape_town_castle.htm).
6. Smith, E. *Short History of Naval and Marine Engineering*; Cambridge University Press: Cambridge, 1938; ISBN 9781107672932.
7. IACS *Requirements concerning machinery installations*; International Association of Classification Societies: London, UK, 2016.
8. Song, Y.; Shiihara, H.; Sasaki, S. A Study on Detonation in Starting Air Manifold of Diesel Engine. In *Proceedings of the Proceedings of ISME*; Tokyo, 2000; pp. 759–764.
9. Allianz Global Corporate & Specialty AG *Safety and Shipping 1912-2012. From Titanic to Costa Concordia*; Londyn, Monachium, 2012.
10. Gawdzińska, K.; Kwiecińska, B.; Przetakiewicz, W.; Pelczar, M. Przyczyny wypadków i pożarów na statkach morskich. *Zesz. Nauk. Akad. Morskiej w Gdyni* **2015**, *91*, 21–29.
11. Niland, D. Royal Caribbean's Symphony of the Seas Calls on St Maarten Available online: [https://www.caribjournal.com/2018/11/28/royal-caribbeans-symphony-of-the-seas-calls-on-st-maarten/#:~:text=Symphony of the Seas%2C the, on-board and 2%2C200 crew](https://www.caribjournal.com/2018/11/28/royal-caribbeans-symphony-of-the-seas-calls-on-st-maarten/#:~:text=Symphony%20of%20the,on-board%20and%20200%20crew). (accessed on Jul 24, 2020).
12. IMCA *Safety Flash 05/05*; International Marine Contractors Association: Londyn, 2005.
13. Myanmar Marine Engineers Starting Air Line Explosion Available online: <http://myanmarmarineengineers.blogspot.com/2015/06/starting-air-line-explosion.html>.
14. Royal Belgian Institute of Marine Engineers *Air start manifold explosions*; 2009.
15. Officer of the Watch Incident Information on burst of starting air pipe causing subsequent grounding Available online: <https://officerofthewatch.com/2013/09/13/incident-information-on-burst-of-starting-air-pipe-causing-subsequent-grounding/>.

16. MAN *Starting Air System. Main engine. Service Letter SL2018-668/KNB*; MAN Energy Solutions: Kopenhaga, 2018.
17. Świerżewski, M. *Uwaga wybuch*; Instytut Wydawniczy CRZZ: Warszawa, 1972.
18. Rychter, T.; Teodorczyk, A. *Obliczenia wybuchów gazowych w przestrzeniach zamkniętych i wentylowanych*; Wydawnictwo Naukowe PWN: Warszawa, 2002.
19. Grzywaczewski, Z.; Plewa, H.; Popielawski, T.; Załęcki, S. *Walka z pożarami na statkach*; Wydawnictwo Morskie: Gdańsk, 1967.
20. Chybowski, L.; Gawdzińska, K. Analysis of the Root Causes of Damage to the Edges of Tank Manholes on the Main Deck of Handy-Size Bulk Carriers. *Materials (Basel)*. **2021**, *14*, 632, doi:10.3390/ma14030632.
21. Gawdzińska, K.; Chybowski, L.; Przetakiewicz, W. Study of Thermal Properties of Cast Metal-Ceramic Composite Foams. *Arch. Foundry Eng.* **2017**, *17*, 47–50.
22. Gawdzińska, K.; Chybowski, L.; Przetakiewicz, W. Proper matrix-reinforcement bonding in cast metal matrix composites as a factor of their good quality. *Arch. Civ. Mech. Eng.* **2016**, *16*, 553–563, doi:10.1016/j.acme.2015.11.004.
23. Wu, Y.-C.; Laiwang, B.; Shu, C.-M. Investigation of an Explosion at a Styrene Plant with Alkylation Reactor Feed Furnace. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 503, doi:10.3390/app9030503.
24. Piaseczny, L. *Technologia napraw okrętowych silników spalinowych*; Wydawnictwo Morskie: Gdańsk, 1992.
25. Chybowski, L. *Diagnozowanie silników okrętowych z zapłonem samoczynnym w oparciu o analizę procesów wtrysku i spalania paliwa*; Maritime University of Szczecin Press: Szczecin, 2019.
26. Piotrowski, I.; Witkowski, K. *Eksplatacja okrętowych silników spalinowych*; Akademia Morska w Gdyni: Gdynia, 2005.
27. Żółtowski, B. *Podstawy diagnostyki maszyn*; Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej: Bydgoszcz, 1996.
28. Żółtowski, B.; Ćwik, Z. *Leksykon diagnostyki technicznej*; Wydawnictwo Uczelniane ATR: Bydgoszcz, 1996.
29. Waligórski, M.; Batura, K.; Kucal, K.; Merksiz, J. Research on airplanes engines dynamic processes with modern acoustic methods for fast and accurate diagnostics and safety improvement. *Measurement* **2020**, *154*, 107460, doi:10.1016/j.measurement.2019.107460.
30. Heywood, J.B. *Internal combustion engine fundamentals*; McGraw-Hill, Inc.: New York, 1988; ISBN 0-07-028637-X.
31. MAN Diesel & Turbo *MAN B&W 5GME-C9.5-GI-BP Instruction Manual*; Doosan, MAN: Seul, 2015.
32. Agarwal, S. 8 Things Marine Engineers Must Know About Starting Air System on Ship; Available online: <https://www.marineinsight.com/tech/8-things-to-consider-while-operating-starting-air-system-of-marine-engines/>.
33. Blackhatmarine Air Start System Available online: <https://www.blackhatmarine.com/air-start-system>.
34. Chybowski, L. *Eksploracje w skrzyniach korbowych silników okrętowych – przyczyny, zapobieganie i minimalizacja skutków*; Akademia Morska w Szczecinie: Szczecin, 2022.

35. Kokot, S. Czworokąt spalania Available online: <http://www.cfbt.pl/artykuly-cfbt/10-czworokat-spalania> (accessed on Mar 21, 2021).
36. Żmudzki, S. *Badania głównych problemów spalania w silnikach wysokoprężnych z wtryskiem pośrednim*; Politechnika Szczecińska: Szczecin, 1976.
37. Chybowski, L.; Gawdzińska, K.; Ślesicki, O.; Patejuk, K.; Nowosad, G. An engine room simulator as an educational tool for marine engineers relating to explosion and fire prevention of marine diesel engines. *Sci. Journals Marit. Univ. Szczecin, Zesz. Nauk. Akad. Morskiej w Szczecinie* **2015**, *43*, 15–21, doi:10.17402/034.
38. Krystosik-Gromadzińska, A. Engine room fire safety. *Sci. Journals Marit. Univ. Szczecin, Zesz. Nauk. Akad. Morskiej w Szczecinie* **2016**, *47*, 29–35, doi:10.17402/145.
39. Krystosik-Gromadzińska, A. *Wybrane problemy kształtowania bezpieczeństwa pożarowego silowni okrętowej*; Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie: Szczecin, 2020.
40. Ubowska, A.; Szczepanek, M. Engine rooms fire safety – fire-extinguishing system requirements. *Sci. Journals Marit. Univ. Szczecin, Zesz. Nauk. Akad. Morskiej w Szczecinie* **2016**, *48*, 51–57, doi:10.17402/175.
41. Zydak, P.; Klemens, R. Modelling of dust lifting process behind propagating shock wave. *J. Loss Prev. Process Ind.* **2007**, *20*, 417–426, doi:10.1016/j.jlp.2007.04.020.
42. Klemens, R.; Szatan, B.; Gieras, M.; Wolański, P.; Maranda, A.; Nowaczewski, J.; Paszula, J. Suppression of dust explosions by means of different explosive charges. *J. Loss Prev. Process Ind.* **2000**, *13*, 265–275, doi:10.1016/S0950-4230(99)00050-9.
43. Klemens, R.; Gieras, M.; Kaluzny, M. Dynamics of dust explosions suppression by means of extinguishing powder in various industrial conditions. *J. Loss Prev. Process Ind.* **2007**, *20*, 664–674, doi:10.1016/j.jlp.2007.04.021.
44. Cieślak, A.; Jacek, D.; Górski, M.; Dziubiński, M.; Kosmowski, K.; Markowski, A.; Pawlak, H.; Szopa, T.; Żyła, R. *Zapobieganie stratom w przemyśle*; Łódź, 2000; ISBN 83-87198-99-4.
45. Karliński, J.; Ptak, M.; Chybowski, L. A Numerical Analysis of the Working Machine Tyre Inflation Process to Ensure Operator Safety. *Energies* **2019**, *12*, 2971, doi:10.3390/en12152971.
46. Karliński, J.; Ptak, M.; Chybowski, L. Simulation-Based Methodology for Determining the Dynamic Strength of Tire Inflation Restraining Devices. *Energies* **2020**, *13*, 991, doi:10.3390/en13040991.
47. Urbański, T.; Vasudeva, S.K. Explosions and Explosives: Fundamental Aspects. *J. Sci. Ind. Res. (India)* **1981**, *40*, 512–519.
48. Kopaliński, W. *Słownik wyrazów obcych i zwrotów obcojęzycznych*; PWN: Warszawa, 1990.
49. Cybulski, W. *Wybuchy pyłu węglowego i ich zwalczanie*; Wydawnictwo Śląsk: Katowice, 1973.
50. Kowalewicz, A. *Podstawy procesów spalania*; Wydawnictwa Naukowo-Techniczne: Warszawa, 2000.
51. Kordylewski, W. *Spalanie i paliwa*; Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej: Wrocław, 2008.
52. WNT *Leksykon naukowo-techniczny z suplementem. T. P–Ż*; Wydawnictwa Naukowo-Techniczne: Warszawa, 1989; ISBN 83-204-0969-1.

53. WNT *Encyklopedia techniki – Chemia*; IV; Wydawnictwa Naukowo-Techniczne: Warszawa, 1993; ISBN 83-204-1312-5.
54. Chybowski, L.; Grzebieniak, R. Zagrożenie eksplozyjne w układach rozruchowych okrętowych silników wysokoprężnych. *Ekon. i Organ. Przedsiębiorstwa* **2009**, 5, CD-ROM.
55. Bejger, A.; Chybowski, L.; Gawdzińska, K. Utilising elastic waves of acoustic emission to assess the condition of spray nozzles in a marine diesel engine. *J. Mar. Eng. Technol.* **2018**, doi:10.1080/20464177.2018.1492361.
56. Chybowski, L.; Gawdzińska, K.; Przetakiewicz, W. AHP based multi-criteria function analysis as a TRIZ tool for complex technical systems. In *Proceedings of the 13th MATRIZ TRIZfest 2017 International Conference*; Souchkov, V., Ed.; International TRIZ Association – MATRIZ: Knoxville, TN, USA, 2017; pp. 31–45.
57. Chybowski, L. Use of TRIZ Su-Field models in the process of improving the injector of an internal combustion engine. *MAPE - Multidiscip. Asp. Prod. Eng.* **2018**, 1, 257–268, doi:10.2478/mape-2018-0033.
58. Włodarski, J. *Stany eksploatacyjne okrętowych silników spalinowych*; Wydawnictwo Uczelniane WSM w Gdyni: Gdynia, 1998.
59. Włodarski, J. *Tłokowe silniki spalinowe - procesy trybologiczne*; WKiŁ: Warszawa, 1982.
60. Song, Y.; Sasaki, S. Experimental Research on Explosion in the Diesel Engine Starting Air Manifold. *NK Tech Bull.* **2003**, 21, 49–53.
61. Valčić, M. *The learning resource for marine engineers* www.marinediesels.co.uk; Warshash Maritime Academy: Warsash, Rjeka.
62. Ratajczak, M.; Ptak, M.; Chybowski, L.; Gawdzińska, K.; Będziński, R. Material and Structural Modeling Aspects of Brain Tissue Deformation under Dynamic Loads. *Materials (Basel)* **2019**, 12, 271, doi:10.3390/ma12020271.
63. Kaczyński, P.; Ptak, M.; Fernandes, F.; Chybowski, L.; Wilhelm, J.; Alves de Sousa, R. Development and Testing of Advanced Cork Composite Sandwiches for Energy-Absorbing Structures. *Materials (Basel)* **2019**, 12, 697, doi:10.3390/ma12050697.
64. Chybowski, L.; Przetakiewicz, W. Estimation of the Probability of Head Injury at a Given Abbreviated Injury Scale Level by Means of a Fuction of Head Injury Criterion. *Syst. Saf. Hum. – Tech. Facil. – Environ.* **2020**, 2, 91–99, doi:10.2478/czoto-2020-0012.
65. Chybowski, L.; Matuszak, Z. Marine Auxuliary Diesel Engine Turbocharger Damage (Explosion) Cause Analysis. *J. Polish CIMAC* **2007**, 2, 33–40.
66. Mohit How to Prevent Starting Air Line Explosion on Ships? Available online: <https://www.marineinsight.com/marine-safety/how-to-prevent-starting-air-line-explosion-on-ships/>.
67. Firoz, J. Starting Air Line Explosion on Ships – Marine Engineering Available online: <https://marineengineeringonline.com/tag/how-to-test-starting-air-valve-leakage-of-main-engine/>.
68. Goyal, D. ME Starting Air Valve Overhauling Available online: <https://www.youtube.com/watch?v=1YWvvnNw0QE>.
69. Bliss Energy Air Start Valve Overhaul Available online: <https://www.youtube.com/watch?v=PuhQF7mF958>.

70. Rychter, T.; Teodorczyk, A. *Modelowanie matematyczne roboczego cyklu silnika tłokowego*; Państwowe Wydawnictwo Naukowe: Warszawa, 1990.
71. Rychter, T.; Teodorczyk, A. *Teoria silników tłokowych*; I.; Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ: Warszawa, 2018.
72. Wimmer, A.; Glaser, J. *Indykowanie silnika*; AVL List GmbH. Instytut Zastosowań Techniki Sp. z o.o.: Warszawa, 2004.
73. Wajand, J. *Pomiary szybkozmiennych ciśnień w maszynach tłokowych*; WNT: Warszawa, 1974.
74. Kluj, S. *Diagnostyka urządzeń okrętowych*; 2000.
75. Włodarski, J.; Podsiadło, A.; Kluj, S. *Uszkodzenia systemu tłok-cylinder (TC) okrętowych silników spalinowych*; Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni: Gdynia, 2011.
76. Korczewski, Z. *Diagnostyka eksploatacyjna okrętowych silników spalinowych – tłokowych i turbinowych*; Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej: Gdańsk, 2017.
77. Korczewski, Z. Exhaust gas temperature measurements in diagnostics of turbocharged marine internal combustion engines. Part I. Standard measurements. *Polish Marit. Res.* **2015**, *1*, 47–54, doi:10.1515/pomr-2015-0007.
78. Merkisz, J.; Waligórski, M. Strategy of the Combustion Process Diagnosis in Direct Injection Engines. *Procedia Eng.* **2014**, *96*, 294–301, doi:10.1016/j.proeng.2014.12.141.
79. ERD 5 Brilliant starting air line safeties to avoid an Explosion Available online: <https://www.erdepartment.com/2020/07/starting-air-line-explosion-and-safety.html>.
80. Szcześniak, J. *Zdalne sterowanie silnikiem głównym na statkach ze śrubą stałą. Część I – opisowa*; Fundacja Rozwoju Wyższej Szkoły Morskiej w Szczecinie: Szczecin, 2002.
81. Szcześniak, J. *Zdalne sterowanie silnikiem głównym ze śrubą stałą. Część II – schematy*; Fundacja Rozwoju Wyższej Szkoły Morskiej w Szczecinie: Szczecin, 2002.
82. Szcześniak, J.; Stępnia, A. *Sterowanie i eksploatacja układu napędowego statku ze śrubą nastwaną*; Fundacja Rozwoju Wyższej Szkoły Morskiej w Szczecinie: Szczecin, 2002.
83. IMO SOLAS – Consolidated Edition 2020; International Maritime Organization: Londyn, 2020.
84. PRS *Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich. Część VII. Silniki, mechanizmy, kotły i zbiorniki ciśnieniowe*; Polski Rejestr Statków: Gdańsk, 2021.
85. Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/68/UE z dnia 15 maja 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do dostępniania na rynku urządzeń ciśnieniowych; Parlament Europejski, 2014.
86. Marine Diesels Operational Information Air Start Explosions Available online: http://www.marinediesels.info/2_stroke_engine_parts/Other_info/air_start_explosions.htm.
87. Elmac Technologies How does an In-Line Detonation Flame Arrester with HED-S™ technology work? Available online: https://www.youtube.com/watch?v=q8_105H7Gms&t=69s.
88. Nwaoha, C. Appendix IV: Rupture Disk Selection. In *Process Plant Equipment*; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2012; pp. 665–668.

89. Hedlund, F.H.; Selig, R.S.; Kragh, E.K. Large Steel Tank Fails and Rockets to Height of 30 meters – Rupture Disc Installed Incorrectly. *Saf. Health Work* **2016**, *7*, 130–137, doi:10.1016/j.shaw.2015.11.004.
90. Hyundai B&W *Instructions Hyundai-B&W Engines – Operation, Maintenance. Code Book*; MAN B&W, Ed.; Ulsan, 1998.
91. Hyundai *Operating Instructions Hyundai-Sulzer RT-flex 96C-B*; Hyundai Heavy Industries: Ulsan, 2006.
92. Wärtsilä *34DF Engine O&MM*; Wärtsilä Corporation: Helsinki, 2020.
93. Bahandari, R.; Loke, K. Starting Air System MAN Diesel K/L/S 50-70 MC 2005.
94. Chybowski, L.; Grzebieniak, R. Metoda oceny stanu technicznego zaworów rozruchowych wysokoprężnego silnika okrętowego. *Ekon. i Organ. Przedsiębiorstwa* **2009**, *5*, CD-ROM.
95. Chybowski, L.; Grzebieniak, R. Sposób i układ diagnozowania stanu zaworów rozruchowych silnika wysokoprężnego, zwłaszcza okrętowego. Patent PL 217302 2009.
96. Chybowski, L.; Kazienko, D. Uniwersalny oporowy układ wspomagający kalibrację czujników rezystancyjnych w systemach nadzoru maszyn energetycznych, zwłaszcza silników spalinowych. Zgłoszenie patentowe P.429574 2019.
97. Chybowski, L.; Kazienko, D. Elektroniczny detektor odchyłek wartości sygnałów z czujników monitorujących stan obiektu diagnozowanego i sposób detekcji. Zgłoszenie patentowe P.427648 2018.
98. Chybowski, L.; Kazienko, D. Electronic device for detecting deviations of the signal from sensors monitoring the state of the diagnosed object and a way of this detection. Zgłoszenie europejskie EP 19460052.4 2019.
99. Chybowski, L.; Kazienko, D. Obudowa detektora odchyłek wartości sygnałów diagnostycznych. Prawo z rejestracji wzoru przemysłowego nr 25673 2018.
100. Łosiewicz, Z. Bezpieczeństwo pracy na morzu - weryfikacja kompetencji załóg w realnych warunkach zagrożenia pożarowego statku. *Autobusy* **2016**, *6*, 260–263.
101. Wiewióra, A.; Bykowski, D. Symulator siłowni okrętowej jako narzędzie do szkolenia i egzaminowania załóg statków. *Zesz. Nauk. Akad. Morskiej w Szczecinie* **2008**, *15*, 307–313.
102. Listewnik, J. Symulator okrętowej siłowni spalinowej do celów kształcenia wysokokwalifikowanych kadr oficerskich mechaników okrętowych. In *Proceedings of the II symposium siłowni okrętowych*; Dział Wydawnictw WSM: Szczecin, 1979; pp. 1–30.
103. Chybowski, L. Regulatory prędkości obrotowej. In *Tłokowe silniki spalinowe i ich systemy sterowania. Instrukcje do ćwiczeń laboratoryjnych z przedmiotu*; 2012; pp. 19–23.
104. Chmura, S. *Charakterystyka metod zapobiegania i usuwania pożarów w kolektorach wydechowych wolnoobrotowych silników głównych*; Praca dyplomowa inżynierska. Akademia Morska, Wydział Mechaniczny, IESO: Szczecin, 2012.
105. Kierzek, J. *Zabezpieczenia przeciwybuchowe układów rozruchowych okrętowych silników spalinowych*; Praca dyplomowa inżynierska. Akademia Morska, Wydział Mechaniczny, IESO: Szczecin, 2010.
106. Nowosad, G. *Zabezpieczenia przeciweksplozyjne skrzyń korbowych nowoczesnych okrętowych silników spalinowych*; Praca dyplomowa inżynierska, Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Mechaniczny, IESO: Szczecin, 2009.

107. Strojecki, S. *Charakterystyka metod zapobiegania i gaszenia pożarów w zasobniku powietrza doładowującego wolnoobrotowych silników głównych*; Praca dyplomowa inżynierska, Akademia Morska, Wydział Mechaniczny, IESO: Szczecin, 2011.
108. Ślesicki, O. *Analiza zabezpieczeń przeciwpożarowych i przeciwwybuchowych stosowanych w silnikach Sulzer serii RTA*; Praca dyplomowa inżynierska, Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Mechaniczny, IESO: Szczecin, 2009.
109. Patejuk, K. *Charakterystyka zabezpieczeń przeciweksplozyjnych skrzyń korbowych wolnoobrotowych silników głównych*; Praca dyplomowa inżynierska, Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Mechaniczny, IESO: Szczecin, 2011.
110. Kongsberg Maritime *Engine Room Simulator ERS L11 5L90MC-VLCC Operator's Manual. Part 3. Machinery & Operation*; 2005.
111. Baggerud, B. *Engine Room Simulator ERS-L11 MAN B&W 5L90MC-VLCC Version MC90-IV VARIABLE LIST*; Kongsberg Maritime AS, 2005.
112. Laskowski, R.; Chybowski, L.; Gawdzińska, K. *An engine room simulator as a tool for environmental education of marine engineers*; In: Rocha, A.; Costanzo, S.; Reis, L. (eds) *New Contributions in Information Systems and Technologies. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2015; Vol. 354, Springer, Cham, pp. 311–322, doi: 10.1007/978-3-319-16528-8_29.
113. Chybowski, L.; Strojecki, S.; Markiewicz, W. *Simulation-Based Training in Fire Prevention and Fire-Fighting of Scavenge Air Receivers Fires. Syst. Saf. Hum. – Tech. Facil. – Environ.* **2019**, 2, 100–111.
114. Górski, Z.; Hajduk, T.; Kluj, S. *Procedury obsługi siłowni okrętowej z silnikiem wolnoobrotowym. Tom I*; Akademia Morska w Gdyni: Gdynia, 2005.
115. Górski, Z.; Hajduk, T.; Kluj, S. *Procedury obsługi siłowni okrętowej z silnikiem wolnoobrotowym. Tom II*; Akademia Morska w Gdyni: Gdynia, 2006.
116. Kongsberg Maritime *Engine Room Simulator, ERS-L11 MAN B&W 5L90MC-VLCC, Version MC90-IV*; 2005.
117. Libramar Starting Air System Available online: https://www.libramar.net/news/starting_air_system/2017-10-15-979.
118. Adventure Story Main Engine Starting Air System K L S50 70MC Simulator Available online: <https://www.youtube.com/watch?v=MZikR8WM8GE>.

WYKAZ RYSUNKÓW

1.1. Elementy okrętowego silnika wodzikowego i miejsca w jego otoczeniu, w których występuje podwyższone zagrożenie pożarowe lub eksplozyjne	12
2.1. Schemat ideowy układu rozruchowego silników okrętowych	17
2.2. Uproszczony schemat przykładowej instalacji sprężonego powietrza spalinowej siłowni okrętowej	18
2.3. Wykresy rozrządu zaworu rozruchowego oraz położenia tłoka i krzywki rozruchowej silnika dwusuwowego podczas różnych stanów pracy	19
2.4. Rozwinięty wykres rozrządu czterosuwowego silnika okrętowego Sulzer Z40/48	20
2.5. Schemat podstawowego układu rozruchowego okrętowego silnika głównego ...	21
2.6. Widok zbiorników sprężonego powietrza rozruchowego	22
2.7. Widok samoczynnego zaworu manewrowego dwusuwowego, wolnoobrotowego silnika głównego MAN B&W 5GME-C9.5-GI-BP	22
2.8. Widok elementów wstępnego sterowania rozruchem czterosuwowego silnika okrętowego	23
2.9. Widok rozdzielacza powietrza rozruchowego	23
2.10. Widok kolektora powietrza startowego (poziomy zielony rurociąg) i kruców doprowadzających powietrze do zaworów rozruchowych silnika Sulzer 5BAH22	24
2.11. Zawór rozruchowy silników Sulzer typu A	24
2.12. Zawór rozruchowy silników Sulzer typu R	25
2.13. Widok zaworu rozruchowego na głowicy silnika	26
3.1. Elementy składowe niezbędne do zainicjowania procesu spalania	29
3.2. Widok zaworu rozruchowego zdemonтованego z silnika po eksplozji w kolektorze powietrza rozruchowego	32
3.3. Inicjacja eksplozji w kolektorze powietrza rozruchowego według hipotezy wysuniętej przez ClassNK	33
3.4. Schemat układu pomiarowego zastosowanego w eksperymencie przeprowadzonym przez ClassNK	34
3.5. Umieszczenie czujników temperatury i ciśnienia	35
3.6. Przebiegi temperatury i ciśnienia w kolektorze powietrza rozruchowego podczas realizacji manewru awaryjnego	35
3.7. Przebiegi temperatury i ciśnienia w kolektorze powietrza rozruchowego podczas realizacji rozruchu silnika	36
3.8. Widok rozerwanej linii głównej kolektora powietrza rozruchowego po eksplozji	37

3.9.	Widok oderwanej pokrywy zaślepiającej z kołnierzem mocującym z dziobowej strony kolektora powietrza rozruchowego po eksplozji	37
3.10.	Widok rozerwanego w wyniku eksplozji rurociągu doprowadzającego sprężone powietrze do zawodu rozruchowego	38
3.11.	Widok rozerwanego przewodu doprowadzającego powietrze do zaworu rozruchowego po eksplozji	38
3.12.	Widok naprawionego po eksplozji przewodu doprowadzającego powietrze do zaworu rozruchowego	39
3.13.	Widok zaworu rozruchowego rozerwanego w wyniku eksplozji w instalacji powietrza rozruchowego	39
3.14.	Widok uszkodzonych w wyniku eksplozji śrub mocujących głowicę zaworu rozruchowego	40
4.1.	Przykładowe ostrzeżenie producenta silnika, aby korzystać wyłącznie z oryginalnych uszczelnień	43
4.2.	Sposób sprawdzenia prawidłowości działania uszczelniającego pierścienia gumowego za pomocą linijki lub płaskownika	43
4.3.	Stanowiskowa kontrola płynności pracy zaworu rozruchowego z wykorzystaniem sprężonego powietrza	44
4.4.	Zawór rozruchowy podczas procesu docierania grzybka i gniazda	45
4.5.	Widok zaworu rozruchowego zlokalizowanego w położeniu pionowym w górnej powierzchni głowicy silnika	47
4.6.	Widok prawidłowego stanu powierzchni głowicy cylindrowej oraz drożnego drenażu tej powierzchni	48
4.7.	Zależność pomiędzy ciśnieniem maksymalnym sprężania a ciśnieniem powietrza doładowującego	49
4.8.	Zamknięty wykres sprężania	50
4.9.	Wykresy indykatorowe	50
5.1.	Schemat podstawowego pneumatycznego układu rozruchowego z urządzeniami zabezpieczającymi	51
5.2.	Widok wygaszacza płomienia na silniku Wärtsilä Sulzer serii RTA	55
5.3.	Widok wygaszacza płomienia zdemontowanego z silnika MAN B&W L58/67 ..	56
5.4.	Działanie przerywacza płomienia na przykładzie urządzenia firmy Elmac Technologies	56
5.5.	Widok bezpiecznika membranowego dla pojedynczego układu cylindrowego silnika MAN B&W 5GME-C9.5-GI-BP	57
5.6.	Widok identyfikatora płytki bezpiecznikowej w układzie rozruchowym dla pojedynczego układu cylindrowego silnika MAN B&W 5GME-C9.5-GI-BP	58
5.7.	Widok przykładowej płytki bezpiecznikowej rozerwanej w wyniku eksplozji ...	58
5.8.	Zasadnicze elementy układu rozruchowego silników MAN typów MC/MC-C i ME/ME-C	59
5.9.	Pojedynczy bezpiecznik membranowy silnika MAN B&W S60MC	59
5.10.	Pojedynczy bezpiecznik membranowy silnika MAN B&W 5GME-C9.5-GI-BP ..	60
5.11.	Kłapowy zawór bezpieczeństwa zabezpieczający kolektor powietrza rozruchowego	61
5.12.	Schemat systemu rozruchowego silnika Wärtsilä Sulzer serii RTA/RT-Flex	61

5.13. Widok zaworu bezpieczeństwa na kolektorze powietrza rozruchowego silnika Sulzer 5BAH22	62
5.14. Główny zawór rozruchowy i elementy zabezpieczające silnika Wärtsilä Vasa W6L34DF	63
5.15. Przekrój grzybkowego zaworu bezpieczeństwa zabezpieczającego urządzenia pneumatyczne	63
5.16. Widok odwodnień kolektora powietrza rozruchowego w silniku dwusuwowym, wolnoobrotowym firmy MAN	65
5.17. Widok wnętrza kolektora powietrza rozruchowego pracującego przy niedrożnym odwodnieniu – widok przewodu od strony głównego zaworu manewrowego	65
5.18. Widok nieprawidłowo zmodyfikowanej linii drenażowej uniemożliwiającej swobodny odpływ cieczy z kolektora powietrza	66
5.19. System zabezpieczeń i sterowania silników MAN K/L/S 50-70 MC podczas pracy cała naprzód	67
5.20. System zabezpieczeń i sterowania silników MAN K/L/S 50-70 MC po aktywacji awaryjnego zatrzymania silnika	68
5.21. System zabezpieczeń i sterowania silników MAN K/L/S 50-70 MC po zresetowaniu awaryjnego zatrzymania silnika	69
6.1. Strona tytułowa opisu patentowego wynalazku pn. „Sposób i układ diagnozowania stanu zaworów rozruchowych silnika wysokoprężnego, zwłaszcza okrętowego”	71
6.2. Dokument patentowy wynalazku pn. „Sposób i układ diagnozowania stanu zaworów rozruchowych silnika wysokoprężnego, zwłaszcza okrętowego”	72
6.3. Schemat blokowy układu diagnozowania stanu technicznego zaworów rozruchowych	73
6.4. Blok przetwarzania sygnałów w wersji podstawowej	74
6.5. Zmodyfikowany blok przetwarzania sygnałów nieczuły na wartości skrajne	75
6.6. Zmodyfikowany blok przetwarzania sygnałów nieczuły na wartości maksymalne	76
6.7. Schemat ideowy detektora nieszczelności zaworów rozruchowych	79
6.8. Widok prototypu detektora nieszczelności zaworów rozruchowych w czasie czuwania; wersja z wyłącznikami obrotowymi	80
6.9. Widok prototypu detektora nieszczelności zaworów rozruchowych z aktywowaną sygnalizacją alarmową na cylindrach 2 i 3; wersja z wyłącznikami przyciskowymi	80
6.10. Interfejs graficzny zewnętrznego systemu nadzorującego pracę detektora	81
7.1. Instalacja powietrza sterującego i rozruchowego silnika głównego w symulatorze siłowni okrętowej Kongsberg Neptune MC90-V	84
7.2. Widok symulatora operacyjnego siłowni okrętowej Kongsberg Neptune MC90-V – panel sterowania silnikiem głównym w CMK i pomieszczenie maszynowni widoczne za szybą	85
7.3. Widok symulatora operacyjnego siłowni okrętowej Kongsberg Neptune MC90-V – panele sterowania lokalnego silnikiem głównym oraz nadzoru nad jego instalacjami pomocniczymi w maszynowni	86

7.4. Etykieta powitalna symulatora systemów sprężonego powietrza opracowanego w Akademii Morskiej w Singapurze	87
7.5. Lista zagadnień podstawowych związanych ze sterowaniem silnikiem	87
7.6. Omówienie systemu blokad silnika	88
7.7. Uproszczony system sterowania silnikiem	90
7.8. Szczegółowy schemat systemu sterowania silnikiem	91
7.9. Okno symulacji działania systemu sterowania silnikiem dla przypadku zdalnego sterowania silnikiem z mostka nawigacyjnego	92
7.10. Prezentacja sposobu realizacji prac obsługowych na elementach systemu sterowania silnikiem	93
7.11. Przykładowe pytanie w teście wielokrotnego wyboru sprawdzającym wiedzę z zakresu budowy, działania i eksploatacji systemu sterowania silnikiem	93

WYKAZ TABEL

1.1. Zestawienie wybranych eksplozji kolektora powietrza rozruchowego silnika	14
3.1. Dane dotyczące eksperymentu przeprowadzonego przez ClassNK	34
5.1. Wybrane, uśrednione właściwości fizyczne niektórych metali określone w temperaturze w 20°C i przy wilgotności względnej 50%	55

STRESZCZENIE

Eksplozje w układach powietrza rozruchowego silników okrętowych – przyczyny, zapobieganie i minimalizacja skutków

W pracy przedstawiono syntezę zagadnień związanych z eksplozjami w układach powietrza rozruchowego spalinowych silników okrętowych. Zagadnienia przedstawiono w odniesieniu do silników głównych i pomocniczych, dwusuwowych i czterosuwowych oraz jednopaliwowych i dwupaliwowych.

Realizacja tego celu odbyła się przez:

- 1) wprowadzenie do tematyki eksplozji w kolektorach powietrza rozruchowego i przewodach stowarzyszonych silników okrętowych,
- 2) omówienie budowy i działania instalacji powietrza rozruchowego,
- 3) scharakteryzowanie przyczyn i skutków eksplozji,
- 4) omówienie minimalizacji ryzyka eksplozji i
- 5) minimalizacji skutków eksplozji,
- 6) opis diagnozowania szczelności zaworów rozruchowych oraz
- 7) szkolenia mechaników okrętowych.

Dokonano wprowadzenia do tematyki eksplozji w układach rozruchowych silników okrętowych. Przedstawiono podstawowe informacje statystyczne dotyczące wypadków związanych z eksploatacją silników okrętowych i ich zidentyfikowanych przyczyn w podziale na źródło zagrożenia.

Przedstawiono podstawowe informacje na temat instalacji sprężonego powietrza i układów rozruchowych, ich budowy, zadań i rozwiązań konstrukcyjnych oraz wymagań dotyczących procesu sterowania silnikiem dla silników nawrotnych i nienawrotnych.

Omówiono przyczyny i skutki eksplozji w układach rozruchowych. Dokonano wprowadzenia w zagadnienia procesów palenia, pożarów i eksplozji. Opisano parametry termodynamiczne gazu w kolektorze powietrza rozruchowego podczas uruchamiania i hamowania silnikiem oraz scharakteryzowano główne przyczyny źródłowe tych eksplozji.

Zaprezentowano możliwości dotyczące minimalizacji zagrożenia eksplozją w układach rozruchowych i zalecenia ogólne oraz szczegółowo omówiono zagadnienia utrzymania stanu technicznego zaworów rozruchowych, kontrolowania ich szczelności podczas pracy silnika oraz monitorowania szczelności komór spalania silnika.

Zaprezentowano budowę i zasadę działania urządzeń minimalizujących skutki eksplozji, w tym kolejno omówiono przerywacze płomieni, bezpieczniki membranowe, zawory bezpieczeństwa oraz blokadę wtrysku paliwa w trakcie rozruchu silnika.

Przedstawiono budowę, zasadę działania i podstawowe elementy eksperymentalnego systemu diagnostyczno-pomiarowego potencjalnie zwiększającego bezpieczeństwo eksploatacji silnika w zakresie prewencji eksplozyjnej układów rozruchowych.

Dokonano przeglądu i przedstawiono propozycje dotyczące kształcenia inżynierów mechaników okrętowych w zakresie tematyki eksplozji w układach rozruchowych. Pokazano możliwości wykorzystania symulatorów siłowni i systemu sprężonego powietrza w zakresie szkoleń poświęconych analizie przebiegu eksplozji i czynników do niej prowadzących oraz działania systemu zabezpieczeń silnika.

ABSTRACT

Explosions in the starting air systems of marine engines – causes, prevention and minimization of effects

This book is a review of the issues related to explosions in the starting air systems of marine internal combustion piston engines, in order to minimize the effects of potential explosions and ensure proper training thereof. The issues were addressed for the following type of engines: main and auxiliary, two-stroke and four-stroke, single-fuel and dual-fuel engines.

A logical, multi-step process was undertaken to achieve this aim:

- 1) introduction of explosions in starting air lines of marine engines,
- 2) construction and operation of starting air systems,
- 3) causes and effects of explosions,
- 4) minimizing explosion risk,
- 5) minimizing explosion effects,
- 6) design and operation of diagnostic and measurement systems for starting air valves tightness,
- 7) ship engineer training.

Firstly, the subject of explosions in starting air lines of marine engines was introduced. Basic statistical information concerning accidents during the operation of marine engines and identified accident causes were presented with a breakdown per source of danger.

Basic information on starting air systems, their construction, tasks and design solutions were presented and broken down per engine reversible and non-reversible engines type.

Secondly, the causes and effects of explosions in crankcases were then discussed. The processes of burning, fire and explosions were introduced. Thermodynamic processes occurring during engine starting and braking were presented. The sequence of events leading to an explosion in starting air lines was described and the main root causes of these explosions in marine engines were characterized.

Following, the possibilities of minimizing the risk of explosions in starting air lines were presented. General recommendations were given and the issues for inspecting the technical condition of starting air valves, their tightness monitoring during engine operation, and combustion chamber tightness.

Next, the design, operation principles and basic design features of experimental diagnostic and measurement system that improves the safety of engine operation in terms of potential preventing starting air lines explosions were discussed.

The education of ship engineers in the field of starting air lines explosions was also reviewed and relevant proposals for the matter were outlined. The publication highlighted the possibilities of using the marine engine room simulators and starting systems simulators for training sessions devoted to the analysis of the course of an explosion, the factors leading to it and the operation of engine protective devices.