



Karol Gardyjasz¹, Adam Muc², Adam Szeleziński³

¹ Wydział Nauk Inżynierskich, Gdańska Szkoła Wyższa

² Wydział Elektryczny, Akademia Morska w Gdyni

³ Wydział Mechaniczny, Akademia Morska w Gdyni

Znaczenie procesu projektowania przy dobrze mocy napędu głównego kontenerowca

1. Wstęp

Cykl życia maszyny to czas liczony od przygotowania produkcji (poprzedzonej identyfikacją potrzeb) poprzez produkcję, dystrybucję, eksploatację, aż do momentu jej likwidacji. Najczęstszą formą przedstawienia koncepcji powstania danej maszyny jako danego utworu, który powstał jako element gotowy, jest przedstawienie go w ujęciu systemowym procesu projektowania. Ujęcie systemowe polega na równoczesnej analizie trzech aspektów: podmiotu projektowania, przedmiotu projektowania i procesu projektowania [9]. Procesem projektowania nazywa się najczęściej zbiór działań podmiotu projektowania (najczęściej projektanta) nakierowany na przedmiot projektowania (dana maszyna). Podczas procesu projektowania należy wyróżnić trzy zasadnicze etapy: dostrzeganie i preparacja problemu, generowania koncepcji rozwiązania i weryfikacja rozwiązania [10]. Uporządkowanie procesu projektowania stanowi jego strukturę, która może być opisywana z różnym stopniem dokładności. Patrząc na charakter czynności wykonywania prac projektowych można mieć do czynienia z projektowaniem konceptualnym i projektowaniem szczegółowym. Idąc krok dalej należy wspomnieć o stopniu konkretyzacji procesu projektowania. Ujęcie systemowe zakłada założenia konstrukcyjne, w których następuje uściślenie sformułowania zadania, projektowanie koncepcyjne, projektowanie konstrukcyjne i projektowanie realizacyjne. Proces projektowania doboru mocy napędu głównego kontenerowca we wczesnym stadium polega na ograniczeniu się do projektowania koncepcyjnego, w którym to podmiot projektowania określa wymagania (przedstawione jako żądania i życzenia) jakie musi spełniać napęd danej jednostki. Pojawia się wówczas koncepcja, która zostaje wygenerowana zgodnie z przyjętą w założeniach konstrukcyjnych istotą działania. Zarys tej koncepcji oparty jest głównie na odwzorowaniu rozwiązań analogicznych do istniejących już jednostek.

Mówiąc o projektowaniu nie sposób nie zwrócić uwagi na człowieka, który uznawany jest za jednego z twórców ogólnych zasad projektowych. Jest nim Francuz Franz Reuleaux, który na przełomie XIX i XX w. promował idee ustalenia sztywnych

ram procesu projektowania i zdefiniowania modułów w projektowaniu konstrukcji maszyn w sposób bardziej czytelny niż zrobili to jego poprzednicy. Próbował on stworzyć podstawy teoretyczne procesów projektowania różnego rodzaju maszyn i urządzeń. Wraz z biegiem lat proces projektowania przybierał różne formy. Podobny wydźwięk miało to w przemyśle okrętowym, gdzie co raz częściej starano się, aby dobór parametrów projektowanych maszyn poprzeć obliczeniami nie tyle subiektywnymi, co obiektywnymi.

Kontenerowce, dawniej zwane pojemnikowcami, są obecnie jednym z najczęściej spotykanych rodzajów statków handlowych poruszających się po wodach dzisiejszego świata. Stanowią ważną część marynarki handlowej, ze względu na możliwość przewożenia towaru w ładunku poziomym lub pionowym w znormalizowanych kontenerach 20- i 40-stopowych (tab. 1).

Tabela 1.

Wymiary zewnętrzne kontenerów wg [15]

Nazwa kontenera	Długość x szerokość x wysokość [m]	Objętość wewnętrzna [m ³]
20-stopowy	6,1 x 2,4 x 2,6	ok. 33
40-stopowy	12,2 x 2,4 x 2,6	ok. 66,9
40-stopowy „High Cube”	12,2 x 2,4 x 2,9	ok. 76

Tak więc na przełomie lat 50. i 60. XX w. nastąpił dynamiczny wzrost gospodarki światowej, w skutek czego, żegluga handlowa stawała się co raz bardziej istotną jej częścią ze względu na swoją rolę — stosunkowo szybki i tani sposób transportu towarów drogą morską. By przyspieszyć przewóz i zminimalizować okres pobytu statków w poszczególnych portach ładunkowych, postanowiono zunifikować sposób pakowania przewożonego towaru — odtąd ogromne masy ładunków drobnicowych pakowano w kontenery. Korzyści, jakie osiągnięto dzięki zastosowaniu jednolitego sposobu transportu, to między innymi:

- skrócenie czasu przeładunku,
- zmniejszenie kosztów transportu,
- mniejsze ryzyko uszkodzenia lub utraty ładunku,
- terminowa dostawa,

Pierwszy statek przeznaczony typowo do przewozu kontenerów powstał w 1956 roku i przyjął nazwę „Ideal-X” (rys. 1). Była to jednostka przekształcona z tankowca, mogąca pomieścić 53 kontenery 35-stopowe. Kolejną, istotną datą w historii rozwoju kontenerowców był rok 1966, kiedy to z 226 kontenerami na pokładzie przyplłynął ze Stanów Zjednoczonych do Europy statek *s/s Fairland*. Było to na ówczesne czasy wydarzenie o bardzo dużym znaczeniu dla rozwoju statków kontenerowych.

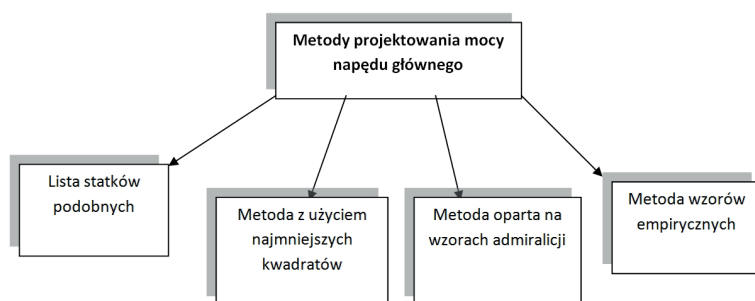


Rys. 1. Projekt statku Ideal-X [4]

Wszystkie te zmiany w trendach doprowadziły do upowszechnienia nowego typu statku handlowego — kontenerowca. Na przestrzeni lat konstruktorzy, uwzględniając tendencje w szeroko rozumianym rozwoju silników okrętowych, opracowali system doboru projektowanej mocy napędu głównego. Obecnie wyróżnia się cztery powszechnie stosowane metody obliczeniowe dla określenia przybliżonej wartości mocy silnika bądź silników głównych.

2. Metody określenia doboru napędu głównego

W obecnych czasach projektant, projektując dobór mocy napędu głównego dla każdego rodzaju jednostek pływających zobowiązany jest skorzystać z 4 ustandaryzowanych metod projektowych określonych na rysunku 2.



Rys. 2. Metody projektowania mocy napędu głównego jednostek pływających

2.1. Lista statków podobnych

Jedną z nich jest określenie mocy napędu głównego za pomocą listy statków podobnych. Metoda ta polega na znalezieniu wśród istniejących już jednostek tzw. „jednostek podobnych”. Jako kryterium przy doborze jednostek podobnych określonego kontenerowca stosuje się jego zdolność przewozową. Standardowo różnice zdolności przewozowej określa się jako $\pm 10\%$ w stosunku do rozpatrywanej jednostki. W zależności od oczekiwanych dokładności obliczeń wartość ta może zostać zmieniona o kilka procent. Zebrane dane zamieszcza się w tabeli. Na tej podstawie i wyliczeniu średniej arytmetycznej mocy napędu głównego zebranych w tabeli jednostek określa się w przybliżeniu moc napędu głównego i prędkość projektowanej jednostki. Przy doborze jednostki podobnej należy kierować się również datą produkcji tej jednostki — trendy w budowie silników i w skutek tego otrzymywanych mocy, kształty kadłubów (i związane z tym opory), jak również prędkości pływania zmieniają się w szybkim tempie, dlatego też istotne jest aby jednostki te były jak najmłodsze. W tabeli należy dodatkowo, wedle potrzeb projektowych, zmieścić takie dane jednostki, jak: nośność,

wymiary, prędkość, dane dotyczące napędu głównego, elektrowni i kotłowni. W tabeli 2 przedstawiono listę statków podobnych dla kontenerowca 4000 TEU, w której projektant jako maksymalną różnicę zdolności przewozowej przyjął 20%. Niekwestionowaną zaletą tej metody jest łatwość obliczeń i stosunkowo szeroki dostęp do materiałów informacyjnych. Wadą natomiast są niekoniecznie aktualne preferencje projektowe, szczególnie wtedy, gdy jednostka jest już dość długo w użyciu.

Tabela 2.

Lista statków podobnych na przykładzie kontenerowca
o zdolności przewozowej 4000 TEU wg [5, 6]

Lp.	Nazwa Statku	Zdolność przewozu [TEU]	Nośność P [t]	Wymiary Loa[m] Lbp[m] B[m] D[m]	Prędkość [kn.]	NAPĘD GŁÓWNY			STER STR	ELEKTROWNIA				KOTŁOWNIA				
						Typ silnika	Moc [kW]	Prędk. Obrót. [1/min]		Moc [kW]	SZP		PW		Kocioł opalany		Kocioł utylizacyjny	
											Typ Liczba	Moc [kW]	Typ Liczba	Moc [kW]	Typ liczba	Wyd.[kg /h]	Typ Liczba	Wyd.[kg /h], Ciśn. [MPa]
1	ITAL FESTOSA	3450	42800	Loa=238 Lbp=225,5 B=32,2 D=19,8	23,5	MAN B&W 7K90MC-C	31990	104	1200	HYUNDAI /HFC5 2x 714-14K-01 2x 710-14K-01	2x 1700 2x 1950	bd	bd	COMPOS ITE	3000	COMPOS ITE	3000	
2	WAN HAI 511	4500	57830	Loa=259 Lbp=246,4 B=37,3 D=19,4	19,2	MAN B&W 8K90MC-C6	36560	104	1600	3x HYUNDAI /HFC7714 -10P	3x2280	bd	bd	Alfa Laval Aalborg	3000	bd	bd	
3	CAP INES	4600	50270	Loa=264,32 Lbp=251 B=32,2 D=21,5	22,5	MAN B&W 8K90MC-C6	36560	104	1500	4x HHI/HFJ7 716-84K	4x 2400	bd	bd	COMPOS ITE	bd	COMPOS ITE	bd	
4	ITAL MATTINA	4300	53644	Loa=264,21 Lbp=249 B=32,2 D=19,5	23,9	MAN B&W 8K90MC-C6	36560	104	1500	HYUNDAI MAN 2x 8L27/38 2x 6L27/38	2x2400 2x1800	bd	bd	COMPOS ITE Aalborg	3000	COMPOS ITE Aalborg	2500	
5	CMA CGM SAMBHAR	4045	52683	Loa=268,8 Lbp=256,5 B=32,2 D=19,1	25,55	Sulzer 7RTflex-96C	40040	102	1600	4x HYUNDAI HFC5 718 -14K-EB	4x2400	bd	bd	KangRim Industries MA05R23 watertube	3000	bd	bd	

2.2. Metoda z użyciem najmniejszych kwadratów

Kolejną, często używaną metodą obliczeniową we wstępnych etapach projektów jest tzw. „metoda z użyciem najmniejszych kwadratów”. Na potrzeby tej metody potrzebne jest na wstępie określenie takich danych, jak nośność oraz prędkość statku. Dane te mogą być określone na podstawie jednostek podobnych lub mogą stanowić określone przez projektanta ustalone wartości. W metodzie tej przyjęto, że wzrost mocy efektywnej rozpatrywanej jednostki zmienia się wraz z sześcianiem potęgi prędkości jednostki. Wprowadza się także tzw. współczynnik admiralicji, który jest obliczeniowo wyznaczany na podstawie nośności danej jednostki. Wzór (1) na obliczenie mocy efektywnej kształtuje się więc następująco [3]:

$$N_e = \alpha_N \cdot P^{\frac{2}{3}} \cdot v^3 \quad (1)$$

gdzie:

N_e – efektywna moc napędu głównego [kW],

α_N – współczynnik admiralicji wyliczany w oparciu o nośność,

P – nośność statku [t],

v – prędkość statku [w].

Korzystając z obliczeń uzyskanych dla jednostek podobnych, konstruktor jest zobowiązany skorzystać z następującego schematu obliczeniowego. Dla poszczególnych i -tych kontenerowców, rozpatrywanych na wcześniej sporządzonej liście statków, wzór projektowy można zapisać następująco:

$$N_{eai} = \alpha_N \cdot P_i^{\frac{2}{3}} \cdot v_i^3 \quad (2)$$

gdzie: N_{eai} i α_N są wartościami uzyskanymi z aproksymacji liniowej.

Oznaczając:

$$f_i = P_i^{\frac{2}{3}} \cdot v_i^3 \quad (3)$$

wzór (2) można zapisać następująco:

$$N_{eai} = \alpha_N \cdot f_i \quad (4)$$

Następnie należy poszukać takiej wartości α_N , żeby suma kwadratów:

$$S_N = \sum_{i=1}^n (N_{ei} - N_{eai})^2 \quad (5)$$

osiągnęła minimum. Podstawiając potem wzór (4) do wzoru (5), otrzymano wyrażenie na S_N o postać:

$$S_N = \sum_{i=1}^n (N_{ei} - \alpha_N \cdot f_i)^2 \quad (6)$$

Obliczenia iteracyjne trwają tak długo, aż wartości α_N dla sumy S_N osiągnie minimum, co odpowiada spełnieniu warunku:

$$\frac{dS_N}{d\alpha_N} = 0$$

Różniczkując prawą stronę równania (6) otrzymuje się:

$$\frac{dS_N}{d\alpha_N} = \sum_{i=1}^n 2 \cdot (N_{ei} - \alpha_N \cdot f_i) \cdot (-f_i) = 0 \quad (7)$$

Po przekształceniu otrzymuje się:

$$\sum_{i=1}^n N_{ei} \cdot f_i = \alpha_N \sum_{i=1}^n f_i^2 = 0 \quad (8)$$

Wzór na współczynnik α_N z aproksymacji wzoru (6) ma postać:

$$\alpha_N = \frac{\sum_{i=1}^n N_{ei} \cdot f_i}{\sum_{i=1}^n f_i^2} \quad (9)$$

Na tej podstawie tworzy się tabelę, w której dla rozpatrywanych z listy statków podobnych wylicza się: f_i, f_i^2 i $N_e : f_i$. Po obliczeniu tych danych i podstawieniu do wzoru (9) oblicza się średni współczynnik regresji dla statków przedstawionych na liście statków podobnych, następnie używając wzoru (1), oblicza się moc efektywną napędu głównego dla projektowanej jednostki.

2.3. Metoda oparta na wzorach admiralicji

Kolejną metodą obliczeniową stosowaną na początkowym etapie projektu jest określenie mocy napędu głównego za pomocą wzoru admiralicji. Metoda ta wymaga od projektanta określenia prędkości pływania danej jednostki. W związku z czym należy obliczyć również tzw. współczynnik pełnotliwości kadłuba. Na tej podstawie, korzystając z listy statków podobnych dla każdej zamieszczonej tam jednostki, wylicza się współczynnik admiralicji C_i ze wzoru [1]:

$$C_i = \frac{D^{\frac{2}{3}} \cdot v^3}{N_e} \quad (10)$$

gdzie:

D — wyporność jednostki [m^3],

v — prędkość jednostki [w],

C_i — współczynnik Admiralicji, charakterystyczny dla danej jednostki,

N_e — moc efektywna napędu głównego statku z listy statków podobnych [kW].

Tak wyliczone dane należy podstawić do wzoru:

$$N_e = \frac{D^{\frac{2}{3}} \cdot v^3}{C_{fr}} \quad (11)$$

gdzie: C_{fr} — średnia wartość współczynnika admiralicji dla jednostek z listy statków podobnych.

2.4. Metoda wzorów empirycznych

Ostatnią metodą obliczeniową, dzięki której istnieje możliwość określenia wstępnego zapotrzebowania na moc napędu głównego, jest użycie wzoru empirycznego. Jest to metoda najmniej pracochłonna i polegająca na podstawieniu oczekiwanych danych do wzoru określonego na podstawie zależności pomiędzy wartościami charakterystycznymi jednostek podobnych. Wzory te uwzględniając tendencje rozwoju technicznego na przestrzeni lat zmieniają się i w zależności od źródła mogą przyjmować różne postacie. Dla kontenerowca na podstawie [2] podano wzór:

$$N_e = (0,9179 + 0,00003412 \cdot D) \cdot v^3 \quad (12)$$

gdzie:

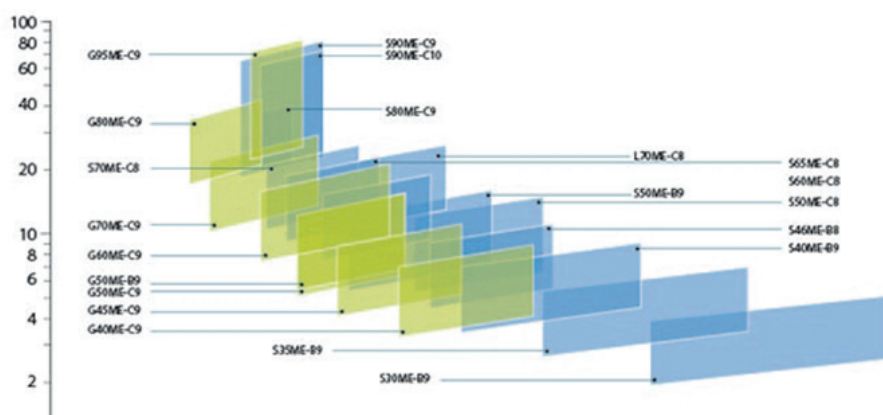
D — wyporność jednostki [m^3],

v — prędkość jednostki [w].

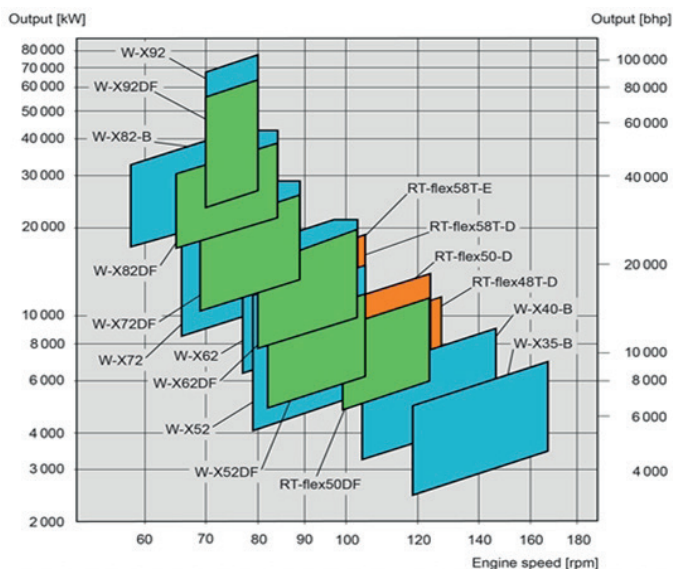
Należy jednak pamiętać, iż metoda ta jest raczej subiektywną opinią zależności autora wzoru i nie powinna być ona traktowana jako metoda projektowa, lecz jako punkt odniesienia do sprawdzenia poprawności obliczeń poprzednich metod.

3. Określenie producenta silnika/silników

Kolejnym ważnym punktem w procesie projektowania doboru mocy jest określenie rodzaju napędu głównego i rodzaju silnika. Obecnie na rynku morskim zdecydowanie największym powodzeniem cieszą się silniki marek MAN, B&W i Wartsila. Co raz częściej pojawiają się silniki dwupaliwowe, jednak wśród znacznej ilości średniej wielkości kontenerowców dominują silniki wolnoobrotowe. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono aktualne oferty dwóch ww. producentów silników okrętowych dla kontenerowców, uzależniając je od pożądanej mocy i prędkości obrotowej.



Rys. 3. Oferta silników firmy MAN B&W wg [7]



Rys. 4. Oferta silników firmy Wartsila wg [8]

4. Podsumowanie

Jak można zauważyć, każda metoda obliczeniowa ma swoje wady i zalety. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że technika i sposoby postrzegania niektórych rozwiązań technicznych, a także projektowych wraz z rozwojem nauki również się zmienia. Uwzględniając podział faz procesów projektowych to ww. metody mogą być przydatne raczej na wczesnym etapie projektowym, jako metody przybliżone, niż jako w pełne wyniki obliczeniowe. Nie uwzględniają one wielu czynników, takich jak np. zmienność zapotrzebowania mocy napędu głównego podczas pływania w różnych warunkach pogodowych, dlatego projektant w późniejszej fazie projektu musi tego typu uwagi uwzględnić dobierając odpowiedni napęd główny. Należy zwrócić uwagę na co raz to nowsze rozwiązania konstrukcyjne w budowie kadłubów statków, co również ma wpływa na wytwarzany opór podczas podróży morskich. Dynamiczny rozwój silników i paliw, jakimi są zasilane kontenerowce, sprawia, że chcąc odpowiednio dobrać moc napędu głównego do każdej rozpatrywanej jednostki, oprócz metod obliczeniowych należy kierować się doświadczeniem i zdrowym rozsądkiem, aby nie przesadzić z nadmiarem mocy silnika (co byłoby niekorzystne choćby z perspektywy ilości spalanej paliwa), a także z niedomiarem, który mógłby spowodować problemy ze sterownością jednostki. Wracając do ujęcia systemowego procesu projektowania i zwracając uwagę na poziom innowacyjności, proces projektowania mocy napędu głównego jest zdecydowanie projektowaniem rutynowym, polegającym na komponowaniu elementów już znormalizowanych, określonych na podstawie znanych ogólnie wzorów projektowych [10].

Literatura

1. Balcerski A.: Siłownie Okrętowe, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1986.
2. Giernalczyk M., Górski Z.: Siłownie Okrętowe, Część 1, Gdynia 2013.
3. Michalski R.: Siłownie Okrętowe, Politechnika Szczecińska, Szczecin 1997.
4. https://en.wikipedia.org/wiki/SS_Ideal_X [dostęp: 15.11.2017].
5. www.rickmers-maritime.com [dostęp: 15.03.2017].
6. Significant Ships Publications of the Royal.
7. www.marine.man.eu [dostęp: 23.02.2017].
8. www.wingd.com [dostęp: 15.02.2017].
9. Gendarz P., Salomon S. Chwastyk P.: Projektowanie inżynierskie i grafika inżynierska, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2014.
10. Tarełko W.: Metodologia projektowania właściwości eksploatacyjnych złożonych obiektów technicznych, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Eksploatacji, Radom 2011.

Streszczenie

W pracy przedstawiono wybrane metody określania mocy napędu głównego statku typu kontenerowiec. Każdą z metod opisano i podano niezbędne algorytmy obliczeniowe. Zwrócono uwagę na zalety i wady poszczególnych metod. Wskazano na istotne znaczenie statków kontenerowych w żegludze handlowej, przedstawiono również rozwój i przyczyny powstania kontenerowców. Zwrócono uwagę na znaczenie procesu projektowania przy doborze mocy napędu głównego statków kontenerowych.

Słowa kluczowe

żegluga, okrętownictwo, transport morski, kontenerowiec, projektowanie, proces projektowania, metody obliczeniowe

Significance of design process when selecting the main drive power of the container ship

Abstract

This article presents selected methods of determining container's ship main drive power. Every single method was described and all necessary calculating algorithms were stated. The attention was paid on pros and cons of particular methods. Container's ship significant importance in shipping was pointed out, so was advancement and reasons behind emergence of it. Attention was also paid on the meaning of projecting process of selecting the Container's ship main drive.

Keywords

sailing, shipbuilding, shipping, container ship, projecting, projecting process, calculation methods

