

ANALYSIS POSSIBILITIES OF COST REDUCTION RELATED TO BOIL-OFF FUEL GAS BEING CARRIED ON LNG GAS CARRIERS

Mariusz Giernalczyk

Akademia Morska w Gdyni, Katedra Siłowni Okrętowych
Morska 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 causing increase in pressure. This phenomenon makes danger of explosion. The simplest possibility to circumvent the foresaid event is to release-liquefied gas to atmosphere. However, the mentioned way causes losses of cargo and air pollution. There is an option to re-condensate gas again nevertheless to do it extra energy is required. Method that is more rational is to use boil-off fuel gas as propulsion energy in diesel engines, gas & steam turbines. This paper describes exploitation costing of main propulsion on LNG carriers trying to find out the best solution. There are presented fuel gas supply system as well various type of engine driven by fuel gas. Moreover, author presents further design development of LNG carriers.

Possibilities of cost reduction related to boil-off fuel gas, the Moss RS standard setup for gas reliquefaction system, example of dual fuel diesel engines & electric propulsion, basic design concept for two compressor units 100% type 6LP250-5S_1, diagram of COGES system, thermal efficiencies for the different propulsion options, technical data of some present dual-fuel engines, as well two-stroke propulsion recommendations for LNG carriers are illustrated in the paper.

Keywords: sea transportation, boil-off fuel gas, LNG carriers, diesel engines, gas & steam turbines

ANALIZA MOŻLIWOŚCI REDUKCJI KOSZTÓW ZWIĄZANYCH Z ODPAROWANIEM PRZEWOŻONEGO ŁADUNKU 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. Wiąże się to jednak ze znacznymi stratami oraz jest sprzeczne z wymogami ochrony środowiska. Innym, bardziej racjonalnym sposobem jest powtórne skraplanie bądź wykorzystanie tego gazu jako energii w silnikach napędu głównego, którymi mogą być: spalinowe silniki tłokowe, turbiny gazowe lub turbiny parowe. W artykule przeprowadzono analizę różnych sposobów wykorzystania odparowanego gazu i podjęto próbę wyboru najkorzystniejszego rozwiązania.

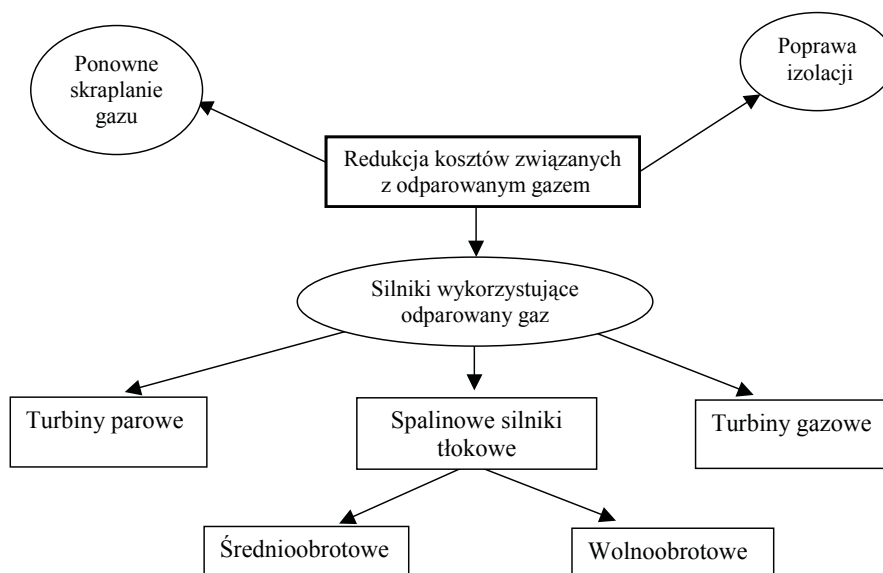
Niniejszy artykuł jest próbą analizy różnych rozwiązań, zmierzającą do wyboru najbardziej dogodnego pod względem ekonomicznym. Zawiera opisy instalacji paliwowych obsługujących różne typy silników napędu głównego zasilane gazem, ponadto przedstawia oferty różnych producentów tych silników. Autor pokazuje tendencje rozwojowe dotyczące projektowania nowoczesnych gazowców typu LNG.

Słowa kluczowe: transport morski, gaz naturalny, gazowce LNG, spalinowe silniki tłokowe, turbiny gazowe, turbiny parowe

1. Wstęp

LNG (ang. *Liquefied Natural Gas*) to naturalny gaz ziemny przygotowany do transportu i dalszej dystrybucji poprzez usunięcie niepożądanych zanieczyszczeń oraz skroplenie. Substancjami balastowymi są: dwutlenek węgla, azot, siarkowodór, dwusiarczek węgla oraz woda w postaci pary. Przeciętny skład procentowy LNG przedstawia się następująco: 91-92% metanu, 6-7% propanu, do 2% wyższych frakcji węglowodorowych. Przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym mieszanina ta wrze w temperaturze -163°C i w takich warunkach jest transportowana. Z regazyfikacji 1 m^3 LNG otrzymuje się 600 m^3 bezwonnego gazu lżejszego od powietrza.

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. Istnieje tutaj kilka alternatywnych możliwości ograniczania ubytków, bądź wykorzystania gazu w napędach głównych statków. Strukturę możliwości ograniczenia strat związanych z odparowaniem skroplonego gazu pokazuje rys. 1.



Rys. 1. Możliwości ograniczenia strat związanych z odparowaniem skroplonego gazu
Fig. 1. Possibilities of cost reduction related to boil-off fuel gas

2. Poprawa izolacji

Wartość stopnia odparowania ładunku przyjmuje się przeciętnie jako równą 0,15% dziennie. Pod względem konstrukcji zbiorników gazowce LNG dzielą się na następujące typy:

1. Ze zbiornikami kulistymi. Zbiorniki te nie są częścią konstrukcji kadłuba statku. Ustawiane są i mocowane do specjalnych elementów przytwierdzonych do kadłuba wewnętrznego. Wewnętrzna warstwa zbiornika zbudowana jest z aluminium lub jego stopu, obłożona jest zewnątrz warstwą izolacji zamkniętej w stalowej sferycznej skorupie. Pomiędzy tą kulą a burtami znajdują się zbiorniki balastowe.
2. Ze zbiornikami membranowymi. Wewnętrzna ściana zbiornika jest cienką membraną wykonaną z niskowęglowej stali nierdzewnej lub stopu (inwar) z wysoką zawartością niklu, spoczywającą na mocnej izolacji, która oparta jest z kolei na konstrukcji statku. Różnice w tej technologii polegają przede wszystkim na sposobie łączenia z kadłubem oraz strukturze podwójnych okładzin izolacyjnych z membranami:

- dla systemu Gas Transport posiadające membranę z inwaru o grubości 0.7 mm oraz izolowane szkłem wulkanicznym,
 - dla systemu Technigas są to panele posiadające membranę ze stali nierdzewnej, triplex'u oraz tworzywa izolującego cieplnie.
3. Posiadające zbiorniki pryzmatyczne wykonane z blachy duraluminiowej o grubości 12-25 mm, wstawione w całości do kadłuba statku, uprzednio wyłożonego izolacją. Wypełniają one prawie całą objętość ładowni.

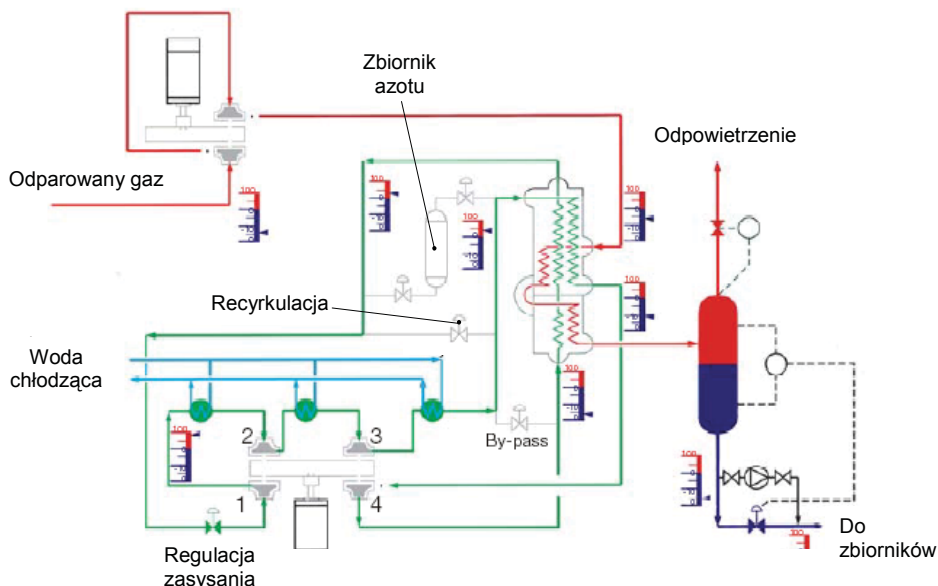
Ocenia się, iż obecnie stosowane technologie budowy zbiorników są tak zaawansowane i stanowią szczytowe osiągnięcia nauki i techniki, że dalsza ich poprawa w perspektywie najbliższych lat jest niemożliwa i wiązałaby się ze wzrostem ich grubości, kosztem objętości przewożonego ładunku oraz znaczącym wzrostem jej kosztów. Tak więc można uznać, że całkowite uniknięcie strat wynikających z odparowania jest niemożliwe i chyba niecelowe.

3. Ponowne skraplanie gazu

Ponowne skraplanie par gazu stwarzałyby konieczność zastosowania odpowiedniej instalacji do tego celu, co wiązałoby się z dodatkowymi kosztami inwestycyjnymi, kosztami remontów, zwiększeniem liczby członków załogi oraz kosztami eksploatacyjnymi związanymi z potrzebą zwiększenia mocy elektrowni. Dodatkowe zapotrzebowanie na energię elektryczną związane z procesem ponownego skraplania gazu jak szacuje się może dochodzić do 10% wartości energetycznej przewożonego ładunku.

Jak dotąd proces ponownego skraplania gazu prowadzony jest w systemach elektrowni ładowych oraz na statkach LPG. Propozycje kompleksowej instalacji skraplania gazu LNG pod nazwą Moss Reliquefaction System firmy Hamworthy przedstawia rys.2. Składa się on z trzech obiegów:

- instalacji gazu LNG,
- azotowego obiegu chłodniczego,
- pomocniczego systemu wody chłodzącej.



Rys. 2. Standardowa instalacja ponownego skraplania gazu Standard Moss RS [4]

Fig. 2. The Moss RS standard setup for gas reliquefaction system

Skraplanie odparowanego gazu odbywa się poprzez zamknięty azotowy obieg chłodniczy (obieg Brayton'a). Odparowany gaz LNG pobierany jest ze zbiorników ładunkowych, sprężany za pomocą sprężarek niskiego ciśnienia i przesyłany do tzw. zimnej skrzyni (zbiornika), w której to

ulega skropleniu za sprawą azotowego obiegu chłodniczego. Instalacja gazowa LNG oprócz sprężarek niskiego ciśnienia obejmuje także płytowy, kriogeniczny wymiennik ciepła, separator oraz pompy powrotne, tłoczące ponownie skroplony gaz do zbiorników ładunkowych.

Obieg chłodniczy obejmuje trzystopniową sprężarkę promieniową z urządzeniem rozprężającym (rys.2 poz.4), które w wyniku rozprężania gazu „wzmacnia” napęd sprężarki powodując obniżenie mocy potrzebnej do jej napędu i chłodzeniem międzystopniowym (chłodnice zasilane zazwyczaj wodą morską). Azot sprężany jest od ciśnienia 1,35 MPa do ciśnienia 5,7 MPa, a za ostatnim trzecim stopniem sprężarki jest kierowany do „gorącej” części płytowego wymiennika ciepła, gdzie najpierw jest wstępnie schładzany do temperatury -110°C , a później rozprężany do ciśnienia 1,45 MPa w urządzeniu rozprężającym. Po rozprężeniu osiąga temperaturę -163°C i jest doprowadzany do „zimnej” części kriogenicznego wymiennika ciepła, powodując schłodzenie i gazu LNG.

4. Wykorzystanie odparowanego gazu w układach napędowych statku

4.1. Spalinowe silniki tłokowe

Jedną z wielu koncepcji wykorzystania odparowanego gazu jest spalanie w spalinowych silnikach tokowych. Z uwagi na fakt, iż ilość odparowanego gazu podczas podróży 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, co może być przyczyną zagrożeń zniszczenia instalacji, dlatego pojawiły się instalacje z podwójnymi ściankami rurociągów. Istnieją także silniki średnioobrotowe pracujące przy niskim ciśnieniu, rzędu 0,5 MPa.

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 (oleju napędowego) wynosi ok. 1 %. Obok bardzo korzystnych wskaźników ekonomicznych silniki te uzyskują także małe wartości wskaźników emisji toksycznych składników spalin. Oferty czołowych producentów takich silników wraz z podstawowymi ich parametrami przedstawia tabela 1.

Tab. 1. Wybrane parametry średnioobrotowych silników dwupaliwowych różnych producentów
Tab. 1. Technical data of some present dual-fuel engines

Producent	Typ	D [mm]	S [mm]	Liczba cylindrów	P_c [MPa]	Moc z cylindra [kW]	n [obr/min]
Deutz	TBG632	260	320	12,16	1,6	226	1000
MAN	51/60DF	510	600	L-6,7,8,9 V-2,14,16,18	1,905	975/1000	500/514
Wartsila	32DF	320	350	6,9,12,18	1,99	350	750
Wartsila	50DF	500	580	6,8,9,12,16,18	2,0	950	500

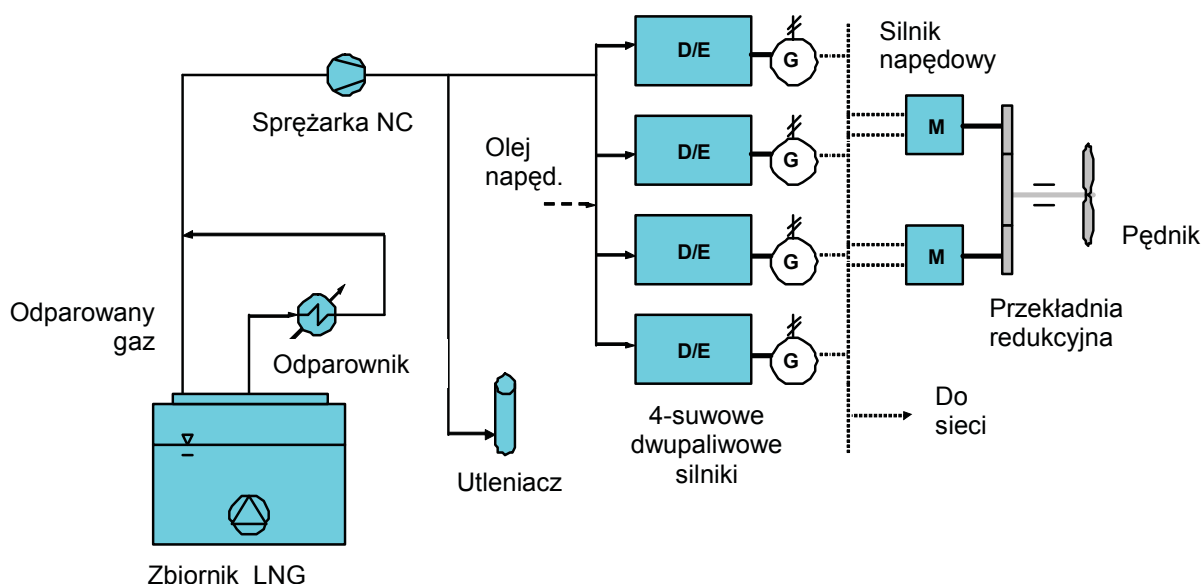
Silniki średnioobrotowe, dwupaliwowe pracują najczęściej w układach napędowych spalinowo-elektrycznych. Przykład schematu takiego napędu pokazuje rys.3.

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. Korzyści wynikające ze stosowania układów spalinowo – elektrycznych to:

- optymalne wykorzystanie mocy elektrowni w każdych warunkach pływania,
- dowolność rozmieszczenia agregatów prądotwórczych oraz pozostałych urządzeń,
- płynna zmienność prędkości obrotowej w szerokim zakresie,
- możliwość uzyskania wysokiego momentu,
- niski poziom wibracji i hałasu.

Do wad tego układu można zaliczyć:

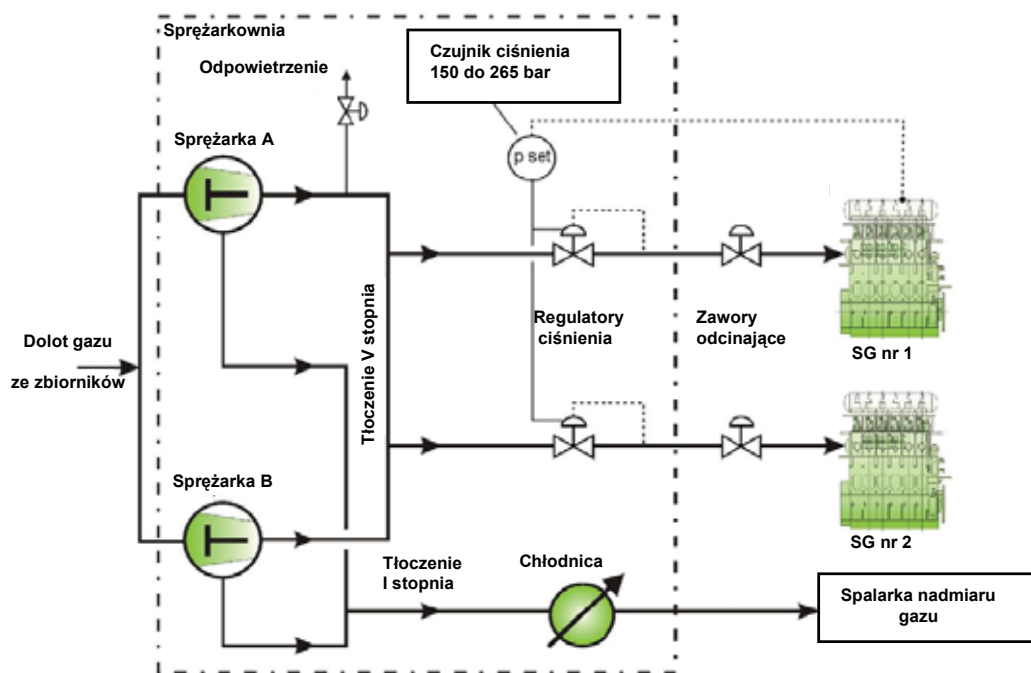
- niższą sprawność układu w porównaniu z napędem silnik spalinowy – śruba,
- generowanie drgań,
- wyższe koszty inwestycyjne układu.



Rys.3. Przykład zastosowania dwupaliwowych średnioobrotowych silników spalinowych do napędów elektrycznych[4]
 Fig.3. Dual fuel diesel engines & electric propulsion – example [4]

Silniki wolnoobrotowe

Bezpośredni napęd gazowca wolnoobrotowym, dwupaliwowym silnikiem jest nową ofertą firmy MAN, która wprowadza na rynek silniki serii ME-GI. Silnik ten może być zasilany odparowanym gazem, jednak wymaga on zwiększonego ciśnienia. Aby osiągnąć sprawność cieplną silnika rzędu 50 % wymagane ciśnienie gazu wynosi ok. 25 MPa, przy niższych obciążeniach silnika gazu zmniejsza się liniowo i dla obciążenia 30% wynosi ok. 15 MPa. Układ zasilania silnika gazem, wymaga stosowania wysokociśnieniowych sprężarek gazu. 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 15-25 MPa. Nadmiar podawanego do silnika gazu spalany jest w specjalnej jednostce. Schemat ideowy instalacji zasilania odparowanym gazem silników serii ME-GI pokazuje rys.4.



Rys. 4. Dwusprężarkowy zespół zasilający typu 6LP250-5S_1[2]
 Fig. 4. Basic design concept for two compressor units 100% type 6LP250-5S_1 [2]

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 dwusłubowy, dwoma silnikami w układzie 2 x 50%. Przykłady możliwych konfiguracji układów napędowych z dwupaliwowymi silnikami wolnoobrotowymi firmy MAN dla różnej wielkości gazowców LNG pokazuje tablica 2.

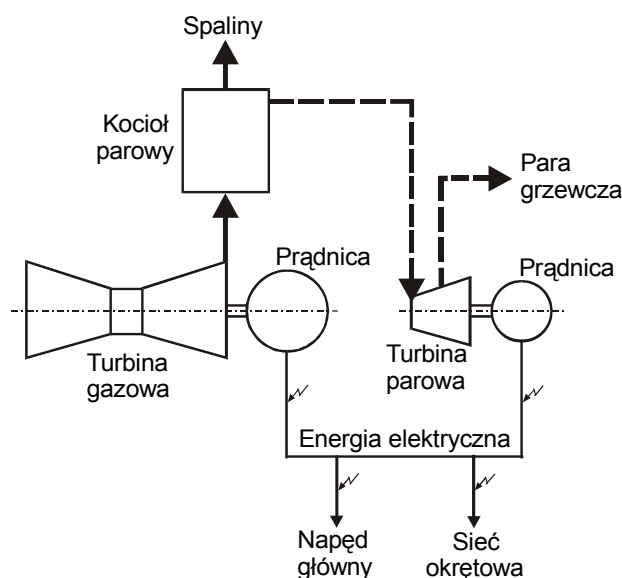
Tab. 2. Rekomendowane układy napędu silnikami dwusłubowymi gazowców o wielkości 145-270 tys. m³[2]
 Tab. 2. Two-stroke propulsion recommendations for LNG carriers in the range from 145-270 kcum [2]

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 %

4.2. Turbiny gazowe

Ze względu na niższą sprawność, lokująca je pomiędzy sprawnością spalinowych silników tłokowych oraz turbin parowych (rys. 4) zastosowanie turbin gazowych we flocie handlowej było dość ograniczone, a w ostatnich latach sprowadzało się w zasadzie do zastosowania na dużych statkach pasażerskich. Możliwością podniesienia sprawności układu napędowego z turbina gazową jest zastosowanie siłowni okrętowej kombinowanej paro-gazowej, które to rozwiązanie z powodzeniem stosowane jest w elektrowniach lądowych. Dzięki utylizacji ciepła spalin odlotowych i wykorzystaniu ich do wytwarzania pary w kotle, która później służy do napędu

turbiny parowej, sprawność takiego układu jest zbliżona do sprawności silników wolnoobrotowych. Zwykle są to napędy turbinowo-elektryczne, gdzie obie turbiny, gazowa i parowa napędzają prądnice przekazujące energię elektryczną do sieci, którą zasilany jest m.in. silnik elektryczny napędzający pędnik oraz pozostałe odbiorniki sieci. Schemat ideowy takiego układu o nazwie COGES (ang. - Combined Gas Turbine and Steam Turbine Integrated Electric Drive) pokazuje rys. 5. Zaletą turbin gazowych są mały ciężar i gabaryty, co pozwala zmniejszyć wielkość siłowni, a tym samym zwiększyć przestrzeń ładunkową. Turbiny gazowe są przystosowane do pracy na parach przewożonego gazu, natomiast nie nadają się do pracy na paliwie ciężkim.



Rys. 5. Schemat ideowy układu COGES
Fig. 5. Diagram of COGES system

4.3. Turbiny parowe

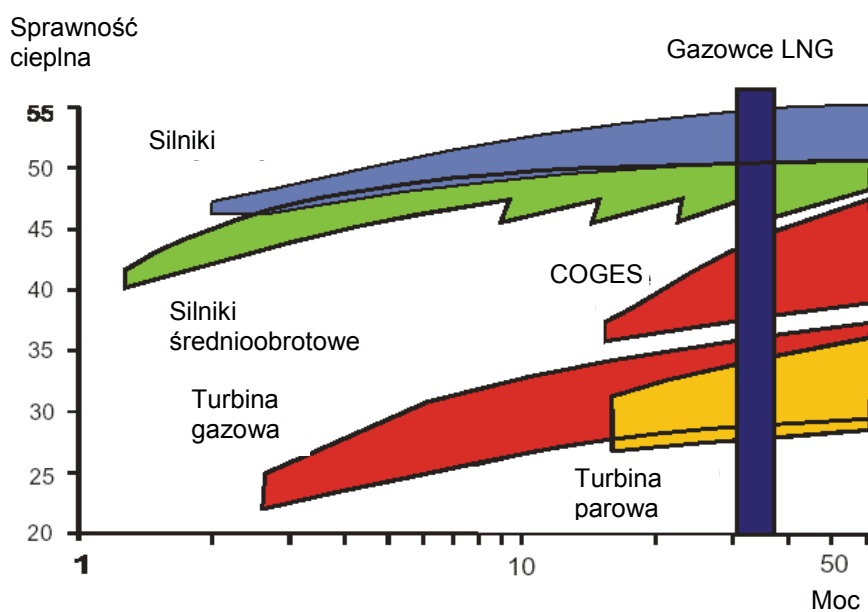
Napęd gazowców LNG turbinami parowymi należał dotąd do jednych z najbardziej popularnych rozwiązań i obejmował najczęściej dwukadłubową turbinę (wysoko - i niskoprężną) zasilaną z dwóch kotłów. Elektrownię stanowiły zwykle dwa turbogeneratory i jeden spalinowy zespół prądotwórczy. Odparowany gaz był najpierw sprężany a następnie zasilał palniki dwupaliwowych kotłów. Zwykle ilość odparowanego gazu była wystarczająca do opalania kotła i wytwarzania pary podczas podróży morskiej. Ewentualny niedobór mógł być uzupełniany bądź to pobieraniem gazu ze zbiorników ładunkowych lub zastąpiony zasilaniem kotła paliwem ciężkim.

Dodatkową zaletą tego rozwiązania jest możliwość wykorzystania pary do procesów grzewczych w tym do ponownego odparowania (regazyfikacji) LNG przed jego wyładunkiem. Wadą tego układu jest niska sprawność cieplna turbiny.

5. Podsumowanie

Obserwuje się wzmożone zainteresowanie budową nowych gazowców LNG. W portfolio zamówień na najbliższe lata dominują statki z napędem turbiną parową. Jest to rozwiązanie sprawdzone z 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 LNCRV (*LNG regasification vessel*). Jednak napęd turbiną parową nie charakteryzuje się najwyższą,

spośród silników cieplnych sprawnością. Zakresy sprawności cieplnych różnych rodzajów napędu przedstawia rys. 6. Bez wątpliwości najwyższą sprawność cieplną posiadają spalinowe wolnoobrotowe silniki tłokowe, jak dotąd nie wykorzystywane w tego typu napędach. Oferta w tym zakresie dwupaliwowego silnika firmy MAN serii ME-GI wydaje się być ciekawą propozycją. Jak dotąd armatorzy podchodzą do tej propozycji z dużą rezerwą z uwagi na brak doświadczeń eksploatacyjnych z takim napędem. Jednakże ogromne nakłady finansowe firmy MAN na badania nad rozwojem konstrukcji tego silnika i jego wdrożeniem powinny przynieść w niedługim czasie oczekiwane skutki.



Rys. 6. Sprawności cieplne różnych układów napędowych [4]
Fig. 6. Thermal efficiencies for the different propulsion options [4]

Drugim, niezwykle ciekawym i nie stosowanym dotąd powszechnie w napędach gazowców układem napędowym jest układ COGES, znajdujący liczne aplikacje w siłowniach lądowych. Zaletami tego układu, oprócz wysokiej sprawności, dorównującej, a w niektórych przypadkach przewyższającej silniki wolnoobrotowe, są małe gabaryty i ciężar, pozwalające ograniczyć przestrzeń siłowni i tym samym zwiększyć przestrzeń ładunkową.

Wydaje się więc, że wybór układu napędowego dla nowobudowanych dużych gazowców LNG dokona się pomiędzy dwupaliwowym silnikiem wolnoobrotowym a układem COGES. Obecnie na ten wybór wskazują wskaźniki ekonomiczne, jednak ostateczną weryfikacją wyboru będą doświadczenia eksploatacji tych napędów.

Literatura

- [1] Chądziński, 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] Linwood, J., Jong-Pil Ha, Aabo, K, Laursen, R.S., *LNG Gas Carrier with High-pressure Gas Engine Propulsion Application*, GasTech 2006 Dubai, United Arab Emirates, 2006.
- [3] MAN Project Guide for Marine Plants. *Dual-fuel engine 51/60. Preliminary version.*
- [4] *Materiały firmowe MAN, Wartsila i inne.*
- [5] *Wartsila 32DF, 50DF Technology Review.*
- [6] Żmudzki, S., *Perspektywy wykorzystania gazu ziemnego w silnikach okrętowych*, Zeszyty Naukowe nr 1(73) A M w Szczecinie, Explo-Ship 2006, pp. 517-528, Szczecin 2004.