

Cezary Behrendt, Andrzej Adamkiewicz
Akademia Morska w Szczecinie

Układy energetyczne statków typu LNG

Wstęp

Rosnące zapotrzebowanie na gaz ziemny coraz częściej stymuluje jego transport drogą morską, a tym samym wzrost produkcji gazowców LNG. Światowy handel LNG jest oparty praktycznie wyłącznie na gazie transportowanym drogą morską. Od roku 2000 zbudowano bądź rozpoczęto budowę około 300 jednostek tego typu [3]. Według raportu [10] opublikowanego w 2008 r. ilość transportowanego gazu ma wzrosnąć o 180% do roku 2020 i o 250% do roku 2030. Stwarza to dobre perspektywy dla rozwoju światowej floty gazowców do przewozu LNG. Liderami na rynku budowy gazowców LNG są stocznie w Korei Płd. i Japonii. W krajach tych zbudowano dotychczas najwięcej statków – wymienione państwa posiadają również największy portfel zamówień. W tabelicy 1 przedstawiono zestawienie liczby zbudowanych gazowców LNG od roku 2000.

Tabelica 1. Gazowce zbudowane od roku 2000 oraz znajdujące się w budowie [3–4]

Stocznia, kraj	Liczba statków	Udział w rynku [%]
Daewoo, Korea Płd.	84	28,09
Samsung, Korea Płd.	83	27,76
Hyundai, Korea Płd.	36	12,04
Mitsubishi, Japonia	30	10,04
Kawasaki, Japonia	20	6,68
Mitsui, Japonia	7	2,34
Hudong-Zhonghua, Chiny	6	2,02
Inne	33	11,03
Łącznie	299	

Łącznie najwięcej statków zbudowano dotychczas w krajach Dalekiego Wschodu (Korea – 67,89%, Japonia – 19,06%, Chiny – 2,02% udziału w rynku). Stocznie europejskie, które były prekursorami technologii transportu

LNG drogą morską oraz potentatami budowy gazowców LNG w latach 70. i 80. ubiegłego wieku, obecnie – przede wszystkim ze względu na wysokie koszty robocizny – produkują niewiele statków tego rodzaju (głównie stocznie w Hiszpanii i Francji). Jednakże doświadczenia stoczni europejskich są wykorzystywane i np. stocznia francuska Chantiers de L’Atlantique została wybrana jako partner i konsultant techniczny chińskiej stoczni Hudong-Zhonghua (wymienionej w tabelicy 1) przy wdrażaniu technologii i uruchamianiu produkcji gazowców LNG. W najbliższym czasie należy liczyć się ze wzrostem produkcji tego typu statków w stoczniach chińskich. Jedyną polską stocznia, która zbudowała w 2009 r. statek do przewozu gazu, jest Stocznia Północna w Gdańsku. Gazowiec ten to niewielka jednostka o ładowności LPG wynoszącej 7500 m³.

Gazowce LNG są budowane w 4 grupach klasyfikowanych według ładowności gazu LNG. W tabelicy 2 przedstawiono ich podstawowe dane techniczno-eksploatacyjne.

Do roku 2000 w głównych układach napędowych gazowców LNG, jak i do napędu mechanizmów pomocniczych (prądnic i pomp) stosowano przede wszystkim turbiny parowe. Spowodowane to było koniecznością zagospodarowania podczas podróży odparowującego ładunku, który był stosowany jako paliwo w głównych kotłach parowych. Podczas pływania pod balastem kotły były zasilane ropopochodnym paliwem płynnym.

Okrętowe siłownie turboparowe charakteryzują się niską sprawnością, w zakresie od 31% do 38%, zależnie od parametrów pary zasilającej turbinę oraz zastosowanych sposobów zwiększania sprawności (karnotyzacja obiegu). Biorąc pod uwagę przepisy ochrony środowiska ograniczające emisję szkodliwych składników spalin oraz efekty ekonomiczne związane ze stosunkowo dużą ilością spalnego paliwa, do napędu gazowców LNG opraco-

Tablica 2. Podstawowe dane techniczno-eksploatacyjne gazowców LNG [3]

Grupa	Klasa	Nośność DWT [t]	Ładowność LNG [m ³]	Długość [m]	Moc napędu [kW]	Prędkość [węzły]	Cena [mln USD]
I	Małe gazowce	2 000÷40 000	2500÷75 000	86÷220	2 000÷15 000	13÷17,5	20÷80
II	Duże gazowce	80 000÷90 000	140 000÷165 000	270÷285	25 000÷34 000	19÷21	140÷190
III	Q-Flex	122 000÷130 000	200 000÷260 000	315÷350	37 000÷43 000	19÷21	240÷285
IV	Q-Max	powyżej 130 000	powyżej 260 000	powyżej 350	powyżej 43 000	19÷21	powyżej 285

wano i zastosowano rozwiązania układów napędowych alternatywnych dla turboparowych, zapewniające wyższą sprawność (międzystopniowe przegrzewanie pary, podgrzewanie wody zasilającej) i zmniejszenie emisji szkodliwych składników spalin.

W artykule poddano analizie możliwe do zastosowania

na gazowcach LNG układy napędowe, w których w charakterze silników napędu głównego występują cieplne maszyny wirnikowe (turbiny parowe i gazowe), maszyny tłokowe (spalinowe silniki wysokoprężne wolno- i średnioobrotowe), maszyny (silniki) elektryczne oraz ich różne konfiguracje (*diesel-electric*, COGAS).

Paliwa stosowane w układach energetycznych gazowców LNG

Paliwa ropopochodne

Paliwa ropopochodne stosowane we flocie noszą nazwę paliw żeglugowych, a ich właściwości określa norma ISO 8217, wyróżniająca dwa rodzaje paliw: destylacyjne DM i pozostałościowe RM. Podstawowym kryterium przynależności do odpowiedniej grupy paliw DM (X, A, B, C) oraz pozostałościowych RM (A÷K) jest wartość gęstości i lepkości. Paliwa DM otrzymywane są w procesach zachowawczych przeróbki ropy naftowej; mogą zawierać komponenty procesów destrukcyjnych ropy naftowej, np. krakingu katalitycznego.

Paliwa RM komponowane są z pozostałości po destylacji zachowawczej ropy naftowej i mogą zawierać pozostałości pokrakingowe. Charakteryzują się one wysokimi wartościami lepkości i gęstości, wysoką zawartością siarki, wody oraz dużą ilością zanieczyszczeń. Wartość opałowa paliw żeglugowych może zmieniać się w zakresie od 39,0 MJ/kg do 43,0 MJ/kg. Podstawowe wartości właściwości fizykochemicznych standardowych paliw żeglugowych typu DM i RM przedstawiono w tablicy 3.

Współczesne okrętowe wysokoprężne wolno- i średnioobrotowe silniki spalinowe są przystosowane do spalania paliw pozostałościowych RM. Paliwa destylacyjne DM są używane podczas uruchamiania i wyłączenia z ruchu silników oraz ich eksploatacji w strefach specjalnych (np. porty w rejonie Morza Bałtyckiego). Paliwa żeglugowe, ze względu na konieczność uzyskania odpowiedniej czystości, muszą być poddawane na statkach procesom oczyszczania, poprzez sedimentację w zbiornikach osadowych, usunięcie wody w wirówkach puryfikacjach, usunięcie zanieczyszczeń stałych w wirówkach klasyfikatorach oraz filtrowanie. Ze względu na konieczność utrzymania wymaganej lepkości paliwa, a zwłaszcza paliwa RM, muszą być podgrzewane w czasie przechowywania w zbiornikach zapasowych, przepompowywania, oczyszczania w zbiornikach osadowych, wirówkach i filtrach, szczególnie przed dostarczeniem do komory spalania silnika lub komory paleniskowej kotła, co warunkuje ich prawidłowe rozpylenie i spalanie.

W instalacjach paliwowych okrętowych kotłów parowych, głównych i pomocniczych, o dużych wydajnościach,

Tablica 3. Podstawowe wartości właściwości fizykochemicznych paliw typu DM i RM [6]

Rodzaj paliwa	Gęstość w 15°C [kg/m ³]		Lepkość mm ² /s w 40°C [DM] w 50°C [RM]		Zawartość wody [%]		Zawartość siarki [%]		Osady [%]	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
DM (X, A÷C)	890,0	920,0	1,4	14,0	0	0,30	1,0	2,0	0	0,10
RM (A÷K)	960,0	1010,0	30	700	0	0,50	3,5	4,5	0	0,10

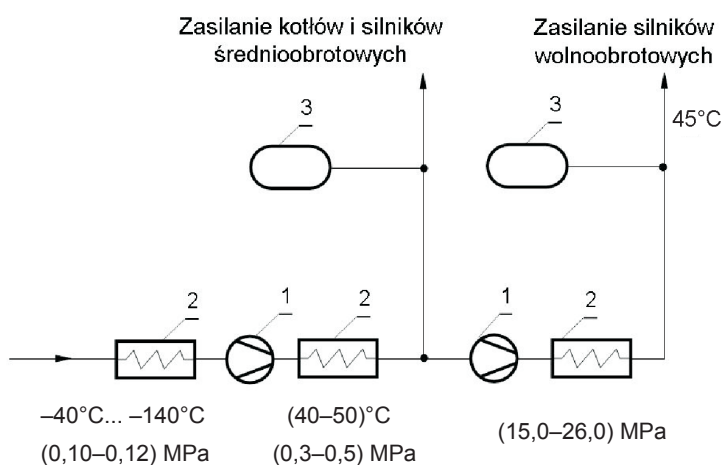
w celu polepszenia jakości rozpylania paliwa ciekłego stosowane są palniki kotłowe ze wspomaganiami rozpylania parą wodną, dopływającą pod ciśnieniem $0,6 \div 1,0$ MPa. Dotyczy to w szczególności kotłów zasilanych paliwem RM o lepkości powyżej $380 \text{ mm}^2/\text{s}$.

W układach paliwowych silników spalinowych i kotłów okrętowych coraz częściej funkcjonują homogenizatory, których zadaniem jest rozbić zanieczyszczenia i kropel wody. Powstająca w ten sposób jednorodna struktura paliwa, w której średnica rozbitych cząstek zanieczyszczeń i kropel wody mieści się w granicach $5 \div 10 \text{ }\mu\text{m}$, poprawia jakość rozpylania, a tym samym spalania.

Gazy LNG

Przewożony ładunek, jakim jest gaz LNG, może być paliwem zasilającym silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym i kotły główne. Gaz przeznaczony do spalania powstaje w wyniku naturalnych procesów parowania, a jego ilość zależy głównie od temperatury otoczenia i energii promieniowania słonecznego. Aby uzyskać niezbędną, stałą ilość paliwa gazowego, stosuje się instalacje wzmożonego parowania wykorzystujące przewożony gaz skroplony. Schemat podstawowej instalacji zasilania gazem silników wolnoobrotowych przedstawiono na rysunku 1. Instalacja ta składa się z dwóch części: nisko- i wysokociśnieniowej. Sprężarka w części niskociśnieniowej spręża gaz o parametrach, jakie ten posiada w zbiornikach ładunkowych, do ciśnienia w granicach $0,3 \div 0,5$ MPa. Gaz o takim ciśnieniu i temperaturze $40 \div 50^\circ\text{C}$ uzyskanej w wymienniku

ciepła jest kierowany do zasilania kotłów i silników średnioobrotowych. Sprężarka części wysokociśnieniowej spręża gaz do ciśnienia $5,0 \div 26,0$ MPa. Po schłodzeniu w wymienniku ciepła do temperatury 45°C jest on kierowany do zasilania silników wolnoobrotowych, wyposażonych w instalację *common rail*. W instalacji zasilania gazem montowane są filtry siatkowe o średnicy oczek $5 \text{ }\mu\text{m}$, zapewniające oczyszczenie gazu z zanieczyszczeń stałych, oraz zbiorniki spełniające rolę stabilizatorów ciśnienia, zapobiegające nagłym zmianom ciśnienia w instalacji. Rury w instalacjach zasilania gazem mogą być wykonane jako jedno- lub dwucienne, wentylowane podciśnieniowo powietrzem. Ze względu na konieczność zapewnienia bezpieczeństwa pracy, w instalacjach umieszczone są zawory regulujące ciśnienie, zawory odcinające, bezpieczeństwa oraz odpowietrzające.



Rys. 1. Uproszczony schemat instalacji zasilania gazem kotłów i silników okrętowych

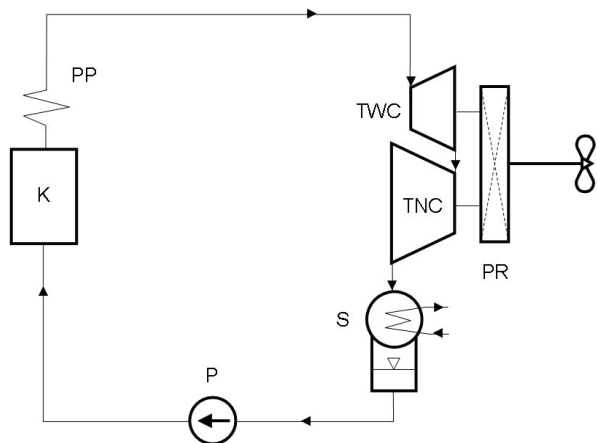
1 – sprężarka, 2 – wymiennik ciepła, 3 – zbiornik stabilizujący ciśnienie

Napędy turboparowe

Obiegiem porównawczym siłowni parowej jest obieg Clausiusa-Rankine'a. Na rysunku 2 przedstawiono schemat najprostszego rozwiązania siłowni turboparowej.

Sprawność siłowni turboparowej zależy od parametrów pary, realizowanego schematu obiegu cieplnego oraz mocy turbiny. W przypadku najprostszych rozwiązań turbiny napędu głównego mieszczą się w następujących zakresach: ciśnienie $p = 0,60 \div 0,65$ MPa, temperatura pary przegrzanej $t = 510 \div 515^\circ\text{C}$. Dla tych parametrów pary możliwa do osiągnięcia sprawność siłowni mieści się w granicach $31 \div 34\%$ dla mocy turbin napędu głównego od 20 MW do 70 MW. Dążenie do podwyższenia sprawności turboparowych siłowni okrętowych wymaga podjęcia określonych działań. Są to:

- **Podwyższenie parametrów pary.** Granicznymi temperaturami pary pozwalającymi na stosowanie relatywnie tańszych materiałów konstrukcyjnych na łopatki turbin, rury kotłowe oraz przewody parowe, tj. stali ferrytycznych, są temperatury poniżej 540°C . Temperatury powyżej tej wartości wymagają stosowania znacznie droższych stali austenitycznych. We współczesnych okrętowych siłowniach turboparowych temperatura pary nie przekracza 600°C [3, 6, 7, 8]. Ciśnienie pary używanej do zasilania turbin parowych napędu głównego w najnowszych układach napędowych osiąga wartość $13,0 \div 16,5$ MPa. Stosowanie coraz wyższych ciśnień powoduje konieczność instalowania turbin trójkadłubowych.



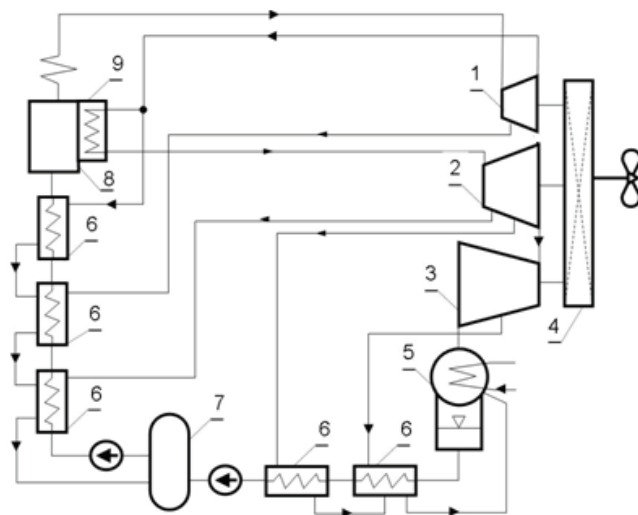
Rys. 2. Schemat najprostszego układu okrętowej siłowni turboparowej

K – kocioł parowy, TWC – turbina wysokiego ciśnienia, TNC – turbina niskiego ciśnienia, S – skraplacz, P – pompa, PP – przegrzewacz pary, PR – przekładnia redukcyjna

- **Międzystopniowe przegrzewanie pary.** Rozwiązanie takie wymaga instalacji w kotle dodatkowej sekcji przegrzewacza pary. Wartość temperatury przegrzewu wtórnego jest równa temperaturze przegrzewu początkowego i do jej uzyskania często instalowane są dodatkowe palniki kotłowe. W turbinach trójkadłubowych do przegrzewu wtórnego kierowana jest para opuszczająca turbinę wysokiego ciśnienia.
- **Regeneracyjne podgrzewanie wody zasilającej kocioł główny.** Para upuszczona z turbin jest wykorzystywana w podgrzewaczach regeneracyjnych. Ponieważ bezwzględne przyrosty sprawności obiegu maleją wraz ze wzrostem liczby upustów, a równocześnie rosną koszty inwestycyjne, stopień komplikacji instalacji oraz obsługi, to we współczesnych siłowniach turboparowych liczba podgrzewaczy regeneracyjnych nie przekracza pięciu. Osiągana temperatura

wody zasilającej kocioł mieści się w granicach od 200°C do 250°C.

Mając na uwadze metody podwyższania sprawności, moc turbin napędu głównego oraz wyniki analizy termodynamicznej, konfiguracje okrętowych siłowni turboparowych stanowią kombinację tych czynników. Przykład układu siłowni turboparowej współczesnego gazowca LPG przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat przykładowego układu okrętowej siłowni turboparowej gazowca LNG

1 – turbina wysokiego ciśnienia, 2 – turbina średniego ciśnienia, 3 – turbina niskiego ciśnienia, 4 – przekładnia redukcyjna, 5 – skraplacz, 6 – wymiennik ciepła, 7 – odgazowywacz, 8 – kocioł, 9 – wewnętrzny przegrzewacz pary

W układzie przedstawionym na rysunku 3 zastosowano międzystopniowe przegrzewanie pary oraz pięć regeneracyjnych wymienników ciepła do podgrzewania wody zasilającej. Wówczas uzyskiwane sprawności turbozespołów parowych wzrastają do 37–40%, a jednostkowe zużycie paliwa zmienia się w przedziale od 225 g/kWh do 280 g/kWh [1, 2, 9].

Napędy turbospalinowe

Turbozespoły spalinowe znalazły również zastosowanie w napędach głównych gazowców LNG.

Turbozespoły spalinowe jednowirnikowe, w których sprężarka powietrza i turbina spalinowa tworzą jeden wspólny zespół wirnikowy, uzyskują optymalne parametry pracy przy stałej, projektowej prędkości obrotowej. Dlatego też nie są one wykorzystywane do bezpośredniego napędu śruby przy zmiennej prędkości obrotowej $n = var$. Do napędu bezpośredniego mogą być stosowane turbozespoły spalinowe wielowirnikowe (dwu- i trójwirnikowe) z oddzielną turbiną napędową [2].

Do zasilania turbozespołów spalinowych wykorzystywany jest przewożony ładunek – gaz LNG lub/i paliwo płynne. Sprawność turbozespołów spalinowych może osiągać wartości 25÷33% [1, 2, 9].

Charakteryzują się one zwartą, modułową budową, znaczne zmniejszającą charakterystyki masowo-gabarytowe siłowni. Jednakże ze względu na wysoką temperaturę spalin wylotowych (400÷500°C), stosunkowo niską sprawność i niewykorzystanie ciepła odpadowego spalin, turbozespoły te nie znalazły praktycznego zastosowania jako samodzielne jednostki napędu głównego gazowców LNG.

Turbinowe silniki spalinowe występują natomiast w kombinowanych układach napędowych COGAS (*Combined Gas and Steam*), składających się z turbozespołów spalinowych

i parowych. Para zasilająca turbinę parową jest wytwarzana w kotłach utylizacyjnych wykorzystujących ciepło odpadowe spalin wylotowych turbozespołów spalinowych.

Napędy z tłokowymi silnikami spalinowymi

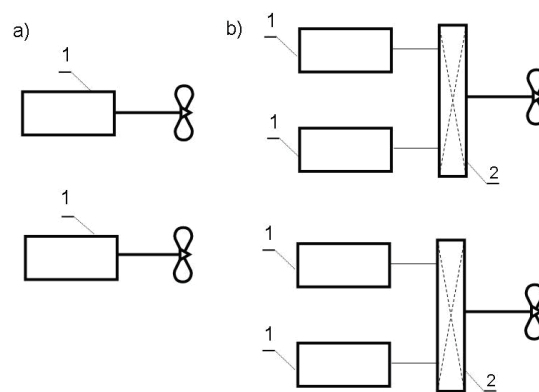
Czołowi producenci silników okrętowych, takie firmy jak: MAN B&W, Wärtsilä i Caterpillar, produkują silniki napędu głównego, które mogą być zasilane alternatywnie paliwem płynnym i/lub gazowym. Instalacje paliwowe silników dwupaliwowych składają się z dwóch układów: układu paliwa płynnego i gazowego.

Układ paliwa płynnego niczym nie różni się od układu paliwowego silników jednopaliwowych. Różnice w konstrukcji układu paliwa gazowego są konsekwencją rodzaju silnika.

Silniki wolnoobrotowe, np. firmy MAN serii ME-GI, wykorzystują paliwo gazowe pod wysokim ciśnieniem 25÷30 MPa. Sprężony gaz znajduje się w kolektorze, z którego doprowadzany jest do zainstalowanych w poszczególnych głowicach wtryskiwaczy gazowych. Z uwagi na właściwości gazu jego ciśnienie nie inicjuje otwarcia iglicy wtryskiwacza. Proces otwierania i zamykania dopływu gazu do komory spalania odbywa się za pomocą oleju hydraulicznego poprzez wmontowane, kontrolowane elektronicznie zawory sterujące czasem wtrysku gazu.

W przypadku silników średnioobrotowych różnica w budowie układu paliwa gazowego w porównaniu z silnikami wolnoobrotowymi polega na znacznie niższym ciśnieniu gazu w kolektorze zasilającym, które jest rzędu 0,4÷0,5 MPa, oraz zainstalowaniu wtryskiwaczy gazu w przewodach dolotu powietrza do każdego cylindra. Wtrysk gazu do strumienia powietrza doprowadzonego do komory spalania zapewnia powstanie mieszanki palnej. Na rysunku 4 przedstawiono schematy przykładowych układów napędowych z silnikami wolno- i średnioobrotowymi zasilanymi paliwem płynnym i gazowym.

Cechą charakterystyczną omawianych układów napędowych, przedstawionych na rysunku 4, jest zastosowanie dwóch śrub napędowych. Jest to związane z koniecznością zapewnienia możliwości manewrowania statkiem w przypadku awarii jednego z silników napędzających śrubę. Wymóg ten jest stawiany statkom, dla których utrata napędu może powodować szczególne zagrożenie bezpieczeństwa żeglugi. W przypadku zastosowania silników średnioobrotowych ich liczba wynosi najczęściej 4, ze względu na stosunkowo niską moc pojedynczego silnika (do 20 000 kW). Podczas pracy silników przy zasilaniu paliwem gazowym wymagana jest dawka pilotująca paliwa płynnego, której wtrysk do komory spalania tworzy warunki zapłonu mieszaniny powietrzno-gazowej. Zapewnienie ciągłego dostarczania do silnika wymaganej ilości gazu LNG jest często związane z koniecznością stosowania układu wzmożonego parowania gazu.



Rys. 4. Układy napędowe gazowców z silnikami: a) wolnoobrotowymi, b) średnioobrotowymi

1 – tłokowy silnik spalinowy, 2 – przekładnia redukcyjna

Napędy elektryczne

Konfigurację dwóch podstawowych układów napędowych, w których w charakterze maszyn napędu głównego zastosowano silniki elektryczne, przedstawiono na rysunku 5. W obydwu układach napędowych do napędu prądnic w zespołach prądotwórczych wykorzystywane są najczęściej średnioobrotowe dwupaliwowe silniki spalinowe, a tylko sporadycznie – turbozespoły spalinowe.

Wytworzona energia elektryczna dostarczana jest do

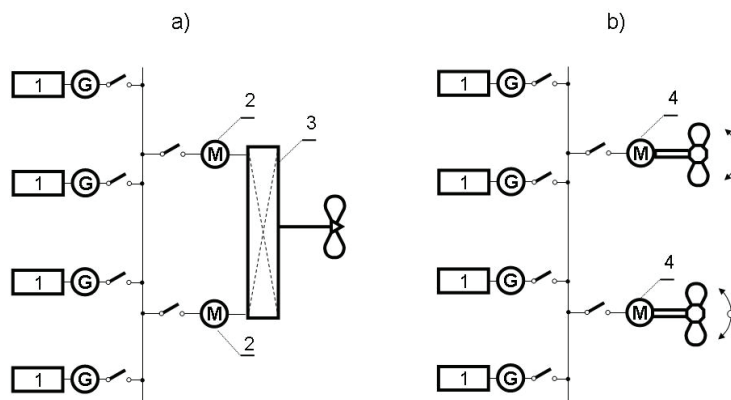
silników elektrycznych napędu głównego, które poprzez przekładnię mechaniczną napędzają śrubę okrętową (wariant „a”). W przypadku wariantu „b”, przedstawionego na rysunku 5b, do napędu statku zastosowano pędniki gondolowe, zawierające w jednej obudowie silnik elektryczny, przekładnię redukcyjną i śrubę napędową.

Zastosowanie pędników gondolowych z możliwością ich obrotu o 360° umożliwia rezygnację z zastosowania

steru i znacznie poprawia własności manewrowe statku.

W elektrycznych układach napędowych zespoły prądotwórcze można rozmieścić w dowolnie wybranym miejscu części rufowej statku i tym samym znacznie zmniejszyć powierzchnię siłowni okrętowej, powodując szacunkowy wzrost nośności statku do 3%.

W przypadku zastosowania pędników gondolowych mocowanych do zewnętrznego poszycia kadłuba klasyczne rozwiązanie siłowni okrętowej i jej usytuowanie w kadłubie poniżej linii wodnej staje się zbyt ciężkie.



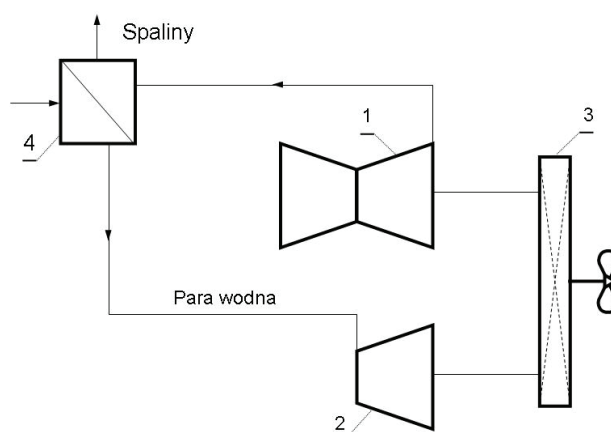
Rys. 5. Układ napędowy gazowców LNG z: a) silnikami elektrycznymi, b) elektrycznymi pędnikami gondolowymi

1 – zespół prądotwórczy, 2 – silnik elektryczny, 3 – przekładnia redukcyjna, 4 – pędnik gondolowy

Napęd kombinowany

Na gazowcach LNG zastosowanie znalazł również kombinowany gazowo-parowy układ napędowy COGAS, poprawiający efektywność energetyczną napędu w porównaniu z układem pracującym według obiegu prostego. Uproszczony schemat przykładowego układu kombinowanego przedstawiono na rysunku 6.

Proponowany układ COGAS charakteryzuje się dużym stopniem złożoności rozwiązania i obsługi. Rozruch odbywa się z wykorzystaniem jedynie turbosespołu spalinowego. Z chwilą uzyskania niezbędnego strumienia spalin uruchomiony zostaje kocioł utylizacyjny, a wyprodukowana para wodna umożliwia rozruch i włączenie do pracy turbiny parowej.



Rys. 6. Uproszczony schemat kombinowanego układu napędowego COGAS gazowców LNG

1 – turbosespół spalinowy, 2 – turbosespół parowy, 3 – przekładnia redukcyjna, 4 – utylizacyjny kocioł parowy

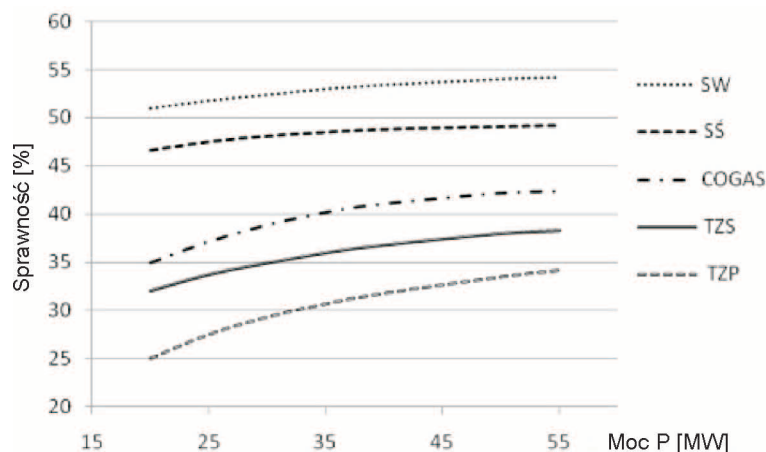
Ocena rozwiązań układów napędowych

Jednym z podstawowych kryteriów oceny jakości przetwarzania energii są sprawności efektywne poszczególnych rodzajów układów napędowych oraz stopień spełniania wymagań wynikających z konieczności ochrony środowiska morskiego. Na rysunku 7 przedstawiono obliczone sprawności analizowanych układów napędowych gazowców w funkcji mocy efektywnej silników napędu głównego.

Obliczenia wykazują najwyższe sprawności układów z tłokowymi maszynami napędu głównego. Przy zastosowaniu silników spalinowych o zapłonie samoczynnym sprawności sięgające nawet 55% są uzyskiwane przy odzysku ciepła odpadowego spalin wylotowych z silników

(wytwarzanie pary) oraz ciepła odpadowego zawartego w wodzie chłodzącej (podgrzewanie mediów, wytwarzanie wody słodkiej). Dla armatorów bardzo ważnym kryterium wyboru rodzaju układu napędowego są koszty jego eksploatacji (zużywanego paliwa) oraz koszty załogi, zależne od kwalifikacji.

Charakterystyczną cechą eksploatacji układów napędowych gazowców z turbinami parowymi jest możliwość spalania w komorze paleniskowej kotła jednocześnie paliwa płynnego i gazowego w dowolnych proporcjach. Pozwala to na zasilanie kotłów paliwem powstałym wyłącznie podczas parowania naturalnego.



Rys. 7. Sprawność układów napędowych gazowców LNG w funkcji mocy [5]

SW – silnik wolnoobrotowy o zapłonie samoczynnym, SŚ – silnik średnioobrotowy o zapłonie samoczynnym, COGAS – kombinowany układ gazowo-parowy, TZS – turbozespół spalinowy, TZP – turbozespół parowy

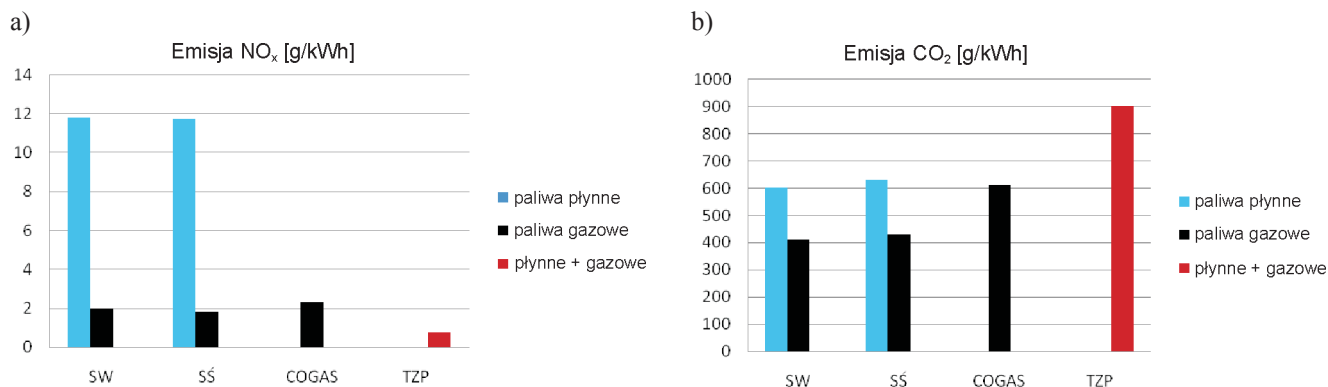
Spośród rozpatrywanych układów relatywnie najtańsze w eksploatacji są turboparowe zespoły napędowe. Pomimo niskiej sprawności, a co się z tym wiąże – konieczności spalania największej ilości paliwa, jego koszt ma mniejsze znaczenie, ponieważ w kotłach okrętowych można spalać najgorsze i najtańsze gatunki płynnych paliw żeglugowych.

Wadą układów turboparowych jest konieczność ich obsługi przez załogę o najwyższych kwalifikacjach, a tym samym o wysokich kosztach utrzymania.

W związku z coraz bardziej rygorystycznymi przepisami ochrony środowiska bardzo ważnym kryterium jest poziom emisji szkodliwych składników spalin. Na rysunku 8 przedstawiono wartości emisji tlenków azotu NO_x (rysunek 8a) i ditlenku węgla CO_2 (rysunek 8b) dla rozpatrywanych rodzajów układów napędowych.

Najniższej emisji tlenków azotu i najwyższej ditlenku węgla można oczekiwać przy eksploatacji turboparowych układów napędowych. Należy podkreślić zaletę paliwa gazowego jako najbardziej ekologicznego. W przypadku silników spalinowych emisja tlenków azotu zmniejsza się około sześciokrotnie, a dwutlenku węgla o ok.

30% przy zasilaniu silników gazem LNG. Silniki tłokowe, zarówno wolno-, jak i średnioobrotowe, są zasilane gazem, co w większości przypadków oznacza konieczność stosowania instalacji wzmoczonego parowania gazu, w celu zapewnienia jego odpowiedniej ilości. Jest to wada związana z utratą części przewożonego ładunku.



Rys. 8. Emisja tlenków azotu NO_x i ditlenku węgla CO_2 z analizowanych układów napędowych [11]

SW – silnik o zapłonie samoczynnym wolnoobrotowy, SŚ – silnik o zapłonie samoczynnym średnioobrotowy, COGAS – kombinowany turbinowy układ gazowo-parowy, TZP – turbozespół parowy

Podsumowanie

Dynamiczny wzrost liczebności współcześnie eksploatowanych i budowanych gazowców oraz wzrost portfela zamówień stymuluje rozwój rozwiązań konstrukcyjnych układów napędowych tych jednostek.

W większości przypadków turboparowe układy napędowe osiągają najniższe sprawności, nieprzekraczające 38%. Jak wykazano, możliwa do osiągnięcia sprawność turboparowego układu napędowego może wynosić 40%,

jednakże jest to związane z koniecznością stosowania pary o wysokich parametrach oraz skomplikowanych technicznie układów (przegrzew międzystopniowy pary i upusty regeneracyjne), co powoduje wzrost kosztów inwestycji.

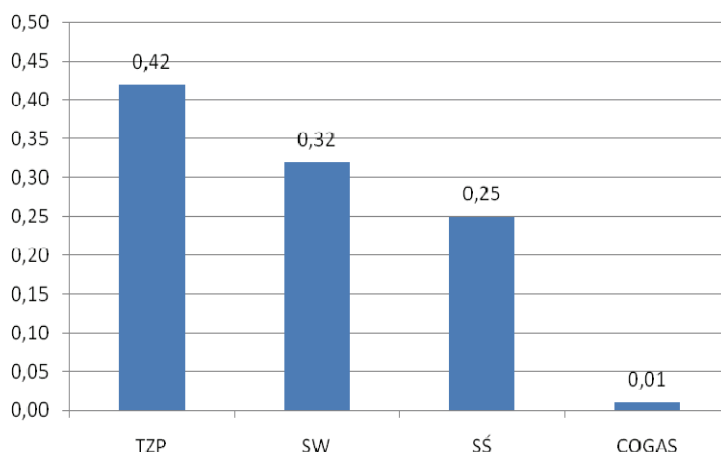
Pomimo dużej niezawodności i prostoty utrzymania turbin parowych spośród rozpatrywanych układów, większość obsług musi być wykonywana przez serwis producenta. Nie wykorzystany jest wówczas potencjał wysoko kwalifikowa-

nego personelu siłowni turboparowej. W przypadku awarii układów napędowych z tłokowymi silnikami spalinowymi załoga maszynowa jest w stanie wykonać większość napraw i czynności obsługowych we własnym zakresie. Koszty załogowe są niższe, gdyż nie są wymagane wysokie kwalifikacje, wykraczające poza typowy zakres obsługi silników tłokowych opalanych paliwem ciekłym.

Na podstawie dostępnych danych [3, 4, 10] dotyczących rodzaju napędu na eksploatowanych gazowcach LNG sporządzono procentowe udziały poszczególnych układów napędowych stosowanych na tego typu jednostkach (rysunek 9).

Największy, 42-procentowy udział mają napędy turboparowe, najliczniej budowane do roku 2007. Od połowy pierwszego dziesięciolecia XXI w. coraz częściej w napędach gazowców stosowane są dwupaliwowe silniki wolno- i średnioobrotowe. 25-procentowy udział mają napędy z silnikami średnioobrotowymi, reszta to napęd bezpośredni i elektryczny.

Analiza statków zbudowanych po roku 2007 i zamówionych w stocznicach wskazuje na coraz mniejsze za-



Rys. 9. Udział rozwiązań napędu głównego stosowanych na statkach LNG [3, 4, 10]

TYP – turbospół parowy, SW – silnik o zapłonie samoczynnym wolnoobrotowy, ŚŚ – silnik o zapłonie samoczynnym średnioobrotowy, COGAS – kombinowany turbinowy układ gazowo-parowy

interesowanie turboparowymi układami napędowymi, natomiast rośnie liczba rozwiązań układów napędowych z tłokowymi silnikami średnioobrotowymi dwupaliwowymi oraz napędami elektrycznymi.

Literatura

[1] Dimopoulos G., Frangopoulos Ch.: *Thermodynamic Simulation of Marine Energy Systems for a LNG Carrier*. „International Journal of Thermodynamics” 2008, vol. 11, no. 4.

[2] Kosowski K.: *Ship turbine power plants*. Gdańsk, Wydawnictwo Fundacji Promocji Przemysłu Okrętowego, 2005.

[3] Lloyd’s Register – Fairplay Sea Web.

[4] „LNG World Shipping” 2007, Nov/Dec.

[5] MAN B&W, <http://www.manbw.com>, dostęp: wrzesień 2011 r.

[6] Norma ISO 8217/2005.

[7] Numaguchi H., Ishida T.: *Japan’s First Dual-Fuel Diesel-Electric Propulsion LNG Carrier*. „Mitsubishi Heavy Industry Technical Review” 2009, vol. 46, no. 1.

[8] Patel M., Nath N.: *Improve steam turbine efficiency*. „Hydrocarbon Processing” 2000, June.

[9] Samkhan I.: *On Thermodynamic Aspects of the Efficient Power Engineering*. „The Open Fuels & Energy Science Journal” 2009, no. 2.

[10] *World LNG to 2020: Prospects for Trade & Shipping*. Raport Ocean Shipping Consultants, 2008.

[11] www.sname.org/AM2008, dostęp: październik 2011 r.



Prof. nadzw. dr hab. inż. Andrzej ADAMKIEWICZ – pracownik Akademii Morskiej w Szczecinie; kierownik Katedry Diagnostyki i Remontów Maszyn. Członek Rady Technicznej Polskiego Rejestru Statków – przewodniczący Zespołu Jednostek Specjalnych, przewodniczący Komisji Eksploatacji Obiektów Oceanotechnicznych i Portów Morskich PNTTE w Szczecinie.



Prof. nadzw. dr hab. inż. Cezary BEHRENDT – dziekan Wydziału Mechanicznego Akademii Morskiej w Szczecinie. Reprezentowane specjalności: kotły i turbiny okrętowe. Przewodniczący Zachodniopomorskiego Zespołu Środowiskowego Sekcji Podstaw Eksploatacji KBM PAN oraz m.in. członek Zespołu Techniki Morskiej Sekcji Technicznych Środków Transportu Komitetu Transportu PAN.