

ANALYSIS OF POSSIBILITIES OF THE APPLICATION OF DUAL FUEL ENGINES AS A MAIN PROPULSION ON LNG GAS CARRIERS

Mariusz Giernalczyk

*Katedra Siłowni Okrętowych
Akademia Morska w Gdyni
Morska Street 83, 81-225 Gdynia, Poland
tel.: +48 58 6109307
e-mail: magier@am.gdynia.pl*

Abstract

Gas carried on LNG carriers is liquefaction gas at ambient pressure and temperature minus 163 C degree is subject to boil-off and cause increase in pressure. This phenomenon makes danger of explosion. The simplest possibility to circumvent the foresail event is to release - liquefied gas to atmosphere. However, the mentioned way causes losses of cargo and air pollution. Method that is more rational is to use boil-off fuel gas as propulsion energy in dual fuel engines. This paper describes exploitation costing of main propulsion on LNG carriers trying to find out the best solution. There are presented fuel gas supply systems as well various types of engines driven by fuel gas. Moreover, author presents further design development of main propulsions of LNG carriers. In the case of cryogenic tankers intensive interest in their purchase is observed. In orders portfolio for the next several years the ships with steam turbine power plant dominate. Is this related with the large exploitation experiences: with possibility of combustion of both vaporized gas (BOF) and heavy fuel in the boilers and with the possibilities of steam utilization to heating means, including liquid fuel gasification. The possibility of the exploitation of a new kind gas ship called LNGRV (RV - regasification vessel) is poised since, which in the large distance from the shore carries out LNG gasification and through several days forces gas to the undersea pipeline. However steam turbine propulsion is characterized by lowest efficiency, among of thermal engines. Whereas thermal efficiency of COGES system is presently higher considering growing power of steam turbines in the system jointed thermodynamically with gas turbines.

Keywords: sea transportation, boil-off gas, LNG carriers, dual fuel engines

ANALIZA MOŻLIWOŚCI STOSOWANIA DWUPALIWOWYCH SILNIKÓW TŁOKOWYCH JAKO NAPĘDU GŁÓWNEGO NA GAZOWCACH TYPU LNG

Streszczenie

Przewożony statkami naturalny gaz w postaci skroplonej, przy ciśnieniu atmosferycznym i temperaturze - 163°C, na skutek niedoskonałej izolacji ulega odparowaniu, powodując wzrost ciśnienia i stwarzając tym samym zagrożenie eksplozji. Celem uniknięcia zagrożenia wypadku, najprostszym sposobem obniżenia ciśnienia w zbiorniku jest usunięcie do atmosfery odparowanej części gazu, jednak wiąże się to ze znacznymi stratami oraz jest sprzeczne z wymogami ochrony środowiska. Innym, bardziej racjonalnym sposobem jest wykorzystanie tego gazu jako energii w silnikach napędu głównego, którymi mogą być dwupaliwowe silniki tłokowe. Niniejsza praca jest próbą analizy różnych rozwiązań, obejmujących silniki średnio- i wolnoobrotowe, zmierzającą do wyboru najbardziej dogodnego pod względem ekonomicznym. Zawiera opisy instalacji paliwowych obsługujących różne typy silników napędu głównego w tym zasilanych gazem, ponadto przedstawia oferty różnych producentów tych silników. Autor pokazuje tendencje rozwojowe dotyczące projektowania nowoczesnych gazowców typu LNG. W przypadku zbiornikowców kriogenicznych obserwuje się wzmożone zainteresowanie ich zakupem. W portfelu zamówień na najbliższe lata dominują statki z napędem turbiną parową. Jest to związane z dużymi doświadczeniami eksploatacyjnymi: możliwością spalania zarówno odparowanego gazu (BOF) jak i paliwa ciężkiego w kotłach oraz możliwościami wykorzystania pary do celów grzewczych, w tym regazyfikacji. Rozważana jest bowiem możliwość eksploatacji nowego rodzaju gazowca nazywanego LNGRV (ang. RV - regasification vessel), który w dużej odległości od brzegu dokonuje regazyfikacji LNG i przez kilkanaście dni wtłacza gaz do podmorskiego rurociągu. Jednak napęd

turbiną parową charakteryzuje się najniższą, spośród silników cieplnych sprawnością. Natomiast sprawność cieplna systemu COGES jest obecnie wyższa ze względu na rosnącą moc turbin parowych w układzie skojarzonym termodynamicznie z turbinami gazowymi.

Słowa kluczowe: transport morski, odparowany gaz naturalny, gazowce LNG, dwupaliwowe silniki tłokowe

1. Wstęp

Do przewozu skroplonego naturalnego gazu ziemnego LNG drogą morską wykorzystuje się statki nazywane gazowcami LNG, zwane też zbiornikowcami kriogenicznymi. Mimo stosowania najnowszych technologii materiałowych, przewożony tymi statkami gaz w postaci skroplonej, na skutek niedoskonałej izolacji ulega odparowaniu, powodując wzrost ciśnienia i stwarzając tym samym zagrożenie eksplozji. Celem uniknięcia zagrożenia wypadku, najprostszym sposobem obniżenia ciśnienia w zbiorniku jest usunięcie do atmosfery odparowanej części gazu. Jednak takie rozwiązanie problemu związane jest ze znacznymi stratami finansowymi oraz zagraża środowisku. Podjęto więc próbę znacznego ograniczenia ubytków związanych z odparowaniem, poprzez zastosowanie lepszych i grubszych konstrukcji izolacyjnych, co z kolei odbywa się kosztem zmniejszenia objętości przewożonego ładunku, a więc także stratami przewoźnika. Istnieje też możliwość ponownego skraplania w odpowiedniej instalacji i ponowne skierowanie do zbiorników ładunkowych, jednak wiąże się to z kolei ze znacznym zwiększeniem nakładów energetycznych oraz koniecznością zatrudnienia załogi do obsługi tego procesu [2]. Najbardziej racjonalnym sposobem „zagospodarowania” skroplonej części gazu wydaje się być wykorzystanie do spalania m.in. w spalinowych silnikach tłokowych, celem wytworzenia energii do napędu statku. W pracy podjęto próbę oceny perspektyw zastosowania dwupaliwowych silników tłokowych jako napędu głównego na gazowcach LNG.

2. Wykorzystanie odparowanego gazu do napędu spalinowych silników tłokowych

Jedną z wielu koncepcji wykorzystania odparowanego gazu jest spalanie w spalinowych silnikach tokowych. Z uwagi na fakt, iż ilość odparowanego gazu podczas podróży z ładunkiem oraz w czasie podróży bez ładunku może okazać się niewystarczająca do pełnego pokrycia potrzeb silnika, dominuje tutaj koncepcja silników dwupaliwowych. Niekorzystny dla gazu wskaźnik jego gęstości wymaga sprężania do ciśnienia ok. 25 MPa (silniki wolnoobrotowe), a następnie doprowadzenia do specjalnej konstrukcji dwufunkcyjnych wtryskiwaczy. Taki wysokociśnieniowy system może być przyczyną zagrożeń zniszczenia instalacji, dlatego pojawiły się instalacje z podwójnymi ściankami rurociągów, jednak średnica i ciśnienie w rurociągu gazowym są ograniczone. Istnieją także silniki średnioobrotowe pracujące przy niskim ciśnieniu, w których odparowany gaz dostarczany jest do silnika pod niskim ciśnieniem, rzędu 5 bar do zaworów wlotowych powietrza poszczególnych cylindrów i miesza się z powietrzem w komorze spalania [1, 5, 7].

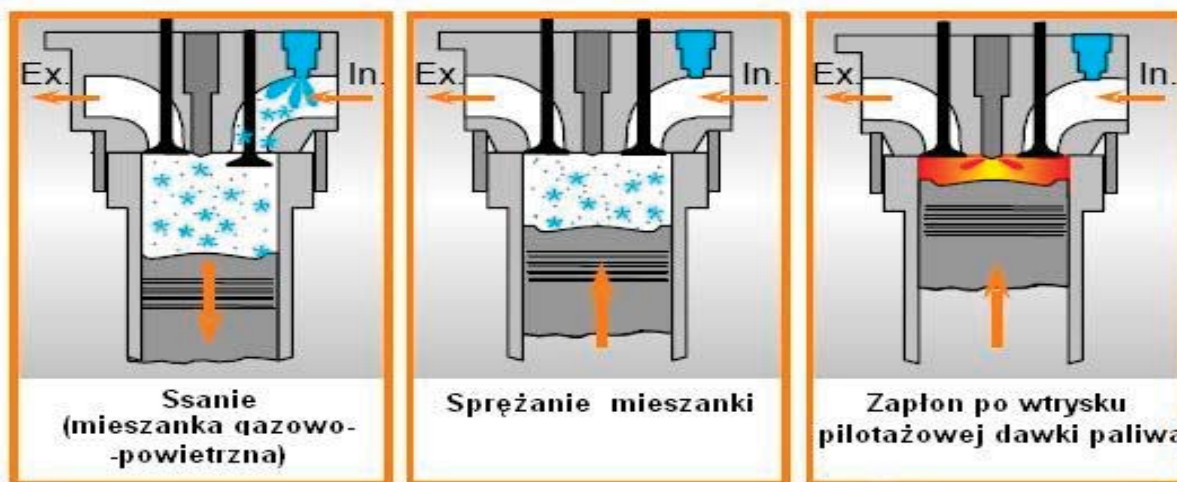
Silniki średnioobrotowe

W najnowszych rozwiązaniach silników dwupaliwowych tej grupy zastosowano oddzielny układ do pracy na paliwie ciekłym, oparty na tradycyjnym systemie wtrysku hydraulicznego oraz odrębny układ zasilania dawką paliwa pilotującego w „gazowym” trybie pracy, gdzie dawka ciekłego paliwa pilotującego wynosi ok. 1%. Silniki te mogą być zasilane paliwem lekkim (MGO ang. *Marine Gas Oil* lub MDO ang. *Marine Diesel Oil*), paliwem ciężkim (HFO ang. *Heavy Fuel Oil*) oraz odparowanym gazem (BOG ang. *Boil Off Gas*).

Sposób zasilania średnioobrotowych silników dwupaliwowych w trybie gazowym przedstawia Rys. 1.

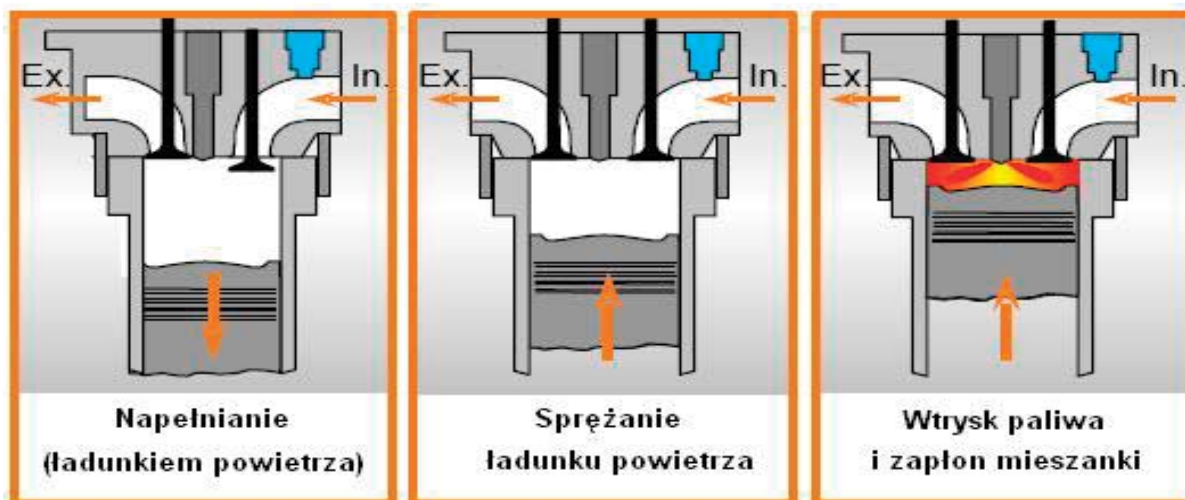
W trybie paliwowym zasilanie niczym nie różni się od konwencjonalnego zasilania paliwem silników jednopaliwowych (Rys. 2).

Jak pokazuje Rys. 1 w trybie gazowym pracuje zarówno dysza (wtryskiwacz gazowy) dostarczający gaz wraz z ładunkiem powietrza, jak i wtryskiwacz paliwowy który wtryskuje pilotażową dawkę paliwa. Podczas pracy wyłącznie na paliwie ciekłym (Rys. 2) dysza gazowa jest zamknięta, pracuje jedynie wtryskiwacz zasilany paliwem ciekłym. Przejście z trybu gazowego na zasilanie wyłącznie paliwem ciekłym następuje płynnie i jest możliwe przy dowolnym obciążeniu silnika. Przejście z pracy na paliwie ciekłym do trybu gazowego jest możliwe przy obciążeniu silnika nie przekraczającym 80% [6].



Ryc. 1. Sposób zasilania silników średnioobrotowych odparowanym gazem LNG [5]

Fig. 1. Gas and pilot fuel system [5]



Rys. 2. Zasilanie średnioobrotowego silnika spalinowego paliwem ciekłym [5]

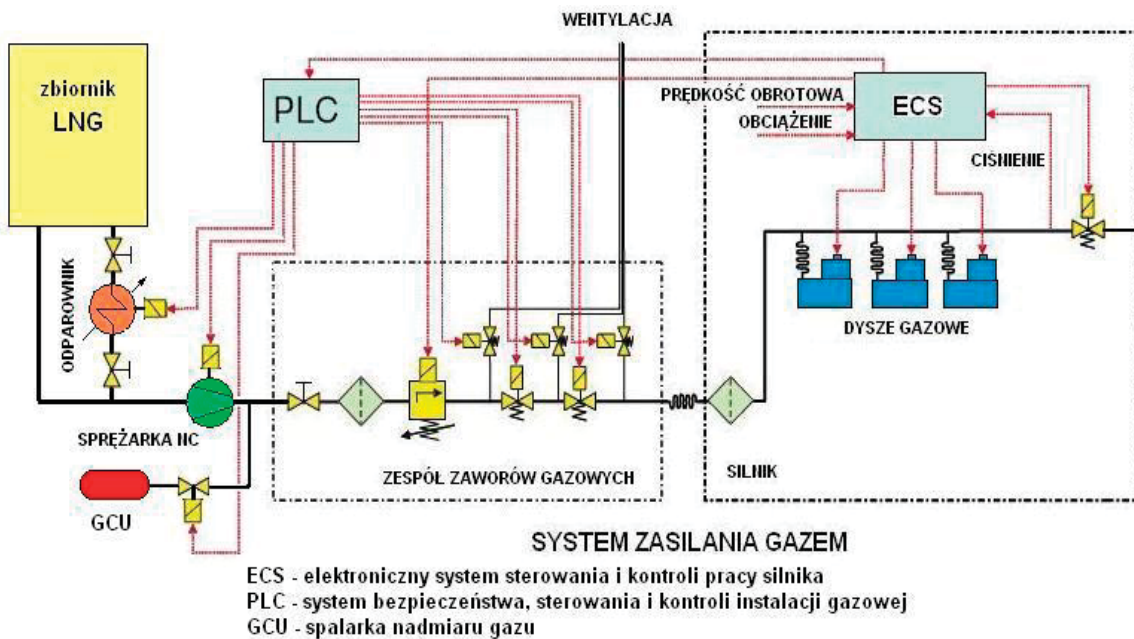
Fig. 2. Fuel oil system [5]

Schemat instalacji zasilania silnika średnioobrotowego firmy Wartsila gazem przedstawia Rys. 3.

System zasilania gazem (Rys. 3) jest całkowicie zautomatyzowany. Występują tu dwie elektroniczne jednostki sterujące: ESC (ang. *Engine control system*) oraz PLC (ang. *Plant control system*), które wspólnie obsługują instalację. System PLC kontroluje urządzenia instalacji przygotowania odparowanego gazu. Moduł ECS steruje zasilaniem silnika gazem oraz dawką wtryskiwanego ciekłego paliwa pilotażowego. Instalacja wyposażona jest w sprężarki niskiego ciśnienia, gdyż nie ma potrzeby sprężania gazu do wysokich ciśnień (ciśnienie robocze wynosi ok. 5 bar), tak jak w przypadku dwupaliwowych tłokowych silników wolnoobrotowych. Jest to kolejny czynnik wpływający na całkowitą wielkość pomieszczenia siłowni. W razie

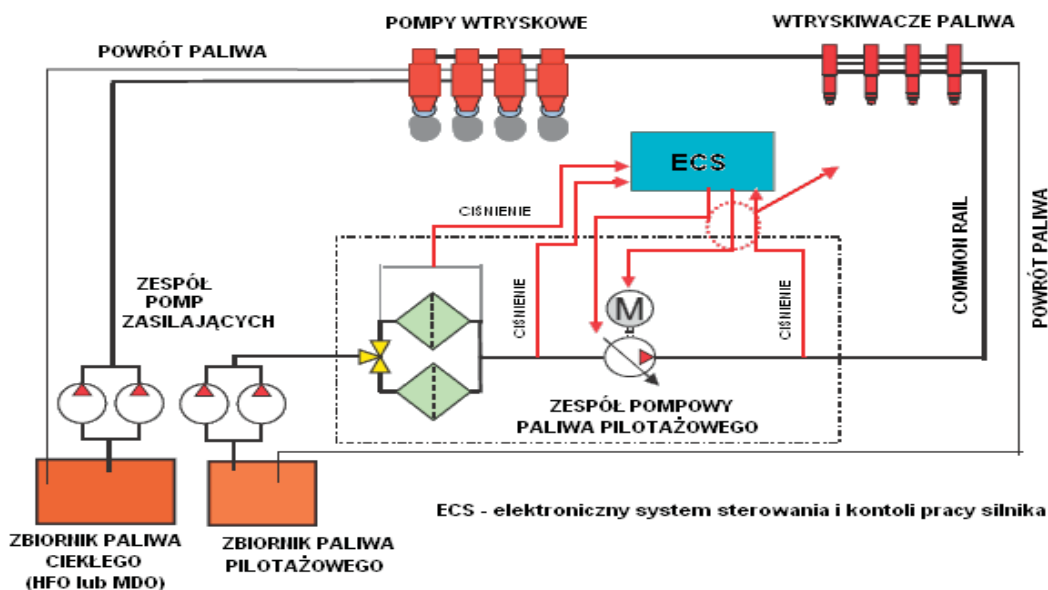
nie spodziewanego przejścia z zasilania gazowego na paliwo ciekłe (np. z powodu awarii instalacji gazowej) a tym samym zamknięcia zaworu sterującego, moduł PLC w celu zapewnienia bezpieczeństwa opróżnia instalację z gazu poprzez otwarcie zaworów wentylacyjnych. Ze względu na długość systemu gazowego, producent zaleca montaż kilku zaworów odcinających wraz z zaworami upustowymi. W przypadku uszkodzenia rurociągu moduł bezpieczeństwa odetnie uszkodzoną sekcję a gaz zostanie wydany przez zawory i instalację wentylacyjną [6].

Osobnym systemem jest instalacja paliwa ciekłego. Pompy wtryskowe zasilane są w sposób tradycyjny od wałka rozrządu. Pracą silnika zasilanego paliwem ciekłym steruje regulator prędkości obrotowej. Wspomniany wcześniej moduł ECS steruje jedynie dawką paliwa pilotażowego, niezbędnego przy pracy silnika w trybie zasilania gazem. Uproszczony system zasilania silnika firmy Wartsila paliwami ciekłymi przedstawia Rys. 4 [6].



Rys. 3. System zasilania silnika średnioobrotowego gazem [6]

Fig. 3. Pure gas supply system [6]



Rys. 4. System zasilania silnika Wartsila 50DF paliwem płynnym wraz z instalacją paliwa pilotażowego [6]

Fig 4. Wartsila 50DF fuel oil supply system for light and heavy fuel oil [6]

Obok bardzo korzystnych wskaźników ekonomicznych silniki te uzyskują także małe wartości wskaźników emisji toksycznych składników spalin, spełniając bez żadnych dodatkowych nakładów wymogi VI Aneksu Konwencji MARPOL 1973/78.

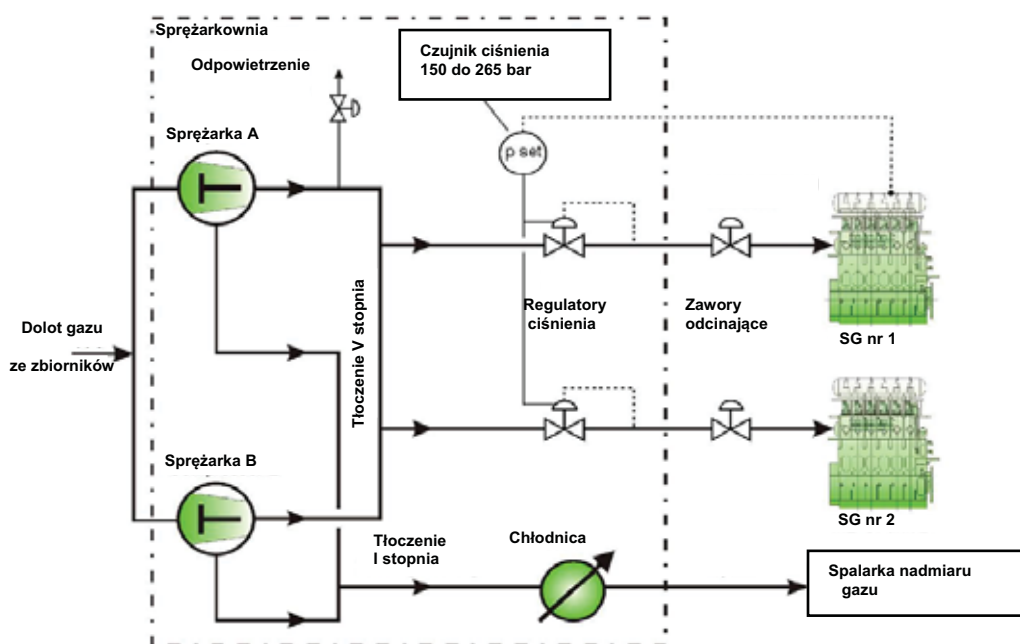
Silniki średnioobrotowe dwupaliwowe pracują najczęściej w układach napędowych spalinowo-elektrycznych (diesel-elektric). Do wytwarzania energii elektrycznej stosuje się zwykle cztery zespoły prądotwórcze, zaś silniki elektryczne przekazujące moc na napęd śruby to najczęściej silniki synchroniczne. Dla statków o zdolności przewozowej 140-200 tys. m³ przewożonego ładunku stosuje się najczęściej układy jednośrubowe, dla większych jednostek układy dwuśrubowe [2].

Oferty producentów silników wraz z podstawowymi ich parametrami przedstawia Tab. 1.

Tab. 1. Wybrane parametry średnioobrotowych silników dwupaliwowych różnych producentów [5]

Tab. 1. Technical data of some present dual-fuel engines [5]

Producent	Typ	D [mm]	S [mm]	Liczba cylindrów	P _c [MPa]	Moc z cylindra [kW]	N [obr/min]
Deutz	TBG 632	260	320	12, 16	1,6	226	1000
MAN	51/60 DF	510	600	L-6, 7, 8, 9 V-2, 14, 16, 18	1,905	975/1000	500/514
Wartsila	32 DF	320	350	6, 9, 12, 18	1,99	350	750
Wartsila	50 DF	500	580	6, 8, 9, 12, 16, 18	2,0	950	500



Rys. 5. Dwusprężarkowy zespół zasilający typu 6LP250-5S_1[3]

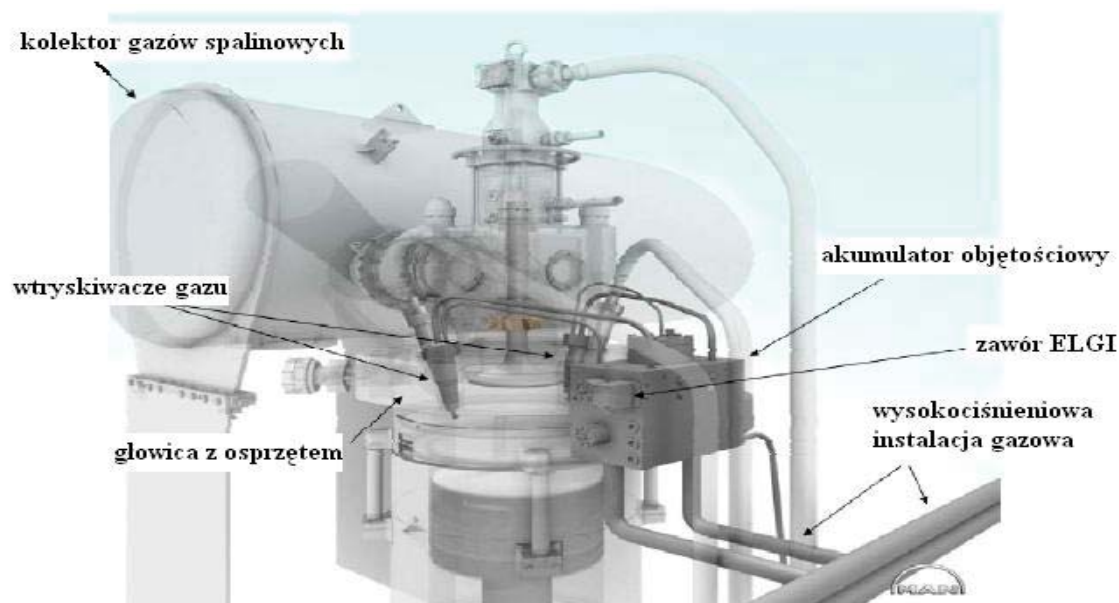
Fig. 5. Basic design concept for two compressor units 100% type 6LP250-5S_1[3]

Silniki wolnoobrotowe

Bezpośredni napęd gazowca LNG wolnoobrotowym, dwupaliwowym silnikiem jest nową ofertą firmy MAN, która wprowadza na rynek silnik serii ME - GI. Silniki serii ME - GI pozbawione są tradycyjnego mechanicznego układu rozrządu. Zarówno praca w trybie gazowym jak i zasilanie paliwem ciekłym jest sterowane elektronicznie. Za doprowadzenie energii do wtrysku paliwa i podniesienia zaworu wylotowego odpowiada system hydrauliczno -

elektroniczny. Dzięki takiemu rozwiązaniu dla każdego układu indywidualnie może być dobrana właściwa dawka paliwa i powietrza, tak aby zapewnić stabilną pracę całego zespołu. Sterowanie elektroniczne silnika zapobiega ewentualnemu spalaniu stukowemu i niepotrzebnym spadkom obciążenia i zapewnia pracę silnika z wysoką sprawnością oraz niskimi wartościami wskaźników emisji toksycznych składników spalin [7]. Silnik ten może być zasilany odparowanym gazem, jednak wymaga on zwiększonego ciśnienia. Aby osiągnąć sprawność cieplną silnika rzędu 50% wymagane ciśnienie gazu wynosi 250 bar, przy niższych obciążeniach silnika ciśnienie gazu zmniejsza się liniowo i dla obciążenia 30% wynosi ok. 150 bar. Układ zasilania silnika gazem wymaga stosowania wysokociśnieniowych sprężarek gazu. Przykład układu sprężarek oferowanego przez firmę MAN przedstawia Rys. 5.

Do zasilania silników odparowanym gazem wykorzystywane są zalecane przez firmę MAN wielostopniowe sprężarki typu 6LP250-5S 1 zaprojektowane do przetłaczania gazu o temperaturze -163°C i ciśnieniu atmosferycznym do wymaganych wartości ciśnień 150-250 bar. Nadmiar podawanego do silnika gazu spalany jest w spalarni (GCU-ang.-*Gas Combustion Unit*), która w razie potrzeby utylizuje nadmiar podawanego do silnika gazu. Sprężony gaz LNG (F-BOG-ang.-*Forced-Boil-Of-Gas*) trafia instalacją wysokociśnieniową wyposażoną w regulatory ciśnienia do silnika [3].



Rys. 6. Zmodyfikowany układ zasilania paliwem wolnoobrotowego silnika ME-GI [3]
Fig. 6. New modified parts on the ME-GI slow speed engine.[3]

Sam wtrysk gazu do komory spalania silnika możliwy jest dzięki zastosowaniu w głowicy wtryskiwaczy gazu oraz elektronicznie sterowanego zaworu ELGI (ang. *Electronic gas injection*) (Rys. 6). Aby zapewnić poprawną pracę silnika zasilanego gazem niezbędnym wymogiem jest dostarczenie ciekłego paliwa pilotującego w ilości 5-8% objętości. Badania producenta dowiodły, że bez dawki pilotażowej silnik pracuje niestabilnie, występuje spalanie stukowe, lub brak zapłonu. Wynika to m.in. z wyższej temperatury samozapłonu oparów gazowych [3].

Silniki ME - GI oprócz systemów stosowanych powszechnie w silnikach serii ME muszą być wyposażone w szereg dodatkowych instalacji, do których należą m.in.[4]:

- system wentylacji przestrzeni pomiędzy zewnętrznymi a wewnętrznymi ściankami dwuściennej instalacji zasilania silnika odparowanym gazem LNG,
- system oleju uszczelniającego, którego zadaniem jest rozdzielenie wtryskiwanego gazu od dawki paliwa pilotażowego,

- system kontroli i bezpieczeństwa zasilania silnika odparowanym gazem LNG (PLC) obejmujący szereg czujników i analizatorów. Głównym zadaniem systemu jest uruchamianie i odstawianie instalacji zasilania gazowego. W przypadku awarii instalacji system bezpieczeństwa przechodzi na zasilanie wyłącznie paliwem ciężkim, bez spadku mocy silnika głównego,
- system gazu obojętnego (IGS) jest częścią systemu kontroli i bezpieczeństwa zasilania silnika gazem. Jego zadaniem jest oczyszczenie instalacji zasilania silnika głównego z oparów gazowych.

Wolnoobrotowe silniki dwupaliwowe ME - GI mogą pracować w dowolnej konfiguracji zasilania odparowanym gazem i paliwem płynnym, jednakże najczęściej pracują w trybach [3]:

Zasilanie wyłącznie paliwem płynnym (*fuel-oil-only mode*) - tryb ten stosowany jest gdy:

- statek podróżuje bez ładunku, resztki gazu LNG są niewystarczające do zasilania silnika,
- ciśnienie gazu zasilającego jest za niskie,
- wystąpiła awaria instalacji zasilania odparowanym gazem,
- podczas manewrów portowych (dla zapewnienia większego bezpieczeństwa).

Zasilanie silnika gazem z dawką pilotażową paliwa (*minimum-fuel mode*) - tryb ten występuje podczas:

- normalnej podróży morskiej gdy ilość odparowanego gazu LNG jest wystarczająca do zapewnienia 100% obciążenia silnika głównego.

Zasilanie silnika ze wskazaną dawką gazu (*specified gas mode*) - tryb ten ustawiany jest ręcznie przez operatora (mechanika) z panelu operacyjnego:

- operator może indywidualnie dostosować dawkę gazu i paliwa do aktualnych warunków eksploatacyjnych.

Według oceny firmy MAN do napędu mniejszych gazowców proponowany jest napęd jednośrubowy z jednym silnikiem typu ME - GI, zaś dla gazowców o ładowności powyżej 148 tys. m³ producent silnika proponuje napęd dwuśrubowy, dwoma silnikami w układzie 2 x 50%. Przykłady możliwych konfiguracji układów napędowych z dwupaliwowymi silnikami wolnoobrotowymi firmy MAN dla różnej wielkości gazowców LNG pokazuje Tab. 2 [3].

Tab. 2. Rekomendowane układy napędu silnikami dwusuwowymi gazowców o wielkości 145 - 270 tys. m³
Tab. 2. Two - stroke propulsion recommendations for LNG carriers in the range from 145 - 270 kcum

Ładowność [m ³]	Rekomendowany układ napędowy	Moc napędu [kW]	Prędkość [węzły]	Stosunek skok/średnica	Spodziewany wzrost spr.
145,000- 150,000	2 x 6S60ME-GI 2 x 5S65ME-GI	2 x 14,280 2 x 14,350	19-21	3,8	5%
160,000- 170,000	2 x 5S70ME-GI 2 x 7S60ME-GI	2 x 16,350 2 x 16,660	19-21	4,0	> 5%
200,000- 220,000	2 x 6S65ME-GI 2 x 6S70ME-GI	2 x 17,220 2 x 19,620	19-21	4,2	9%
240,000- 270,000	2 x 7S65ME-GI 2 x 7S70ME-GI	2 x 20,090 2 x 21,770	19-21	4,5	> 9%

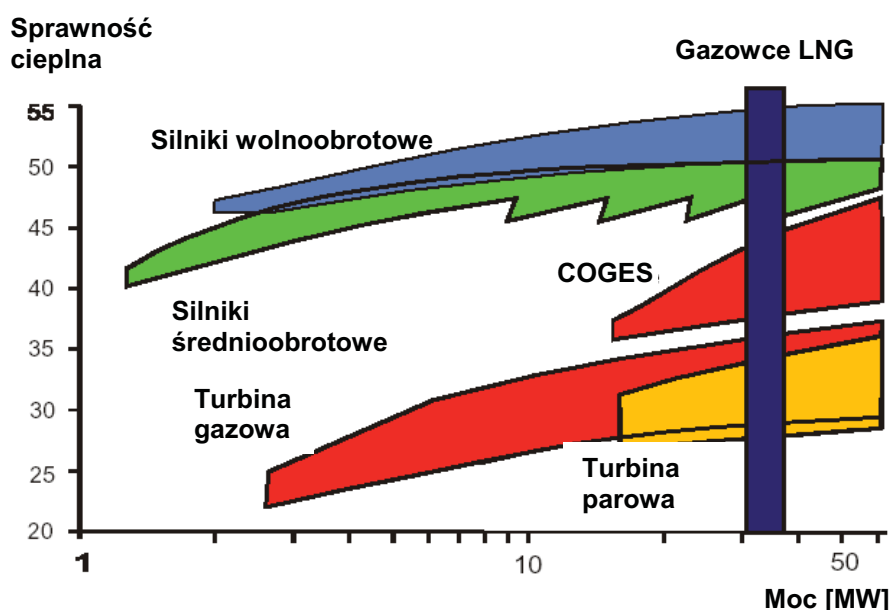
3. Podsumowanie

W przypadku zbiornikowców kriogenicznych obserwuje się wzmożone zainteresowanie ich zakupem. W portfolio zamówień na najbliższe lata dominują statki z napędem turbiną parową. Jest to związane z dużymi doświadczeniami eksploatacyjnymi: możliwością spalania zarówno odparowanego gazu (BOF) jak i paliwa ciężkiego w kotłach oraz możliwościami wykorzystania pary do celów grzewczych, w tym regazyfikacji. Rozważana jest bowiem możliwość eksploatacji nowego rodzaju gazowca nazywanego LNGRV (ang. *RV - regasification vessel*), który w dużej

odległości od brzegu dokonuje regazyfikacji LNG i przez kilkanaście dni wtłacza gaz do podmorskiego rurociągu. Jednak napęd turbiną parową charakteryzuje się najniższą, spośród silników cieplnych sprawnością (Rys. 7). Natomiast zamieszczona na wykresie (Rys. 7) sprawność cieplna systemu COGES jest obecnie wyższa ze względu na rosnącą moc turbin parowych w układzie skojarzonym termodynamicznie z turbinami gazowymi.

Bez wątpienia najwyższą sprawność cieplną posiadają spalinowe wolnoobrotowe silniki tłokowe, jak dotąd nie wykorzystywane do napędu gazowców LNG. Oferta w tym zakresie dwupaliwowego silnika firmy MAN serii ME - GI wydaje się być ciekawą propozycją. Armatorzy podchodzą do tej propozycji z dużą rezerwą z uwagi na brak doświadczeń eksploatacyjnych z takim napędem. Jedynym dotąd silnikiem wolnoobrotowym zasilanym gazem był zastosowany w elektrowni stacjonarnej w Japonii silnik MAN 12K80MC - GI. W ostatnich latach firma MAN podpisała umowę na wyposażenie 45 dużych gazowców LNG budowanych dla programu Qatargas w wolnoobrotowe silniki tłokowe sterowane elektronicznie serii ME [5]. Będą to napędy dwusilnikowe, zatem dostawa obejmuje 90 silników (31 statków klasy Q - Flex posiadać będzie silniki 6S70ME - C oraz 14 jednostek klasy Q - Max silniki 7S70ME - C). W ramach tej umowy rozważa się też możliwość wprowadzenia na części statków dwupaliwowych silników serii E - GI.

Wydaje się więc, że w najbliższych latach wybór układu napędowego dla nowo - budowanych dużych gazowców LNG ukierunkowany będzie na dwupaliwowe silniki wolnoobrotowe. Decydować o tym mogą wciąż rosnące ceny paliw płynnych, przy w miarę ustabilizowanej cenie gazu. Obecnie na ten wybór wskazują wskaźniki ekonomiczne, jednak ostatecznej weryfikacji wyboru dokona doświadczenie eksploatacji tych napędów.



Rys. 7. Sprawności cieplne różnych układów napędowych [5]
Fig. 7. Thermal efficiencies for the different propulsion options [5]

Literatura

- [1] Chądzyński, W., *Trendy rozwoju układów napędowych gazowców LNG*, Zeszyty Naukowe Nr 10(82) Akademii Morskiej w Szczecinie, IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo - Techniczna Explo-Ship 2006, pp. 139-150, Szczecin 2006.
- [2] Giernalczyk, M., *Analysis possibilities of cost reduction related to boil-off fuel gas being carried on LNG Gas Carriers (Analiza możliwości redukcji kosztów związanych z odparowaniem przewożonego ładunku na gazowcach typu LNG)*, PAN Journal of KONES Powertrain and Transport, European Science Society of Powertrain and Transport

Publication, Warsaw 2007.

- [3] Linwood, J., Jong-Pil Ha, Kjeld, Aabo, Rene, S., Laursen, *LNG Gas Carrier with High - pressure Gas Engine Propulsion Application*, GasTech 2006 Dubai, United Arab Emirates.
- [4] MAN, S70 ME-GI Project Guide, 2nd Edition, October 2005.
- [5] Materiały firmowe MAN, Wartsila i inne.
- [6] Wartsila 32DF, 50DF Technology Review.
- [7] Żmudzki, S., *Perspektywy wykorzystania gazu ziemnego w silnikach okrętowych*. Zeszyty Naukowe Nr 1(73) Akademii Morskiej w Szczecinie, IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo - Techniczna Explo-Ship 2006, pp. 517-528, Szczecin 2004.

