

Remigiusz Iwańkowicz¹⁾

OPTIMALIZACJA FLOTY ZBIORNIKOWCÓW DO PRZEWOZU GAZU SKROPLONEGO ORAZ HARMONOGRAMU JEJ KURSOWANIA

Streszczenie. Przedstawiono model optymalizacji struktury i harmonogramu kursowania floty statków do przewozu gazu skroplonego (LNG). Jako kryterium przyjęto minimalizację łącznych kosztów budowy floty i jej eksploatacji. Model może zostać zastosowany dla dowolnej trasy kursowania. Uwzględnia on ograniczenia wymiarów statków oraz zapotrzebowanie na gaz. Przedstawiono przykład zastosowania modelu dla terminalu w Świnoujściu.

Słowa kluczowe: planowanie zaopatrzenia, optymalizacja, gaz skroplony, flota zbiornikowców, terminal w Świnoujściu

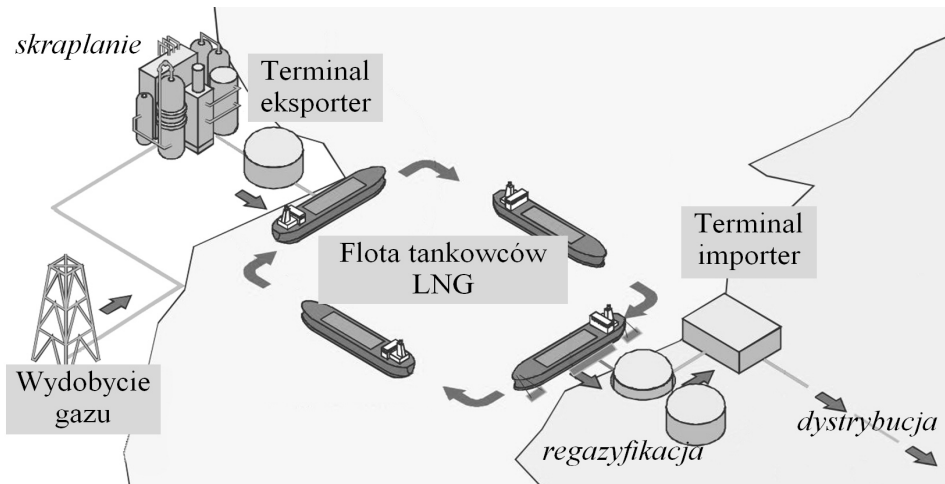
WSTĘP

Gaz ziemny w postaci skroplonej (ang.: *Liquefied Natural Gas – LNG*) jest mieszaniną węglowodorów, która w postaci płynnej tworzy bezwonną i bezbarwną ciecz, pozbawioną właściwości toksycznych i korozyjnych. LNG jest przechowywany i transportowany w temperaturze bliskiej wrzenia (około $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$) w ciśnieniu atmosferycznym. Proces skraplania zmniejsza objętość gazu ok. 600 razy, co znacznie podnosi wydajność jego transportowania.

Gaz ziemny wydobyty ze złóż lądowych lub na szelfie dostarczany jest rurociągami do terminali rozmieszczonych na wybrzeżu. Tam gaz jest oczyszczany i skraplany. Następnie skroplony i oczyszczony gaz ziemny jest pompowany przez izolowane ciepłnie rurociągi na gazowce. Załadunek statku o pojemności $150\,000\text{ m}^3$ (tzw. *conventional size*) trwa około 10 – 12 godzin. Po dostarczeniu gazu do terminalu odbiorczego jest poddawany regazyfikacji i przechowywany w dużych zbiornikach. Pojemność takich zbiorników obecnie jest rzędu 36 tys. do 2,66 mln mł. Kolejnym krokiem jest dostarczenie gazu ziemnego w postaci lotnej do odbiorców indywidualnych poprzez instalacje przesyłowe.

Dostawy LNG drogą morską charakteryzują się dużą elastycznością. Flota zbiornikowców w odróżnieniu od systemu rurociągów może być eksploatowana na różnych trasach i pozwala na dostosowanie do zmian cen gazu w różnych miejscach na świecie. Wielkość floty może być dopasowana do sezonowości zapotrzebowania na gaz poprzez czarterowanie statków.

¹⁾ Wydział Techniki Morskiej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.



Rys. 1. Schemat dostaw LNG drogą morską

Fig. 1. Scheme of LNG supplies by sea

Wielkość światowej floty LNG od 1965 do końca 2009 roku wynosi 350 statków. Pojemności statków LNG wahają się od 8000 do 266 000 m³. Obecnie koszt nowego statku LNG typu „conventional size” to około 227 milionów USD. Statek tego typu ma pojemność ładunkową między 120 000 i 180 000 m³, a długość całkowitą około 290 m. Większość gazowców budowana jest na konkretną trasę i dla konkretnych terminali.

Uruchomienie dostaw LNG do terminalu wymaga doboru liczebności floty, pojemności statków i harmonogramu ich kursowania. Trzeba przy tym uwzględnić ograniczenia związane z oczekiwanym tempem zużycia gazu, pojemnościami magazynów, trasami żegludowymi, czasem za- i wyładunku statku, itd. Kryterium decyzyjnym są tu oczywiście koszty. Najogólniej mówiąc składają się one z kosztów zbudowania statków i utrzymania ich w ruchu.

W kolejnym rozdziale dokonano przeglądu literatury, która dotyczy omawianego problemu. Następnie scharakteryzowano szczegółowo opracowany model i pokazano przykład wykorzystania go dla doboru optymalnej floty zaopatrującej terminal w Świnoujściu.

PRZEGLĄD LITERATURY

Ogólnie problem optymalizacji transportu morskiego został opisany przez Ronen [1983, 1993]. Opublikowane modele optymalizacyjne kursowania floty statków dotyczą różnych rodzajów tras i ładunków: od transportu śmieci w Nowym Jorku [Richetta and Larson, 1997], po flotę promową na wyspach Morza Egejskiego [Darzentas i Spyrou, 1996]. Autorzy najczęściej stosują różne warianty modeli symulacyjnych dla rozwiązania problemu optymalizacji floty.

Ronen [2002] opisuje problem transportu morskiego niejednorodnych produktów, natomiast Christiansen [2011] rozszerza problem o zróżnicowane pojemnościowo magazyny w portach i uwzględnia zagadnienie wielkości ładowni na statkach.

Dość liczne publikacje dotyczące problemów zaopatrzenia skupiają się na optymalizacji tras żeglugowych, liczby i pojemności statków, sposobu załadowania. Nie są brane pod uwagę zagadnienia projektowania statków, ograniczenie wymiarów kadłuba ze względu na możliwości wybranej stoczni, czy koszty budowy.

Bertram [2002] opisuje podstawowe technologie stosowane w stoczni jako składniki kosztów budowy statków. Szersze ujęcie kosztów statku jako środka transportu podaje Stopford [2009]. Charakteryzuje on zarówno składniki kosztów budowy statku jak i jego eksploatacji.

Sposób określania kosztów budowy i eksploatacji zbiornikowców LNG podczas wstępnego projektowania jest opisany przez Bortnowską [2010]. Zaproponowane przez autorkę równania zostały zaadaptowane w modelu jako składnik funkcji celu.

Gulman and Wang [1999] zwracają uwagę na znaczną zmienność zapotrzebowania w skali kraju na gaz ziemny. Jako główne czynniki wymieniane są tu: wielkość populacji, aktywność przemysłowa oraz proporcje ceny gazu do alternatywnych źródeł energii. Jensen [2004] obszernie charakteryzuje światowy rynek LNG. Analizuje m. in. zależność cen gazu skroplonego od kosztów transportu drogą morską.

Andre et al. [2009] w analizie rozwoju sieci rurociąkowej przesyłu gazu przyjęli zapotrzebowanie odbiorców gazu na stałym poziomie w ciągu roku. Wedle najlepszej wiedzy autora, problem optymalizacji floty tankowców w połączeniu z doбором podstawowych parametrów projektowych statków LNG nie był wcześniej badany. Nowością opracowanego modelu jest więc integracja:

- doboru parametrów eksploatacyjnych floty (pojemność zbiorników, prędkość eksploatacyjna),
- wstępnego projektowania statków (wymiary główne, współczynnik pełnotliwości, moc silnika głównego, liczebność załogi, itd.),
- planowania harmonogramu kursowania floty na zadanej trasie.

Oryginalnym wkładem autora są też obliczenia z wykorzystaniem opracowanego modelu dla terminalu LNG w Świnoujściu w Polsce.

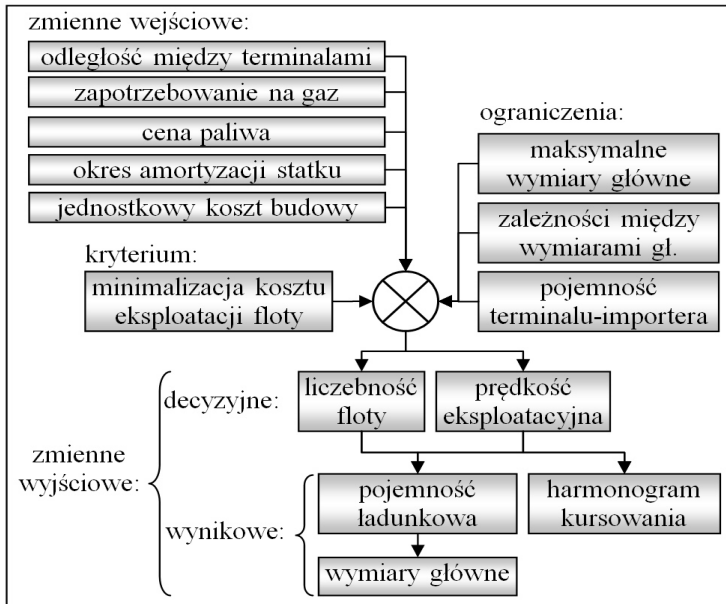
MODEL

Założenia

Poszukiwany model ma za zadanie określić jakie statki i w jakiej ilości powinny stanowić flotę, która dostarczy LNG do terminalu odbiorczego. Należy więc określić wpływ odległości między terminalami LNG, średniego rocznego zapotrzebowania na gaz, ceny paliwa, okresu amortyzacji statku, współczynnika kosztu budowy statku na

jednostkę objętości ładowni oraz wydajności pomp przeładunkowych w terminalach na parametry optymalnej floty statków, która na zadanej trasie ma pływać. Za parametry floty uznaje się: ilość statków, prędkość eksploatacyjną i pojemność ładunkową statków, ich wymiary główne (długość między pionami, szerokość, wysokość boczną, zanurzenie) oraz współczynnik pełnotliwości kadłuba.

Kryterium optymalizacyjnym jest minimalizacja miesięcznego kosztu eksploatacji floty gazowców LNG. Optymalizacja realizowana jest dla konkretnej trasy dostaw. Model musi uwzględniać ograniczenia: wymiarów statków na zadanej trasie, pojemności magazynów terminalu-importera.



Rys. 2. Struktura modelu
Fig. 2. Structure of the model

Zakłada się że:

- dostawy w ciągu roku są regularne – okresowość zapotrzebowania na gaz równoważona jest dzięki magazynom buforowym,
- flota składa się z takich samych statków – w celu obniżenia kosztów budowy i utrzymania,
- zbiornikowce będą miały zbiorniki typu membranowego – ten typ zbiorników stanowi obecnie większość (61,8% w roku 2009) oraz daje szansę na realizację budowy w Polsce,
- okres amortyzacji statku wynosi 15 lat.

Funkcja celu

Całkowity miesięczny koszt eksploatacji floty można wyrazić następująco:

$$ACC = n \cdot (CC + RO + VC) \rightarrow \min, \left[\frac{\$}{\text{month}} \right] \quad (1)$$

gdzie: n – liczba statków we flocie, CC – koszt kapitału, RO – koszt operacyjny, VC – koszt ruchu statku.

Koszt kapitału

Koszt kapitału zainwestowanego w statek jest zależny od kosztu budowy i okresu amortyzacji. Na podstawie bazy danych o istniejących zbiornikowcach LNG można określić koszt budowy jako funkcję pojemności ładunkowej (VH):

$$CC = \frac{1152 \cdot VH}{15 \cdot 12}, \left[\frac{\$}{\text{month}} \right] \quad (2)$$

Koszt operacyjny

Koszt operacyjny określa się jako sumę:

$$RO = KC + RC, \left[\frac{\$}{\text{month}} \right] \quad (3)$$

gdzie: KC – koszt wynagrodzenia załogi, RC – koszt utrzymania statku w sprawności technicznej (naprawy, remonty).

Koszt wynagrodzenia załogi oblicza się jako:

$$KC = \frac{48000}{12} \cdot n_c^{0,7}, \left[\frac{\$}{\text{month}} \right] \quad (4)$$

$$n_c = \left[10 + 0,05 \cdot \frac{L_{pp} \cdot B \cdot H}{1000} + 0,02 \cdot Pb^{0,5} \right] \quad (5)$$

$$Pb = \frac{Dis^{\frac{2}{3}} \cdot v^3}{a + b \cdot Fn},$$

$$a = 4977 \cdot Cb^2 - 8105 \cdot Cb + 4456,$$

$$b = -10847 \cdot Cb^2 + 12817 \cdot Cb - 6960, \quad (6)$$

$$Fn = \frac{0,5144 \cdot v}{\sqrt{9,81 \cdot L_{pp}}}$$

gdzie: n_c – liczebność załogi, L_{pp} , B , H – wymiary główne statku (długość między pionami, szerokość i wysokość boczna), Pb – moc silnika głównego, Dis – wyporność statku [Mg], v – prędkość eksploatacyjna w węzłach, Cb – współczynnik pełnotliwości kadłuba.

Koszt utrzymania statku w sprawności technicznej:

$$RC = \frac{23 \cdot Pn + 200 \cdot Pb^{0,7}}{12} \quad (7)$$

gdzie: Pn – nośność statku [Mg].

Koszt ruchu

Utrzymanie statku w ruchu wyraża się wzorem:

$$VC = (FC + PC) \cdot RTPA, \left[\frac{\$}{month} \right] \quad (8)$$

$$PC = 6,3 \cdot Pn^{0,88} \quad (9)$$

gdzie: $RTPA$ – liczba cykli (rejsów w obie strony) jednego statku w ciągu miesiąca, FC – koszt paliwa na cykl, PC – koszt portowy w terminalu-eksporterze.

Liczba cykli w ciągu miesiąca oblicza się następująco:

$$RTPA = \frac{29}{2 \cdot (Tr + Tzw)} \quad (10)$$

$$(7) Tr = \frac{d}{24 \cdot v}, \quad [dni] \quad (11)$$

$$Tzw = \frac{0,98 \cdot VH}{24 \cdot Q} + 0,5, \quad [dni] \quad (12)$$

gdzie: Tr – czas rejsu, Tzw – czas załadunku (wyładunku), Q – wydajność pomp przeładunkowych [m^3/h].

Współczynnik 0,98 we wzorze (12) wynika z wymogów bezpieczeństwa. Pozostawienie 2% pustej przestrzeni zbiorników zmniejsza prawdopodobieństwo wybuchu.

Koszt paliwa ponoszony w jednym cyklu wynosi:

$$FC = 1,05 \cdot DFC \cdot 2 \cdot Tr \cdot Fp, \quad [\$] \quad (13)$$

$$DFC = \frac{0,19 \cdot Pb \cdot 24}{1000}, \quad \left[\frac{Mg}{dzień} \right] \quad (14)$$

gdzie: DFC – dzienne zużycie paliwa [Mg/day], Fp – cena paliwa [\$/Mg].

Redukcja zmiennych niezależnych

Przedstawiona funkcja celu obejmuje dziewięć zmiennych opisujących projektowaną flotę. Są to: liczba statków (n), wymiary głównego statku (L_{pp} , B , H), współczynnik pełnotliwości (Cb), wyporność (Dis), nośność (Pn), pojemność ładowni (VH), prędkość (v). Koszt transportu gazu zależy trzy parametry określone z góry:

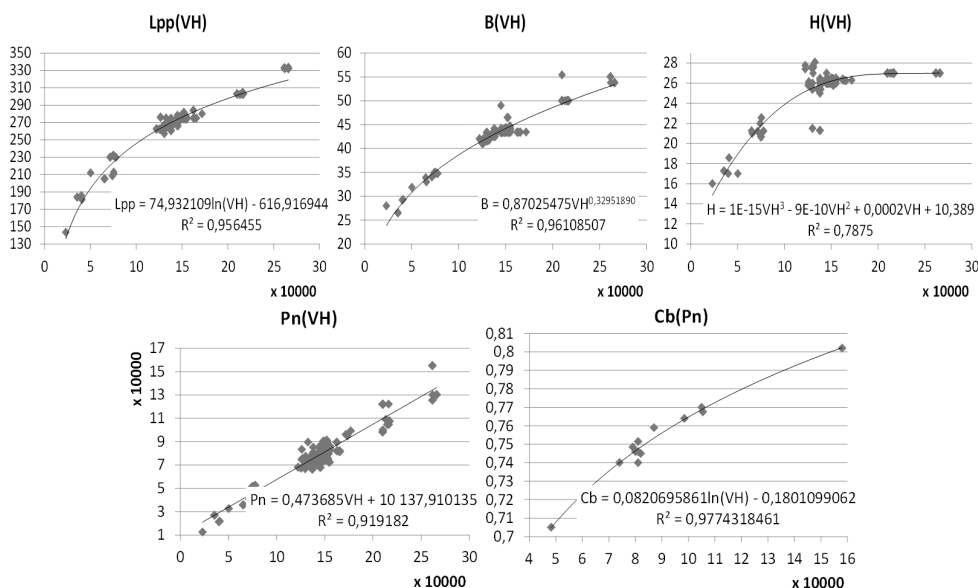
- cena paliwa (Fp),
- dystans między terminalami (d),
- wydajność pomp w terminalach (Q).

Opisywany model charakteryzuje się zredukowaną liczbą zmiennych. Redukcję tą przeprowadzono dwuetapowo.

Analiza statków podobnych

W pierwszym etapie redukcji zmiennych niezależnych modelu zgromadzono bazę danych o 256 zbiornikowcach LNG wyposażonych w zbiorniki typu membranowego. Na podstawie analizy regresji wyznaczono zależności wymiarów głównych i nośności statku od jego pojemności ładunkowej (rys. 3).

Wykorzystywanie statystyk statków podobnych jest typową procedurą na wstępnym etapie projektowania statku. Określa się w ten sposób wymiary główne oraz przewiduje koszty budowy i eksploatacji.



Rys. 3. Wyniki analizy statków podobnych
Fig. 3. The results of the analysis of similar ships

Wprowadzenie wyznaczonych funkcji regresji do funkcji celu pozwoliło na redukcję ilości zmiennych decyzyjnych do trzech: liczba statków (n), pojemność ładowni (VH) i prędkość (v).

Bilansowanie zaopatrzenia

Drugim etapem redukcji liczby zmiennych modelu jest wykorzystanie zależności wynikających z harmonogramu dostaw. Można zauważyć, że ilość ładunku przywożonego przez całą flotę w jednym cyklu rejsowym musi równać się użyciu gazu w tym cyklu. Ponieważ cykl ten jest równy sumie czasu rejsu w obie strony oraz czasu załadunku i wyładunku, więc otrzymujemy równanie bilansu zaopatrzenia:

$$D \cdot (2 \cdot T_{zw} + 2 \cdot T_r) = 0,98 \cdot VH \cdot n \quad (15)$$

Podstawiając równania (11), (12) otrzymujemy:

$$VH = 0,98 \frac{D(d + 12v)}{12v(n - \frac{2D}{a})}, \quad [m^3] \quad (16)$$

gdzie: D – dzienne zapotrzebowanie na LNG [m^3].

Równanie (16) pozwala na dobranie pojemności ładunkowej do zadanej ilości i prędkości statków floty. Tak określone statki zapewniają dostawy dopasowane do tempa zużycia gazu, dystansu między terminalami i wydajności przeładunkowej pomp w terminalach. W efekcie poziom gazu w magazynach waha się między ustalonym minimalnym a maksymalnym poziomem. Dla wartości spełniających równanie bilansu (16) można wyznaczyć czasy rejsu i przeładunku.

Czas między zawijaniem do portu kolejnych statków floty wynosi:

$$\Delta T = \frac{2 \cdot T_{zw} + 2 \cdot T_r}{n} \quad (17)$$

Zauważamy więc, że znając prędkość eksploatacyjną statków oraz ich ilość we flocie możemy uzyskać wszystkie informacje niezbędne do opracowania harmonogramu kursowania statków między terminalami.

Równanie bilansu zaopatrzenia pozwala na dalszą redukcję ilości zmiennych niezależnych modelu optymalizacyjnego. W efekcie otrzymujemy zależność miesięcznego kosztu eksploatacji floty ACC jako funkcję ilości statków i ich prędkości. Wykorzystanie równania bilansu zaopatrzenia wprowadza do modelu dodatkowy parametr w postaci dziennego zapotrzebowania na LNG.

Podstawową korzyścią wynikającą z redukcji zmiennych decyzyjnych modelu, jest łatwość szukania optimum. Zakładając, że:

- prędkość eksploatacyjna statków zawiera się w przedziale domkniętym $[10, 25]$ węzłów i jest określana liczbą całkowitą,
- wielkość floty jest w przedziale $[1, 30]$,

uzyskujemy 480 wariantów decyzyjnych. Problem taki można szybko rozwiązać metodą *brute force* z wykorzystaniem dowolnego narzędzia obliczeniowego (Mathcad, Matlab, MS Excel, itd.).

Oczywiście pozostaje problem poprawności wnioskowania na podstawie zbioru statków podobnych. Z tego też względu otrzymywana predykcja kosztu eksploatacji floty ma charakter wstępny i wymaga weryfikacji na dalszych etapach projektowania statków.

PRZYKŁAD OBLICZEŃ

Obliczenia wykonano dla zaopatrzenia Polski w gaz z wykorzystaniem terminalu w Świnoujściu. Miesięcznie Polska zużywa średnio około $13 \cdot 10^9$ m³ gazu ziemnego. Przyjęto, że potencjalnymi terminalami z których LNG może być sprowadzane do Świnoujścia są (w nawiasach podano dystans w km): Norwegia, Snohvit (4924), Algieria, Arzew (8426), Libia, Marsa El Brega (12594), Nigeria, Bonny (18670), Katar, Ras Laffan (26044).

Do obliczeń przyjęto następujące założenia:

- dzienne zapotrzebowanie na LNG (30% zużycia Polski): $D = 15\,278$ m³,
- maksymalna pojemność magazynów LNG: $S = 288\,000$ m³,
- wydajność pomp przeladunkowych we wszystkich terminalach: $Q = 12\,000$ m³/h,
- ograniczenia wymiarów statków dla portu w Świnoujściu i Cieśnin Duńskich: $L_{oa_max} = 300$ m, $T_{max} = 13,5$ m, $B_{max} = 48$ m,
- cena paliwa: $F_p = 400$ \$/t.

Tabela 1. Wyniki optymalizacji floty dla różnych wariantów tras
Table 1. Fleet optimization results for different variants of routes

Eksporter, terminal	Norwegia, Snohvit	Algieria, Arzew	Libia, Marsa El Brega	Nigeria, Bonny	Katar, Ras Laffan
Dystans d [km]	4924	8426	12594	18670	26044
Prędkość v [kn]	13	13	14	13	13
Liczba statków n	3	5	7	11	15
Pojemność VH [m ³]	141949	139486	135813	135670	137688
Długość między pionami L_{pp} [m]	272	270,7	268,7	268,6	269,7
Szerokość B [m]	47,9	47,6	47,2	47,2	47,4
Wysokość H [m]	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5
Zanurzenie T [m]	11,7	11,7	11,6	11,6	11,7
Wsp. pełnotliwości cb	0,743	0,742	0,74	0,74	0,741
Koszt transportu ACC [\$/mies.]	4951050	7838246	11370594	16325994	22368433
Czas rejsu Tr [dni]	8,648	14,798	20,538	32,789	45,739

Wykonano niezależne optymalizacje floty dla pięciu wariantów tras. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 2. Można zauważyć, że koszt transportu liniowo zależy od dystansu między terminalami. Zależność ta wyraża się równaniem:

$$ACC = 824,46 \cdot d + 924450 \quad (18)$$

WNIOSKI

W artykule opisano model optymalizacyjny floty tankowców LNG. Model charakteryzuje się zredukowaną liczbą zmiennych decyzyjnych dzięki wykorzystaniu bazy statków podobnych oraz równania bilansu zaopatrzenia. Dzięki temu, określając jedynie liczbę statków we flocie oraz ich prędkość, uzyskuje się prognozę kosztów transportu gazu na zadanej trasie. Dodatkowo otrzymuje się podstawowe parametry projektowe statków, które są standardowo określane we wstępnym etapie projektowania.

Zaletą opracowanego modelu jest dostosowanie projektowanej floty do harmonogramu dostaw. Harmonogram ten zapewnia regularność dostaw i możliwie niską prędkość rejsową.

Należy zauważyć, że zaproponowany model ma charakter uniwersalny. Może on zostać zastosowany do optymalizacji dowolnej floty. W przypadku statków innego typu, przeznaczonych do przewozu np. ładunków masowych, wystarczy zmodyfikować model o bazę statków podobnych i charakterystyki terminali.

Zaproponowany wzór bilansu zaopatrzenia wprowadza czynnik logistyczny już na etapie wstępnego projektowania statków oraz struktury floty. Zastosowanie go zwiększa ilość informacji, na których opiera się projektant, tak więc może podnieść jakość podejmowanych przez niego decyzji.

LITERATURA

1. Andre J., Bonnans F., Cornibert L., 2009. Optimisation of capacity expansion planning for gas transportation networks. *European Journal of Operational Research*, 197: 1019–1027.
2. Bertram V., 2002. Technology of Ship Production, 37th WEGEMT Summer School, Madrit.
3. Bortnowska M., 2010. Technological and operational concept of an LNG carrier. *Scientific Journals of Maritime University of Szczecin*, 21(93): 28–33.
4. Christiansen M., Fagerholt K., Flatberg T., Haugen R., Kloster O., Lund E.H., 2011. Maritime inventory routing with multiple products: A case study from the cement industry. *European Journal of Operational Research*, 208: 86–94.
5. Darzentas, J., Spyrou, T., 1996. Ferry traffic in the Aegean Islands: simulation study. *Journal of the Operational Research Society*, 47: 203–216.
6. Guldman J-M., Wang F., 1999. Optimising the natural gas supply mix of local distribution utilities. *European Journal of Operational Research*, 112: 598–612.
7. Jensen J.T., 2004. The development of a global LNG market. Is it likely? If so, when? Oxford Institute for Energy Studies.

8. Richetta, O., Larson, R.C., 1997. Modeling the increased complexity of New York City's refuse marine transport system. *Transportation Science*, 31: 272–293.
9. Ronen, D., 1983. Cargo ships routing and scheduling: survey of models and problems. *European Journal of Operational Research*, 12: 119–126.
10. Ronen, D., 1993. Ship scheduling: the last decade. *European Journal of Operational Research*, 71: 325–333.
11. Ronen, D., 2002. Marine inventory routing: shipments planning. *Journal of the Operational Research Society*, 53: 108–114.
12. Stopford M., 2009. *Maritime Economics*. Routledge, Abingdon.

OPTIMISATION OF THE LNG-TANKERS FLEET AND THE PLYING SCHEDULE

Summary

There is presented a model for optimizing the structure and schedule of traveling of a fleet of LNG tankers. As a criterion was assumed to minimize the total construction costs of the fleet and its operation. The model can be applied to any gas transportation route. It takes into account limits of vessels size and the demand for gas. There is shown an example of application of the model for terminal in Świnoujście.

Keywords: supply scheduling, optimisation, liquefied natural gas, tankers fleet, Świnoujście terminal.