

Marek Matyszczak

Akademia Morska w Szczecinie

Nowe rozwiązania techniczne zastosowane w systemach ładunkowych statków do przewozu skroplonego gazu ziemnego (LNG)

Wstęp

Jednym z podstawowych kryteriów, jakie muszą spełniać systemy bezpieczeństwa i obsługi ładunku na statkach do przewozu skroplonego gazu ziemnego (LNG – *Liquefied Natural Gas*) jest stabilizacja ciśnienia w zbiornikach ładunkowych. Zarówno nadciśnienie, jak i podciśnienie stanowią zagrożenie dla konstrukcji statku. Pomimo zastosowania zaawansowanych technologii przy budowie i izolacji zbiorników, nie można całkowicie wyeliminować parowania ładunku. Przyjmuje się, że dla najnowszej generacji statków typu LNG wyposażonych w zbiorniki membranowe dzienne ciągłe odparowanie ładunku, określane w terminologii fachowej jako BOG (*Boil Off Gas*), wynosi 0,15%, co stanowi – w zależności od wielkości statku – od 3000 do 6000 kg/h. Aby nie dopuścić do nadmiernego wzrostu ciśnienia, gaz BOG musi być odprowadzany ze zbiorników ładunkowych i zagospodarowany na statku. Typowym sposobem wykorzystania gazu BOG było użycie go jako dodatkowego paliwa do napędu statku. Przy takim rozwiązaniu część ładunku była tracona. Odzyskiwano co prawda część kosztów zyskiem na paliwie, jednak globalnie takie rozwiązania nie były zbyt efektywne.

Szybki w ostatnich latach wzrost zapotrzebowania na transport gazu ziemnego drogą morską stał się impulsem do intensywnego rozwoju technologicznego konstrukcji stat-

ków LNG. Nowa generacja statków została wyposażona w zbiorniki ładunkowe typu membranowego oraz w systemy skraplania gazu odparowanego z ładunku. Wzrosła również wielkość budowanych jednostek. W latach 2005–2010 QATARGAS zrealizował projekt budowy ponad 40 statków LNG do przewozu skroplonego gazu ziemnego. Była to seria największych na świecie statków tego typu, określanymi skrótowo jako QFLEX i QMAX. Zestawienie podstawowych parametrów technicznych dla tych statków przedstawia tablica 1.

Na statkach QMAX i QFLEX zastosowano po raz pierwszy na świecie systemy skraplania gazu LNG (*Reliquefaction Plant*) [1, 5]. Statki typu QFLEX wyposażono w systemy firmy Hamworthy: MARK I i MARK III, a na statkach QMAX zainstalowano system EcoRel, firmy Cryostar [2]. Zastosowanie systemów skraplania gazu

Tablica 1. Podstawowe dane statków QMAX i QFLEX

Statek LNG (do przewozu skroplonego gazu ziemnego)				
Parametry techniczne statku		QMAX	QFLEX	
1	Pojemność ładunku (<i>Cargo Capacity</i>) [m ³]	266 000	216 000	
2	Długość całkowita (<i>Length Overall</i>) [m]	345	315	
3	Szerokość (<i>Breadth</i>) [m]	55	50	
4	Wysokość (<i>Depth</i>) [m]	27	27	
5	Zanurzenie (<i>Draft</i>) [m]	12	12	
6	Prędkość (<i>Speed</i>) [m/s]	10 (19,5 węzła)	10 (19,5 węzła)	
7	Silniki Główne: MAN B&W	typ	7S70ME-C	6S70ME-C
		ilość	2	2
		moc [kW]	16 078	14 076

BOG dało możliwość uniezależnienia napędu statku od funkcji stabilizacji ciśnienia w zbiornikach ładunkowych. Rozwiązanie to pozwoliło zastosować jako napęd główny bardziej sprawne, wolnoobrotowe silniki spalinowe [1, 2].

Zmodyfikowana została również konstrukcja izolacji zbiorników membranowych. Przedmiotem artykułu jest opis i charakterystyka techniczna układów skraplania gazów typu: EcoRel, MARK I i MARK III.

Opis systemów skraplania gazu BOG

System skraplania gazu BOG typu EcoRel firmy Cryostar

W system EcoRel wyposażone są statki QMAX. Zaprojektowany jest on dla pełnego skraplania gazu BOG zawierającego do 20% mol azotu w tym gazie. Dla wyższych zawartości azotu system może pracować w opcji skraplania częściowego (*partial reliquefaction*). Skraplanie częściowe może być również realizowane dla gazu BOG o każdej zawartości azotu, lecz ta opcja jest mniej ekonomiczna i mniej przyjazna środowisku. Konfigurację tego systemu przedstawiono na rysunku 1, a jego schemat funkcjonalny – na rysunku 2.

System EcoRel posiada dwa niezależne obiegi:

- obieg skraplanego gazu BOG (BOG Cycle),
- obieg chłodniczy wypełniony azotem (Nitrogen Cycle).

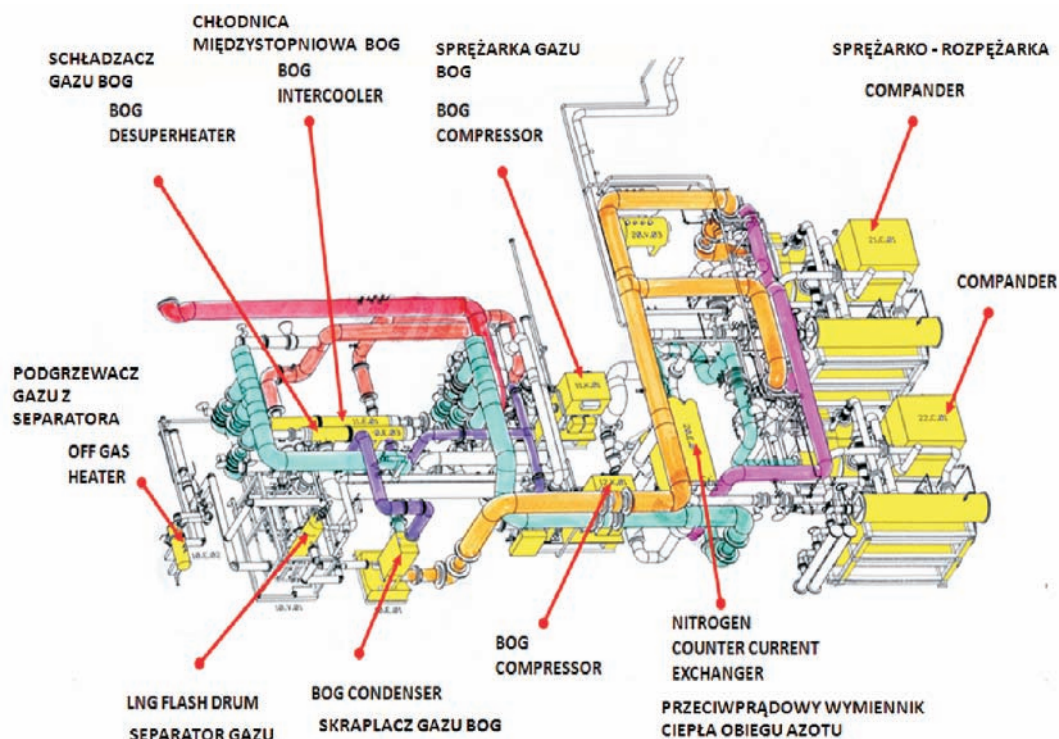
Obieg skraplanego gazu BOG (BOG Cycle)

W skład obiegu skraplanego gazu wchodzi następujące, podstawowe urządzenia:

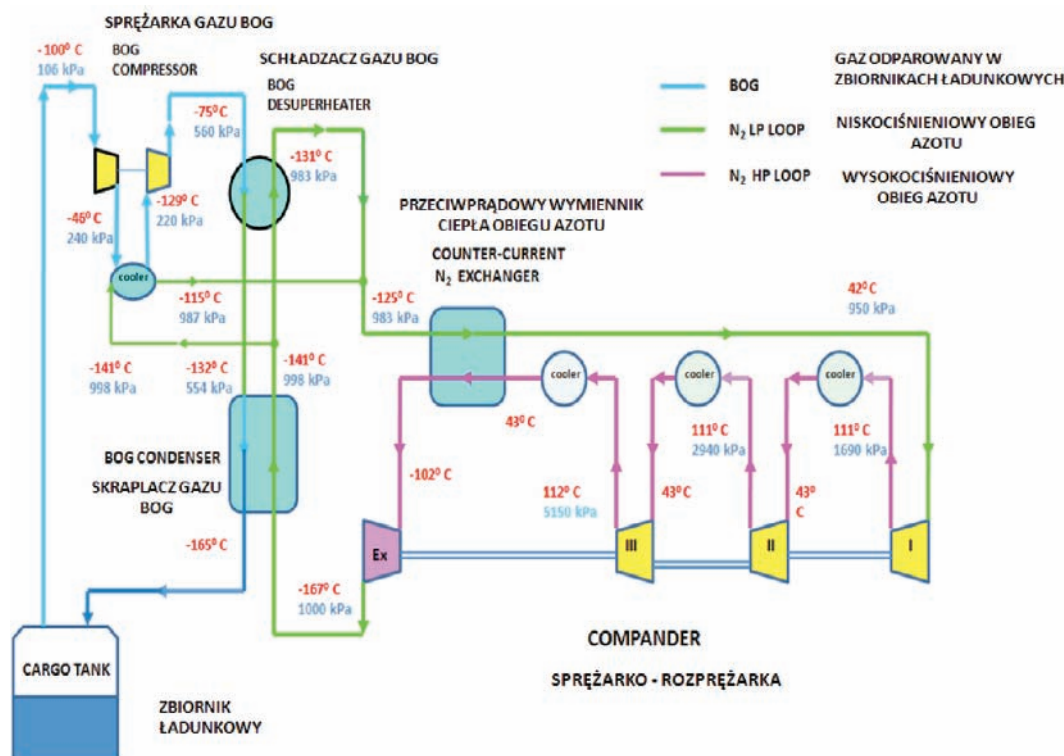
- dwie dwustopniowe wirowe sprężarki gazu BOG (Two BOG Compressors – duty/standby),

- dwie międzystopniowe chłodnice sprężarek gazu BOG (Two BOG Intercoolers),
- schładzacz gazu BOG (BOG Desuperheater),
- skraplacz gazu BOG (BOG Condenser),
- separator (LNG Drum),
- dwie pompy skraplanego gazu (Two LBOG Forced Return Pump).

Ze zbiorników ładunkowych gaz BOG o temperaturze -100°C i ciśnieniu 106 kPa(a) jest podawany kolektorem na dwustopniową wirową sprężarkę, która spręża go do ciśnienia 560 kPa(a). W trakcie sprężania redukcja temperatury gazu zachodzi w chłodnicy międzystopniowej (BOG Intercooler), chłodzonej azotem z niskociśnieniowej części obiegu chłodniczego. Po sprężeniu gaz przepływa do schładzacza (BOG Desuperheater). Wstępnie schłodzony do temperatury -132°C gaz BOG jest przesyłany do skraplacza (Condenser), gdzie następuje jego skroplenie. Skroplony gaz o temperaturze -165°C powraca do zbiorników ładunkowych statku. Przepływ gazu zapewnia różnica ciśnień pomiędzy skraplaczem a zbiornikami ładunkowymi.



Rys. 1. Konfiguracja systemu EcoRel firmy CRYOSTAR [2]



Rys. 2. Schemat funkcjonalny systemu EcoRel do skraplania gazu

Jeżeli układ pracuje w opcji pełnego skraplania, ciekły gaz kierowany jest do zbiorników statku linią omijającą separator. W opcji częściowego skraplania ciekły gaz BOG kierowany jest ze skraplacza do zbiorników przez separator.

Obieg chłodniczy (Nitrogen Cycle)

Obieg chłodniczy składa się z następujących urządzeń:

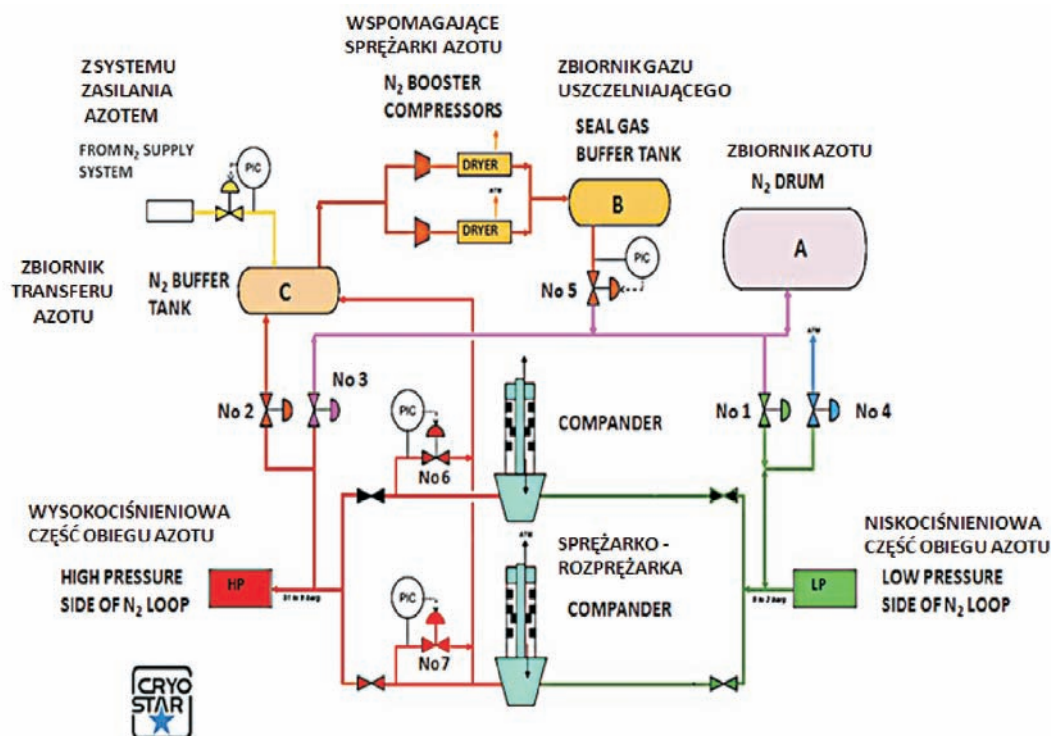
- dwóch sprężarko-rozprężarek (Two Companders – duty/standby),
- trzech chłodnic azotu (Three N₂ Coolers),
- przeciwprądowego wymiennika ciepła (N₂ Counter Current Heat Exchanger),
- dwóch wspomagających sprężarek azotu (Two N₂ Booster Compressors – duty/standby), (Nitrogen Reservoir),
- schładzacza gazu BOG (BOG Desuperheater),
- skraplacza gazu BOG (BOG Condenser).

W zamkniętym obiegu chłodniczym czynnikiem roboczym jest azot, a podstawowym urządzeniem – zespół trzystopniowej wirowej sprężarki i turbinowej rozprężarki, zabudowany na wspólnej przekładni i określany jako Compander (Compressor/Expander). Wymaganą wydajność chłodniczą obiegu uzyskuje się w wyniku sprężania i rozprężania azotu. Trzystopniowa wirowa sprężarka Compandera spręża azot od ciśnienia 950 kPa(a) do ciśnienia 5150 kPa(a). Po każdym stopniu sprężarki azot jest schładzany w chłodnicach. Po sprężeniu azot

o temperaturze 43°C kierowany jest do przeciwprądowego wymiennika ciepła (N₂ Counter Current Heat Exchanger), gdzie ochładza się go azotem z niskociśnieniowej części obiegu do temperatury –102°C, a następnie przetłacza do turbinowej rozprężarki. Po rozprężeniu azot o ciśnieniu 1000 kPa(a) i temperaturze –167°C jest przetłaczany przez skraplacz (BOG Condenser) i schładzacz (BOG Desuperheater) gazu. Azot, pobierając ciepło w tych wymiennikach od gazu BOG, powoduje jego skraplanie. Ze schładzacza azot o temperaturze –131°C przepływa przez przeciwprądowy wymiennik ciepła (N₂ Counter Current Heat Exchanger) i kierowany jest na pierwszy stopień sprężarki Compandera. W wymienniku przeciwprądowym azot z niskociśnieniowej części obiegu chłodniczego schładza azot z wysokociśnieniowej części obiegu. Azot powracający na pierwszy stopień sprężarki Compandera ma temperaturę 42°C i ciśnienie 950 kPa(a).

Regulacja wydajności chłodniczej (N₂ Inventory System)

Z uwagi na zmienną ilość generowanego gazu BOG oraz dla utrzymania pracy sprężarki BOG w polu optymalnej sprawności, konieczne jest dopasowanie wydajności chłodniczej do obciążenia termicznego obiegu. Na statkach typu QMAX i QFLEX procesem tym steruje układ regulacji określany jako N₂ Inventory System. W związku z tym, że wydajność chłodnicza zależy od masowego natężenia przepływu azotu w obiegu, regulację wydajności chłod-



Rys. 3. Uproszczony schemat transferu azotu w systemie EcoRel [2]

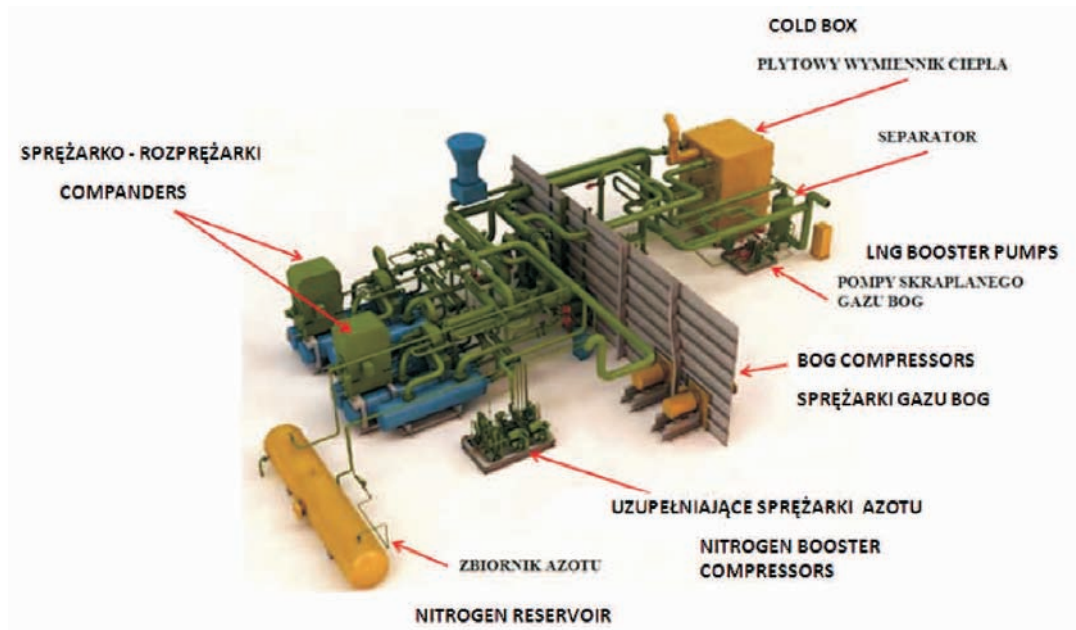
niczej realizuje się przez zwiększanie lub zmniejszanie ilości czynnika chłodniczego. Liniowa zależność funkcyjna pomiędzy masowym natężeniem przepływu azotu w obiegu chłodniczym a ciśnieniem azotu na ssaniu pierwszego stopnia sprężarki Compandera pozwala wykorzystać wartość tego ciśnienia do sterowania wydajnością chłodniczą. W układzie regulacji wydajności chłodniczej elementami wykonawczymi są: zbiorniki azotu, sprężarki azotu i zawory regulacyjne, pozwalające na dodawanie (*Make up*) lub upuszczanie (*Spill*) czynnika w obiegu chłodniczym. Uproszczony schemat transferu azotu w systemie EcoRel przedstawia rysunek 3.

W układzie regulacji wydajności systemu EcoRel zainstalowane są trzy zbiorniki azotu A, B, C, nazywane przez producenta odpowiednio: A – N₂ Drum, B – Seal Gas Buffer Tank oraz C – N₂ Buffer Tank. Transfer azotu realizowany jest za pomocą trzech zaworów upuszczających azot: No. 2, No. 3, No. 4 (*Spill Valves*) i jednego zaworu dodającego azot – No. 4 (*Make up Valve*). W systemie zamontowane są również zawory regulacyjne No. 6 i No. 7, stabilizujące ciśnienie na poziomie 2000 kPa w obiegu każdego Compandera w sytuacji, gdy jest on odstawiony i odłączony od pozostałych urządzeń oraz zawory regulujące ciśnienie gazu uszczelniającego Compandery. Jeżeli zachodzi konieczność zwiększenia wydajności chłodniczej, azot jest dodawany do niskociśnieniowej części obiegu ze zbiornika A, przy pomocy zaworu regulacyjnego No. 1.

Powoduje to zwiększanie ciśnienia w obiegu chłodniczym, a zmniejszanie w zbiorniku azotu A. W przypadku gdy wydajność chłodnicza ma być zredukowana z wysokociśnieniowej części obiegu, azot jest upuszczany albo do zbiornika A, albo do atmosfery. Jeżeli ciśnienie w wysokociśnieniowej części obiegu jest wyższe niż w zbiorniku azotu A, azot jest bezpośrednio transferowany do zbiornika A przy pomocy zaworu regulacyjnego No. 3. W sytuacji gdy ciśnienie w zbiorniku A jest wyższe niż w części wysokociśnieniowej obiegu, zawór No. 2 upuszcza azot do zbiornika C. Wzrost ciśnienia w zbiorniku C powoduje automatyczne załączenie wspomagającej sprężarki azotu (N₂ Booster Compressor), która zacznie przetłaczać azot do zbiornika B. Ze zbiornika B azot zostanie przesłany do zbiornika A przez zawór regulacyjny No. 5, który stabilizuje ciśnienie w zbiorniku B. Dla biegu jałowego Compandera zmniejszanie wydajności chłodniczej realizowane jest upuszczaniem azotu do atmosfery zaworem regulacyjnym No. 4. Oprócz transferu azotu w układzie regulacji wydajności chłodniczej, zbiornik B stanowi źródło azotu w systemie uszczelniania Compandarów.

System skraplania gazu MARK I

System ten jest zainstalowany na pierwszej serii statków typu QFLEX [1, 3, 4, 6, 7]. System ma za zadanie regulację i utrzymywanie stałego ciśnienia w zbiornikach ładunkowych, w zakresie od 106 kPa do 112 kPa.



Rys. 4. Konfiguracja systemu skraplania gazu MARK I [3]

Konfigurację tego systemu przedstawia rysunek 4, a jego schemat funkcjonalny – rysunek 5.

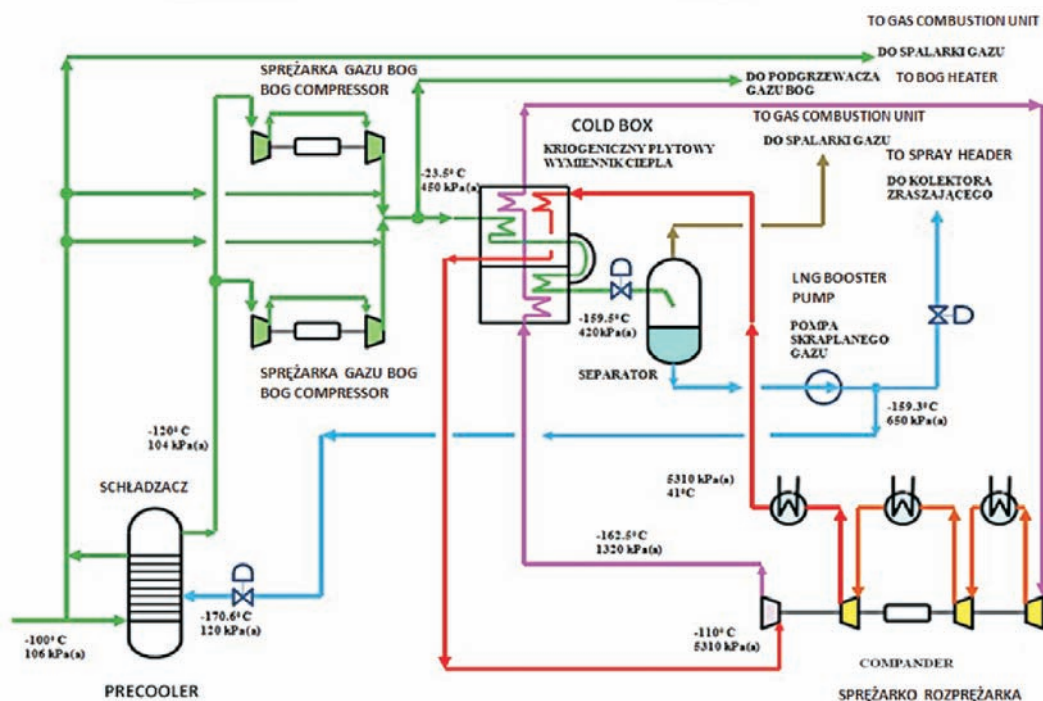
System MARK I posiada dwa niezależne obiegi:

- obieg skraplanego gazu BOG (BOG Cycle),
- obieg chłodniczy wypełniony azotem (Nitrogen Cycle).

Obieg skraplanego gazu BOG (BOG Cycle)

W skład obiegu skraplanego gazu wchodzi następujące urządzenia:

- chłodnica wstępnego schładzania gazu BOG (BOG Precooler),
- dwie dwustopniowe sprężarki gazu BOG (Two BOG Compressors – duty/standby),
- płytowy kriogeniczny wymiennik ciepła (Plate-fin Cryogenic Heat Exchanger),
- separator (LBOG Phase Separator),
- dwie pompy skraplanego gazu (Two LBOG Forced Return Pump).



Rysunek 5. Schemat funkcjonalny systemu MARK I do skraplania gazu

Płytkowy kriogeniczny wymiennik ciepła i separator są zespolone w jeden zamknięty, izolowany zespół, zwany Cold Box. Generowany w zbiornikach ładunkowych gaz BOG o temperaturze -100°C jest przesyłany specjalnym kolektorem do wirowej dwustopniowej sprężarki (BOG Compressor). Przed wlotem do sprężarki gaz schładza się w chłodnicy (BOG Precooler) do temperatury -120°C , a następnie jest sprężony w tej sprężarce do ciśnienia 450 kPa i przetłaczany do wielostrumieniowego kriogenicznego wymiennika ciepła, gdzie zostaje schładzany i skraplany. Skroplony gaz LNG o temperaturze -159°C i gazy, które nie uległy skropleniu kierowane są następnie do separatora (LNG Separator), w którym następuje rozdzielanie faz. Ciekły gaz LNG powraca do zbiorników ładunkowych, przetłaczany na zasadzie różnicy ciśnień pomiędzy separatorem a zbiornikami. Nieskroplone gazy z separatora kierowane są do spalarki gazu (GCU – *Gas Combustion Unit*) albo do masztu wentylacyjnego.

Obieg chłodniczy (Nitrogen Cycle)

Obieg chłodniczy składa się z następujących urządzeń:

- dwóch sprężarko-rozprężarek (Two Companders – duty/standby),
- kriogenicznego wymiennika ciepła (Plate-fin Cryogenic Heat Exchanger),
- dwóch wspomagających sprężarek azotu (Two N_2 Booster Compressors – duty/standby),
- zbiornika azotu (Nitrogen Reservoir).

W zamkniętym obiegu chłodniczym podstawowym urządzeniem jest zespół trzystopniowej wirowej sprężarki i turbinowej rozprężarki, zabudowany na wspólnej przekładni i określany jako Componder (Compressor/Expander). Jako czynnika roboczego używa się azotu. W wyniku sprężania i rozprężania azotu uzyskuje się wymaganą wydajność chłodniczą obiegu. Azot o ciśnieniu 1320 kPa (ciśnienie azotu w niskociśnieniowej części obiegu chłodniczego) jest sprężany w trzystopniowej sprężarce wirowej Compondera do ciśnienia 5310 kPa. Po każdym stopniu sprężania oraz na odlocie ze sprężarki azot jest schładzany wodą słodką w chłodnicach do temperatury 41°C . Następnie sprężony i schłodzony azot tłoczy się do górnej sekcji („cieplej”) kriogenicznego wymiennika ciepła. Po przejściu przez wymiennik ciepła azot schładza się do temperatury -110°C , następnie trafia on do rozprężarki Compondera. Po rozprężeniu do ciśnienia 1320 kPa uzyskuje on temperaturę $-162,5^{\circ}\text{C}$ i przetłaczany jest do dolnej sekcji kriogenicznego wymiennika ciepła. Przepływając przez wymiennik, azot skrapla i schładza gaz BOG (wymiana ciepła przeciwna), a następnie, osiągając temperaturę 40°C , powraca na pierwszy stopień sprężarki Compondera.

System skraplania gazu MARK III

W oparciu o zebrane doświadczenia w trakcie budowy, prób gazowych i wstępnej fazy eksploatacji pierwszych statków LNG typu QFLEX, firma Hamworthy zmodyfikowała system skraplania gazu BOG, instalując w następnych seriach budowanych statków nową wersję – MARK III. W tym rozwiązaniu zrezygnowano z przetłaczania gazu BOG ze zbiorników ładunkowych do Cold Boxu w temperaturach kriogenicznych, na rzecz temperatur dodatnich. Przed sprężarką zainstalowano podgrzewacz gazu i dwustopniową kriogeniczną sprężarkę BOG zastąpiono sprężarką trzystopniową, pracującą w temperaturach wyższych od temperatury otoczenia. Zastosowano też chłodzenie gazu wodą słodką w chłodnicach zainstalowanych na odlocie każdego stopnia sprężarki BOG. Modyfikacji uległ też kriogeniczny wymiennik ciepła oraz system sterowania [1, 3, 8, 9].

Obieg skraplanego gazu BOG (BOG Cycle)

W skład obiegu skraplanego gazu wchodzi następujące urządzenia:

- podgrzewacz gazu BOG (BOG Preheater),
- dwie trzystopniowe sprężarki gazu BOG (Two BOG Compressors – duty/standby),
- trzy chłodnice gazu BOG (Three BOG Coolers),
- płytkowy kriogeniczny wymiennik ciepła (Plate-fin Cryogenic Heat Exchanger),
- separator (LBOG Phase Separator),
- dwie pompy skraplanego gazu (Two LBOG Forced Return Pump).

Gaz BOG o temperaturze -100°C jest podgrzewany przed wlotem do sprężarki do temperatury około 37°C . Sprężony do ciśnienia 800 kPa i ochłodzony do temperatury 41°C w chłodnicy na wylocie ze sprężarki, gaz jest przetłaczany do kriogenicznego wymiennika ciepła. Tam ulega skropleniu i przepływa do separatora. Temperatura na odlocie z wymiennika ciepła jest regulowana zaworem. Z separatora ciekły gaz LNG powraca do zbiorników ładunkowych statku.

Obieg chłodniczy (Nitrogen Cycle)

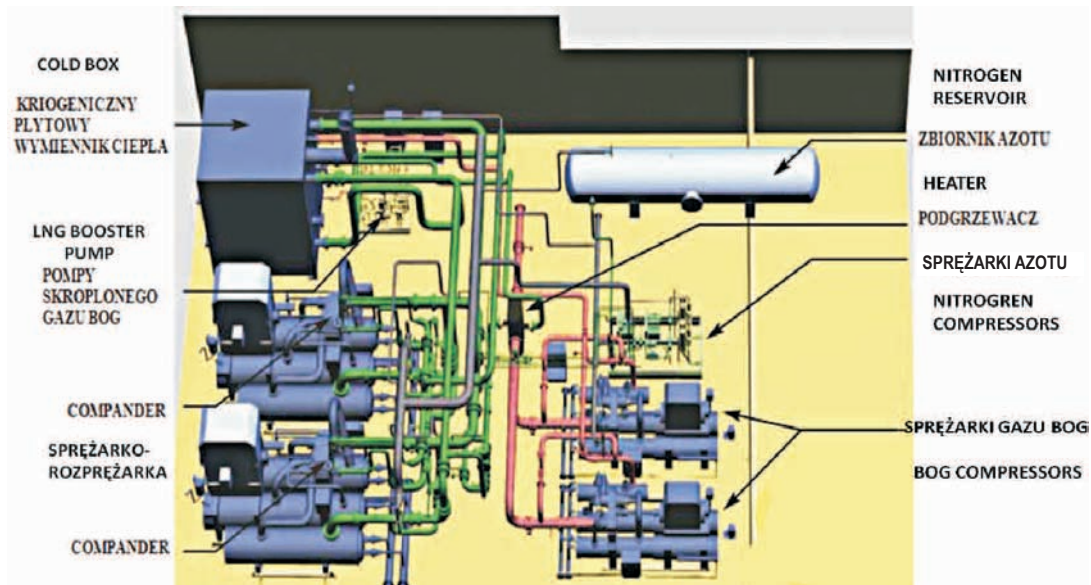
Podstawowymi urządzeniami obiegu chłodniczego są:

- dwie sprężarko-rozprężarki (Two Companders – duty/standby),
- trzy chłodnice azotu (Three Nitrogen Gas Coolers),
- kriogeniczny wymiennik ciepła (Plate-fin Cryogenic Heat Exchanger),
- podgrzewacz gazu BOG (BOG Preheater),
- dwie wspomagające sprężarki azotu (Two N_2 Booster Compressors – duty/standby),
- zbiornik azotu (Nitrogen Reservoir).

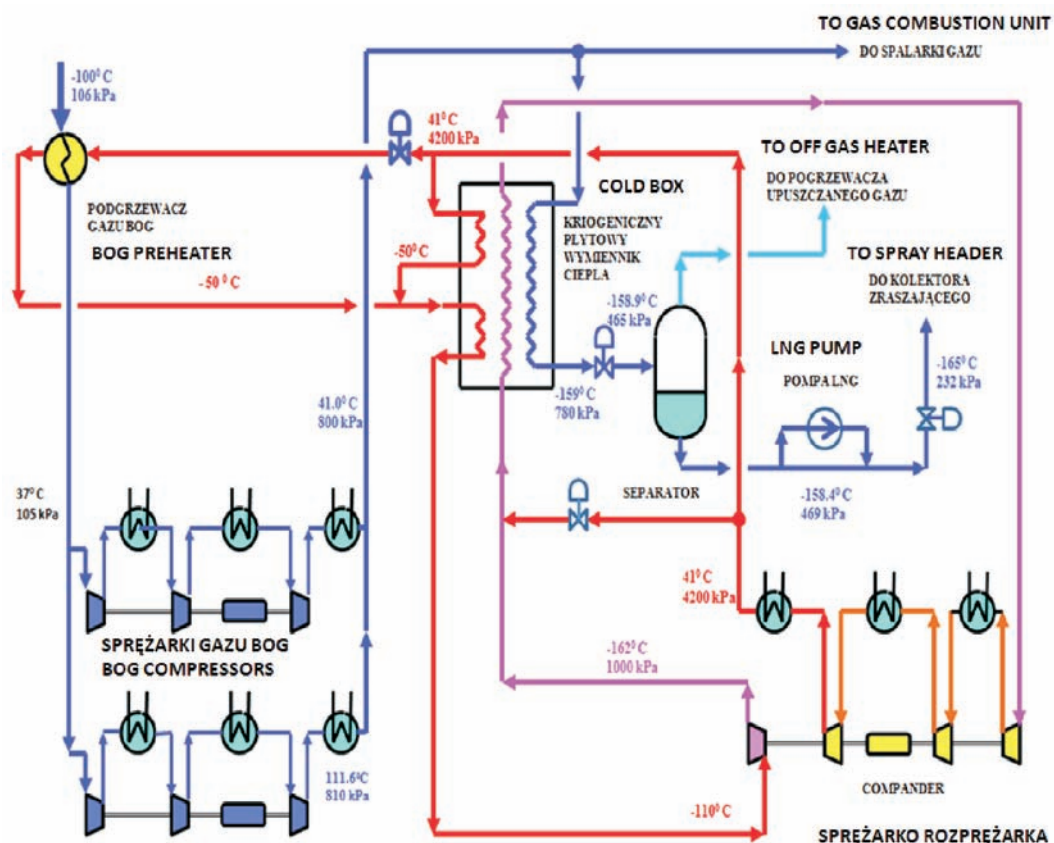
Konfigurację systemu MARK III przedstawiono na rysunku 6, a jego schemat funkcjonalny na rysunku 7.

W przypadku 100-procentowej projektowej wydajności systemu MARK III, w trzystopniowej wirowej sprężarce Comandera 90 tys. kg/h azotu o ciśnieniu 1000 kPa zostaje sprężane i schładzane w chłodnicach,

osiągając na odlocie ze sprężarki temperaturę 41°C i ciśnienie 4200 kPa. Następnie azot jest rozdzielany na dwa strumienie, z których jeden jest przetłaczany do górnej sekcji kriogenicznego wymiennika ciepła i tam wstępnie schładzany do temperatury około -50°C, a drugi – jako czynnik grzewczy, przesyłany jest przez zawór regulacji



Rys. 6. Konfiguracja systemu skraplania gazu MARK III [3]



Rys. 7. Schemat funkcjonalny systemu skraplania gazu MARK III

temperatury do podgrzewacza gazu BOG. Po przejściu przez podgrzewacz łączy się on z pierwszym strumieniem. Następnie w drugim stopniu kriogenicznego wymiennika ciepła cały azot jest finalnie schładzany do temperatury -110°C i przesyłany na rozprężarkę Compandera. Po ekspansji do ciśnienia 1000 kPa azot osiąga temperaturę -162°C i tłoczony jest do dolnej, „zimnej” sekcji kriogenicznego wymiennika ciepła. Podczas ekspansji generowana jest moc około 1000 kW, która jest dodawana

na wspólną przekładnię Compandera [9, 10]. Pozwala to na odpowiednie zmniejszenie mocy elektrycznego silnika napędzającego Compandera. Azot, przepływający przez wymiennik ciepła, powoduje skraplanie gazu BOG i jednocześnie schładza przepływający w przeciwnym kierunku azot wysokociśnieniowej części obiegu. Po przejściu przez kriogeniczny wymiennik ciepła azot o temperaturze około $39,5^{\circ}\text{C}$ i ciśnieniu 960 kPa kierowany jest na pierwszy stopień sprężarki Compandera.

Regulacja wydajności chłodniczej (N_2 Inventory System)

Regulacja wydajności chłodniczej w systemach MARK I i MARK III odbywa się na podobnej zasadzie jak w systemie EcoRel, czyli przez zmianę ilości czynnika chłodniczego krążącego w obiegu. Różnica w rozwiązaniu firmy Hamworthy polega na tym, że w układzie jest tylko jeden zbiornik azotu – w przeciwieństwie do trzech, które stosuje firma Cryostar. Za transfer azotu pomiędzy obiegiem chłodniczym a zbiornikiem odpowiadają tylko dwa zawory regulacyjne: dodający (*Make-up*) i upustowy (*Spill*). System posiada również dwie sprężarki wspomagające (*Booster Compressors*). Gdy wydajność chłodnicza ma być zmniejszona, azot z wysokociśnieniowej części obiegu jest przetłaczany do zbiornika przez regulacyjny zawór upustowy. Powoduje to zwiększenie ciśnienia w zbiorniku azotu i zmniejszenie ciśnienia w obiegu chłodniczym.

Gdy nadwyżka ciśnienia wysokociśnieniowej części obiegu w stosunku do ciśnienia w zbiorniku azotu zmaleje do 50 kPa, automatycznie zostaje załączona sprężarka wspomagająca i dalsze przetłaczanie azotu odbywa się z jej udziałem. Jeżeli ciśnienie w zbiorniku azotu osiągnie wartość 3900 kPa, a istnieje konieczność dalszego transferu azotu, to będzie on przetłaczany do drugiego, odstawionego Compandera, w którym będzie magazynowana nadwyżka azotu. Takiej opcji nie ma w systemie EcoRel. W przypadku konieczności zwiększenia wydajności chłodniczej azot ze zbiornika jest dodawany zaworem regulacyjnym (*Make-up*) do części niskociśnieniowej obiegu. Podobnie jak w układzie EcoRel, sygnałem wiodącym w systemie regulacji wydajności chłodniczej jest ciśnienie na ssaniu pierwszego stopnia sprężarki Compandera.

Wnioski

Idea zastosowania na statkach LNG systemów skraplania gazu BOG okazała się trudnym wyzwaniem dla konstruktorów. Pomimo że w lądowych zastosowaniach systemy takie pracują od dawna, statek wymagał rozwiązania zupełnie nowych problemów. Lądowe systemy skraplania gazu LNG pracują przez większość czasu ze stałym obciążeniem i praktycznie w sposób ciągły. Na statku ilość odparowywanego gazu BOG zmienia się bardzo często w zależności od warunków zewnętrznych, jak i fazy eksploatacji statku. Zupełnie w innych warunkach musi pracować system podczas podróży z ładunkiem, podróży pod balastem czy w trakcie załadunku lub wyładunku. W związku z tym, proces skraplania gazu jest zatrzymywany i restartowany średnio co kilka tygodni, w zależności od trasy statku. Może zmieniać się również skład chemiczny ładunku. Statek pływa w różnych warunkach klimatycznych i pogodowych. Częste zmiany temperatury otoczenia oraz kołysanie wprowadzają szereg dodatkowych, dynamicznych zakłóceń, nieznanymi w zastosowaniach lądowych.

Porównując systemy skraplania gazu BOG EcoRel, MARK I i MARK III, można dojść do następujących wniosków:

- Firma Cryostar zastosowała inną konfigurację systemu EcoRel, w porównaniu z rozwiązaniami firmy Hamworthy w systemach MARK I i MARK III. System EcoRel pracuje w oparciu o kilka wymienników ciepła: schładzacz (*Desuperheater*), skraplacz (*Condenser*) oraz przeciwprądowy wymiennik ciepła (N_2 Counter Current Exchanger). Systemy MARK I i MARK III wykorzystują kriogeniczny, wielostrumieniowy wymiennik ciepła zablokowany w jednym panelu z separatorem i nazywany Cold Box. Z uwagi na duże wymiary i skomplikowaną konstrukcję, ewentualna awaria tego urządzenia stworzyłaby olbrzymie problemy naprawcze. Rozdzielenie wymienników ciepła w systemie EcoRel daje w takiej sytuacji możliwość łatwiejszej i tańszej naprawy.
- Inne było podejście firm Cryostar i Hamworthy do

problemu chłodzenia sprężarki gazu BOG. System EcoRel ma chłodnicę międzystopniową sprężarki chłodzoną azotem z niskociśnieniowej części obiegu chłodniczego. System MARK III ma chłodnice międzystopniowe chłodzone wodą. Chłodzenie azotem jest efektywne i bezpieczne z punktu widzenia ewentualnej awarii chłodnicy, ale wiąże pracę sprężarki gazu BOG z pracą Compandera. Takiego powiązania w przypadku systemu MARK III nie ma, co w sytuacji awarii Compandera i konieczności bezpośredniego przetłoczenia gazu BOG do spalarki (GCU) może być korzystniejsze.

- Zastosowanie trójstopniowej wirowej sprężarki BOG w systemie MARK III, pracującej w temperaturach dodatnich, zamiast kriogenicznej dwustopniowej wirowej sprężarki instalowanej w systemie MARK I i EcoRel, pozwoliło na obniżenie kosztów i zmniejszenie wielkości instalowanej sprężarki.
- Zastosowanie w systemie MARK III chłodzenia gazu międzystopniowo i na odlocie ze sprężarki pozwoliło na:
 - odprowadzenie przez wodę chłodzącą ciepła uzyskiwanego przez gaz BOG; zastosowanie trójstopniowej wirowej sprężarki BOG w systemie MARK III pracującej w temperaturach dodatnich, zamiast kriogenicznej dwustopniowej wirowej sprężarki;

podgrzewania go w podgrzewaczu przed wlotem do kompresora,

- odprowadzenie przez wodę chłodzącą ciepła powstającego w wyniku sprężania gazu w poszczególnych stopniach sprężarki BOG.
- Sprężarka trójstopniowa pozwoliła na uzyskanie na tłoczeniu wyższych ciśnień gazu BOG (800 kPa) w porównaniu z ciśnieniem (450 kPa) wytwarzanym przez sprężarkę stosowaną w systemie MARK I. Dało to możliwość przeprowadzania kondensacji gazu BOG przy wyższym ciśnieniu i temperaturze.
- Zastosowanie chłodzenia gazu BOG w procesie sprężania oraz skraplanie go przy wyższych ciśnieniach i temperaturze zmniejszyło zapotrzebowanie mocy systemu o około 15%.
- Podwyższenie wartości ciśnienia i temperatury gazu BOG w systemie MARK III pozwalało na łatwiejszą i bardziej stabilną regulację prawidłowej temperatury azotu na odlocie z rozprężarki Compandera. Utrzymanie tej temperatury kondensacji azotu zapobiega tworzeniu się frakcji ciekłej czynnika chłodniczego i jest warunkiem gwarantującym bezpieczną pracę Compandera. W rozwiązaniu MARK I stabilizacja parametrów azotu powyżej punktu skraplania azotu sprawiała dużo problemów.

Objaśnienia nazw i skrótów

BOG (<i>Boil Off Gas</i>)	– gaz odparowany w zbiornikach statku z ładunku
BOG Compressor	– wirowa sprężarka gazu BOG
BOG Condenser	– skraplacz gazu BOG
BOG Desuperheater	– schładzacz gazu BOG
BOG Precooler	– chłodnica wstępnego schładzania gazu BOG
BOG Preheater	– podgrzewacz gazu BOG
Cargo Tank	– zbiornik ładunkowy statku
Compander (Compressor/Expander)	– sprężarko-rozprężarka (zespół trójstopniowej wirowej sprężarki i turbinowej rozprężarki zabudowany na wspólnej przekładni)
LNG Booster Pump	– pompa skroplonego gazu BOG
LNG (<i>Liquefied Natural Gas</i>)	– skroplony gaz ziemny
Plate-fin Cryogenic Heat Exchanger (Cold Box)	– płytowy kriogeniczny wymiennik ciepła
Phase Separator	– separator
N ₂ Booster Compressor	– wspomagająca sprężarka azotu
N ₂ Counter Current Heat Exchanger	– przeciuprądowy wymiennik ciepła w obiegu azotu
N ₂ Coolers	– chłodnice azotu
Nitrogen Reservoir	– zbiornik azotu

Literatura

- [1] ABS Pacific Division, 2006, ABS Gas Carrier Course.
- [2] Anderson T.N., Erhardt M.E., Foglesang R.E., Bolton T., Jones D., Richardson A.: *Shipboard reliquefaction for large LNG carriers*. Proceedings of the 1st Annual Gas Processing Symposium. Elsevier 2009.
- [3] Cryostar, 2007, The Cryostar Magazine, Issue No. 10. Available from www.cryostar.com
- [4] Gerdsmeyer K.D.: *On-board Reliquefaction for LNG ships*. Tractebel Gas Engineering, 10th Symposium, June 2005.
- [5] Hamworthy Gas Systems, 2008, LNG Systems for Marine Application. Available from www.hamworthy.com
- [6] Ishimaru O., Kiyokazu Kawabata, Hidetoshi Morita, Hidetomi Ikkai, Yoshihiro Suetake: *Building of advanced large sized Membrane type LNG carrier*. Mitsubishi Heavy Industries Ltd., „Technical Review”, vol. 41, No. 6, December 2004.
- [7] Richardson A.J., AL-Sulaiti A.: *Construction and performance of the world's largest ships*. „Gastech”, Bangkok, March 2008.
- [8] Yoneyama H., Irie T., Hatanaka, N.: *The first BOG reliquefaction system on board ship in the world*. LNG Jamal, World Gas Conference 2003.
- [9] Hamworthy Gas System; FPSO International; Efficient Liquefaction process for floating LNG, Oslo March 2009.
- [10] Atlas Copco Gas & Process Division, 320955 Turboexpanders for Cryogenic, January 2006.



Marek MATYSZCZAK – absolwent Wydziału Budowy Maszyn i Okrętów Politechniki Szczecińskiej. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał na Politechnice Wrocławskiej w roku 1980. Specjalizuje się w automatyce okrętowej. W latach 2006–2009 był zatrudniony przez firmę QATAR-GAS w projekcie budowy statków LNG typu QMAX i QFLEX.