Wykorzystanie analizy morfologicznej w opracowaniu koncepcji projektowej układu napędowego jednostki morskiej

Marcin Czubaszek

Politechnika Białostocka, Wydział Inżynierii Zarządzania

e-mail: marcin.czubaszek@pb.edu.pl

Andrzej Daniluk

Politechnika Białostocka, Wydział Inżynierii Zarządzania

e-mail: a.daniluk@pb.edu.pl

DOI: 10.65731/az-2026-0036

Streszczenie

Transport morski odgrywa współcześnie kluczową rolę w funkcjonowaniu gospodarki. Pozwala na przerzut dużych wolumenów towaru przy zachowaniu niskich kosztów. Równocześnie wysokie koszty ponosi środowisko, głównie ze względu na stosowane wysokoemisyjne paliwa oparte o ropę naftową, której ceny również rosną oraz cechują się wysokimi fluktuacjami. Celem artykułu jest opracowanie koncepcji projektowej układu napędowego morskiej jednostki transportowej z zastosowaniem analizy morfologicznej. Przeanalizowano takie elementy, jak: paliwo napędu głównego, rodzaj napędu pomocniczego opartego o wiatr, typy systemu smarowania powietrzem oraz stopień autonomizacji jednostki. Na etapie wyboru najlepszych rozwiązań posłużono się także analizą literatury, danych od producentów i obliczeniami z zakresu kosztów użycia paliw. Oceniano zachowanie operacyjności jednostki, stopień rozwinięcia technologii, koszty oraz ograniczanie negatywnego wpływu na środowisko przyrodnicze. Ostatecznie wybrano układ: metanol + żagle rotorowe + passive air lubrication systems (PALS) + jednostka typu „smart ship" jako obecnie prawdopodobnie najbardziej korzystny. Zidentyfikowano także konieczność dalszych badań w zakresie łączenia różnych typów rozwiązań tej samej kategorii (żagle rotorowe + żagle sztywne).

Słowa kluczowe

transport morski, napęd niskoemisyjny, analiza morfologiczna

Wstęp

Współczesna globalna gospodarka oparta jest w dużej mierze o transport morski. Jego płynność oraz skuteczność pozwala funkcjonować poprawnie międzynarodowym łańcuchom dostaw, co przekłada się na usprawnianie i minimalizację kosztów. Ważnym punktem są możliwości techniczne środków transportu, czyli statków transportowych oraz dostępności szlaków morskich, w szczególności wąskich gardeł. Transport morski, przy wymienionych zaletach, generuje także realne problemy związane z jego wpływem na środowisko. Od początku bieżącego stulecia wprowadzane są kolejne rozwiązania, których celem jest ograniczanie emisyjności statków transportowych. Równocześnie konieczne jest dbanie o utrzymanie sprawności operacyjnej, podnoszenie odporności i zachowanie ekonomiczności tej formy przerzutu dóbr.

Celem opracowania jest zaprezentowanie proponowanego układu napędowego rozumianego jako zespół powiązanych rozwiązań technologicznych stosowanych w ramach jednej jednostki. W analizie koncentrowano się na rozwiązaniach istniejących przynajmniej w formie prototypowej lub realnie rozważanej do wdrożenia, większość zaś została już zastosowana na faktycznych jednostkach morskich.

W pierwszej części artykułu opisano podstawowe założenia i problemy występujące w transporcie morskim. Pokrótce przedstawiono jego cechy oraz znaczenie dla rzeczywistości gospodarczej. Następnie szczegółowo omówiono metodykę stosowaną w badaniach oraz przedstawiono cele pracy. Ostatnia część stanowi prezentację wyników, czyli utworzonych macierzy morfologicznych, opis systemu złożonego z wybranych elementów oraz schematycznego projektu układu. Przedstawiono także szacowane korzyści wynikające z wprowadzenia rozwiązań.

1. Współczesny transport morski - przegląd literatury

Współczesna gospodarka globalna przypuszczalnie nie mogłaby istnieć w swojej obecnej formie bez sprawnie funkcjonującego transportu morskiego. Odpowiada on za około 80-90% wymiany handlowej, pozwala transportować w niskich cenach w przeliczeniu na jednostkę bardzo różne towary, w tym masowe, drobnicowe, energetyczne, skonteneryzowane czy wielkowymiarowe. Zakłada się, że roczna masa obiektów transportowanych statkami przekracza 10 miliardów ton [Schnurr i Walker, 2019, s. 2]. Jednymi z ważnych typów towarów są surowce energetyczne oraz płody rolne, stanowiące podstawę istnienia wielu państw. Wolumen towarów transportowanych drogą morską corocznie notuje wzrost [UNCTAD, 2024, s. 2-7].

Wskazuje to na istotność znaczenia transportu morskiego oraz konieczności utrzymania jego sprawności wraz z obiektami infrastruktury, takimi jak kanały oraz cieśniny [Czubaszek, 2024, s. 31-32]. Do napędu silników statków najczęściej stosowane są substancje takie jak ciężki olej opałowy (HFO), morski olej napędowy (MDO/MFO), ciężki olej opałowy o obniżonej zawartości siarki (LSFHO, dostosowany do norm IMO), które charakteryzują się wysoką emisyjnością substancji szkodliwych do atmosfery [Marquez, 2023, s. 15; Ashish], w tym CO_2 (około 3% antropogenicznych emisji w roku 2015 [Zittis i in., 2023, s. 442]), NO_X, SO_X [Schnurr i Walker, 2019, s. 5], cząstek PM, co prowadzi także do zakwaszania wód i eutrofizacji [Zittis i in., 2023, s. 442]. Do innych problemów zaliczyć można kolizje z akwafauną i florą, wycieki paliwa oraz ładunków, zanieczyszczenie dźwiękiem czy transport gatunków inwazyjnych [Czubaszek, 2022, s. 51].

Istnieje kilka głównych sposobów walki z negatywnym wpływem transportu morskiego. Jednym z podstawowych jest wprowadzanie paliw niskoemisyjnych, do których zaliczyć można metanol, LNG, paliwa wodorowe czy łączone, na przykład amoniak. Należy zauważyć, że stopień ich wdrażania jest bardzo różny, od coraz powszechniejszego wykorzystania LNG [Schnurr i Walker, 2019, s. 2], przez wprowadzanie pewnej liczby metanolowców przez Maersk po fazę prototypową, dotyczącą paliw wodorowych, czasem łączonych także z LNG [Lim, Hwang i Choi, 2024, s. 1]. Konieczne jest zwrócenie uwagi na mnogość perspektyw, jakie należy przyjąć, analizując wpływ konkretnych typów paliwa na środowisko. Najczęściej rozważanymi kwestiami pozostaje emisyjność w zakresie CO_2 i innych substancji szkodliwych, w szczególności tlenków azotu i siarki. Kolejnym aspektem jest produkcja i pozyskanie paliwa, a także procesy transportowe. Szczególnie w kontekście LNG kwestia ta jest poddawana poważnym dyskusjom ze względu na znaczące emisje metanu w różnym etapach procesu oraz degradację środowiska na etapie pozyskania wydobywczego.

Paliwa wodorowe, o ile teoretycznie nie wydzielają żadnych substancji szkodliwych (produktem spalania jest woda) [Figiel], wymagają jednak specyficznych warunków przechowywania (temperatura zbliżona do zera absolutnego, utrzymywanie wysokiego ciśnienia) oraz charakteryzują się łatwopalnością po zmieszaniu z innymi substancjami, w tym z powietrzem atmosferycznym [h2poland.eu]. Metanol stanowi kolejną propozycję, będąc stopniowo wdrażany w jednostkach CMA CGM i AP Moller-Maersk. Drugi z armatorów dąży obecnie do posiadania floty 25 metanolowców wraz z 20 statkami z napędem typu dual fuel LNG [Kukawska, 2024]. Paliwo to stanowi perspektywiczną opcję ze względu silne ograniczenie emisji większości wymienianych wcześniej substancji, mając w przypadku użycia biometanolu zmniejszyć wydzielanie gazów cieplarnianych do pułapu 35% [Kukawska, 2024].

Jedną z rozważanych, choć na razie niepopularnych, koncepcji jest wprowadzanie „żagli latawcowych", które wykorzystują stabilniejsze, silniejsze wiatry występujące na wyższych pułapach. Przyczepiona do pokładu czasza sterowana oraz rozkładana i składana jest automatycznie, zajmując minimalną przestrzeń pokładową, a także przez większość czasu pozostając pasywną energetycznie [Bordogna, 2020]. Dotychczas żagle takie znajdują zastosowanie na niewielkich, rekreacyjnych jednostkach (na przykład jachtach motorowych do 24 metrów, gdzie powierzchnia żagla LibertyKite wynosić ma 80 m^2) [kite-boat.com], jednak prowadzone są badania w zakresie umieszczenia ich na większych jednostkach.

Obecnie coraz więcej jednostek morskich wyposażanych jest w różnego rodzaju żagle pokładowe z materiałów sztywnych. Można do nich zaliczyć żagle sztywne oraz rotorowe. Pierwsze stanowią odpowiednio wyprofilowane płaszczyzny z tworzyw sztucznych. Wykorzystywać mogą one wiatry rufowe (pchające) lub działać na zasadzie podobnej do skrzydeł samolotów. Dzięki swojej budowie oraz wytwarzanej różnicy ciśnień tworzy się na nich siła ciągu, analogicznie do siły nośnej [futurefuels.imo.org]. Równocześnie są one w pełni zdalnie sterowane oraz mogą być składane w portach. Współcześnie istnieje wiele przedsiębiorstw specjalizujących się w produkcji i montażu żagli sztywnych, do których zaliczyć można firmy Wallenius i Alfalaval (inicjatywa Oceanbird) [oceanbird.com], Michelin w ramach projektu WISAMO (skrzydła pneumatyczne) [michelin.com], EcoMarinePower (system małych żagli połączonych z panelami fotowoltaicznymi) [ecomarinepower.com] czy BAR Technologies.

Ciekawą koncepcją są żagle rotorowe, wykorzystujące zjawisko Magnussa wywodzące się z mechaniki płynów, zastosowane po raz pierwszy w 1924 roku na statku „Buckau" [Seddiek i Ammar, 2021, s. 32696]. Siła ciągu wytwarzana jest dzięki obracającemu się walcowi (żaglowi rotorowemu, rotorowi, pędnikowi Flettnera) napędzanemu silnikiem elektrycznym [Kenyon, 2016, s. 49]. Żagle posiadają także dodatkowe elementy podnoszące efektywność działania, takie jak płaszczyzny Thoma, czy użyte w Turbożaglach (ang. Turbosails) stosowanych na Alcyone klapy sterujące przepływem powietrza [custeau.org]. Same pędniki mimo dużych wymiarów (do 35 metrów wysokości [norsepower.com]) nie wpływają znacząco na stabilność statku, działają w szerokim zakresie kąta padania wiatru (jedynie wiatr dziobowy nie wpływa pozytywnie na ich wykorzystanie) oraz mogą być składane w portach [Pearson, 2024, s. 4-6]. Należy podkreślić, że zarówno żagle sztywne, jak i rotorowe zajmują przestrzeń pokładową i wymagają w miarę możliwości swobodnego ruchu powietrza. Tym samym rzadko stosowane są na kontenerowcach lub niektórych zbiornikowcach, w których ładunek wykracza wysoko ponad pokład. [Pearson, 2024, s. 2]

Innym czynnikiem, wpływającym na ograniczenie zużycia paliwa jest system smarowania powietrzem jednostki (air lubrication systems – ALS) [SIEMENS]. Mimo, że rozwiązanie to nie obejmuje samego układu napędowego, pozwala na ograniczenie jego obciążenia. Zasadniczo omawiane rozwiązanie opiera się na wytworzeniu warstwy pęcherzyków powietrza pod kadłubem statku, które zmniejszają opór wody. Wyróżnić można dwie główne koncepcje, to jest klasyczny ALS, który opiera się na wymuszonym wtłaczaniu powietrza z wykorzystaniem sprężarek oraz system oparty o przepływ naturalny i pracę pomp PALS (passive ALS) [Scanvi Interyards SA]. Zastosowanie systemów smarowania powietrzem obniżać ma zużycie paliwa od 5% do 10% [Sieja]. Równie ważną kwestią dla optymalizacji wykorzystania urządzeń okrętowych oraz podnoszenia bezpieczeństwa rejsu jest sposób zarządzania jednostką. Dotyczy to stopnia wsparcia pracy załogi systemami zdalnymi, automatycznymi lub autonomicznymi [Chaal i in., 2023, s. 1]. Najmniejszym stopniem przekształcenia jest jednostka typu „smart ship", w której automatyzuje się niektóre procesy, wprowadza systemy monitoringu i automatycznej detekcji zagrożeń czy zarządzania statkiem dla podniesienia wygody załogi. „Smart ship" wspiera procesy decyzyjne oraz zapewnia wzrost świadomości operacyjnej, jednak wszelkie decyzje nadal pozostawione są ludziom obecnym na pokładzie.

2. Metodyka badań

Celem głównym pracy jest przedstawienie przykładu jak najkorzystniejszego układu napędowego, rozumianego jako powiązane ze sobą wybrane modyfikowalne elementy wpływające bezpośrednio na możliwość i sposób przemieszczania się statku transportowego, z perspektywy ograniczenia negatywnego wpływu na środowisko przyrodnicze, zachowania operacyjności, ekonomiki oraz ograniczenia ryzyka. Celem o charakterze metodologicznym jest zaprezentowanie możliwości stosowania analizy morfologicznej w zakresie transportu morskiego. W badaniach zastosowano przegląd literatury naukowej, popularnonaukowej, artykułów prasowych oraz informacyjnych z zakresu dotyczącego transportu morskiego oraz powiązanych aspektów. Do wyciągnięcia wniosków wykorzystano metodę konstrukcji logicznej. Na etapie oceny rozwiązania oszacowano korzyści z użyciem narzędzia symulacyjnego od Lloyd's Register.

Główną metodą analityczną jest analiza morfologiczna. Jest to metoda o charakterze analityczno-intuicyjnym, opracowana przez F. Zwicky'ego, choć stosowana już znacząco wcześniej. Jej głównym założeniem jest podział złożonego problemu na mniejsze podproblemy oraz rozwiązywanie każdego z nich. Metoda ta znajduje szerokie zastosowanie w tworzeniu rozwiązań inżynierskich. [Kielec, 2016, s. 134]

Stosuje się do tego macierz morfologiczną, która obrazuje możliwe do wprowadzenia rozwiązania kolejnych podproblemów. [Barczak i Bińczycki, 2016, s. 75-76] W przypadku niniejszego opracowania, problem główny został sformułowany następująco: „Jaki powinien być układ napędowy jednostki transportu morskiego, jeśli dąży się od ograniczenia jej negatywnego wpływu na środowisko, przy zachowaniu operacyjności oraz ekonomiczności?". Pozwoliło to wyodrębnić 4 podproblemy odpowiadające podejściom opisanym w poprzednim rozdziale. Rozwiązania oparto o istniejące technologie.

3. Wyniki badań

Problem główny rozbity został na cztery podproblemy, w których przeanalizowano opisane we wcześniejszej części artykułu propozycje ograniczenia negatywnego wpływu transportu morskiego na środowisko:

1. Rodzaj paliwa napędu głównego (BioLNG, Metanol, Wodór, Amoniak)
2. Rodzaj napędu pomocniczego (Żagle rotorowe, Żagle sztywne, Żagle latawcowe, Żagle typu „sucction wing", Brak napędu pomocniczego)
3. System smarowania powietrzem (Standardowy ALS, Pasywny ALS, Brak ALS)
4. Poziom autonomizacji (Jednostka załogowa tradycyjna, Jednostka typu „smart ship", Jednostka zdalnie sterowana, Jednostka autonomiczna)

W przypadku podproblemów 2, 3 i 4 jednym z rozwiązań jest brak wprowadzania nowej technologii. Podproblem 1 nie został w tym kontekście przeanalizowany, ponieważ pozostawanie przy klasycznym paliwie wyklucza innowacyjność rozwiązania, a także znacząco ogranicza zyski środowiskowe.

Wyniki dotyczące podziału problemu głównego na podproblemy zaprezentowano w postaci macierzy morfologicznej (tab 1).

Tab. 1. Macierz morfologiczna

Paliwo napędu głównego (silnikowego)	BioLNG	Metanol	Wodór	Amoniak	
Rodzaj napędu pomocniczego (żaglowego)	Żagle rotorowe	Żagle sztywne	Żagle latawcowe	Żagle typu „sucction wing"	Brak napędu pomocniczego
System smarowania powietrzem	Standardowy ALS	Pasywny ALS	Brak ALS		

Poziom autonomizacji	jednostka załogowa tradycyjna	jednostka typu „smart ship”	jednostka zdalnie sterowana	Jednostka autonomiczna

Źródło: opracowanie własne.

Pierwszy z podproblemów dotyczył wyboru paliwa do napędu głównego. Ze względu na generalne cele rozważano jedynie substancje o charakterze ekologicznym. Jednak również ta decyzja ma charakter wielowymiarowy, co wymaga uwzględnienia szeregu czynników (tab. 2).

Tab. 2. Czynniki wpływające na wybór paliwa głównego

Rodzaj paliwa	**BioLNG**	**Wodór**	**Amoniak**	**Metanol**
Przybliżona gęstość energetyczna [MJ/dm^3]	11	6	6,5	15,6
Sposób przechowywania	Przechowywany w około 110 K	Skroplony w temperaturze około 20 K lub pod ciśnieniem 70 MPa	Skroplony w temperaturze około 240 K lub pod ciśnieniem 0,9 MPa	Standardowy
Ograniczenie emisji	92%	100% (z perspektywy LCA zależne jest to od sposobu wytwarzania/pozyskania wodoru)	100% (z perspektywy LCA zależne jest to od sposobu wytwarzania/pozyskania wodoru oraz azotu i oczyszczania paliwa)	60-95% (pod warunkiem korzystania z „zielonego metanolu)
Cena za kg [zł] (wartości szacunkowe różnych dostawców)	5,83, około 5-6,5	28,35	1,82, 1,96	4,29, 2,26
Inne aspekty	W przypadku stosowania zwykłego LNG prawdopodobny wzrost emisji metanu; wymaga posiadania dużej ilości substratów	Zmieszany z powietrzem skrajnie wybuchowy; może być stosowany jako paliwo silnikowe lub w formie ogniw	Pochodna wodoru o podobnych właściwościach, zagrożenia związane z wprowadzaniem związków azotu, w tym N_2O	Poziom jego korzystności środowiskowej zależny jest od sposobu produkcji

Rodzaj paliwa	BioLNG	Wodór	Amoniak	Metanol
	do biogazowania			

Źródło: opracowanie własne na podstawie [SEA-LNG, 2022, s. 4; Marquez, 2023, s. 8; CORDIS KE, s. 13; Stefaniak, 2023; European Hydrogen Observatory, observatory.clean-hydrogen.europa.eu/hydrogen-landscape/production-trade-and-cost/cost-hydroge; Chemia i Biznes, www.chemiaibiznes.com.pl/artykuly/co-slychac-na-rynku-amoniaku; businessalaytIQ, businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/ammonia-price-index/; Methanex, www.methanex.com/about-methanol/pricing/; IEA Bioenergy, 2020, s. 2; Gospodarka Morska, www.gospodarkamorska.pl/amoniak-przyciaga-branze-zeglugowa-ale-naukowcy-ostrzegaja-przed-zagrozeniami-z-nim-zwiazanymi-76197].

Na podstawie dokonanego zestawienia (tab. 2), za najbardziej perspektywiczny uznano metanol. Wynika to z wysokiej gęstości energetycznej, która przekłada się na ilość substancji potrzebnej do zastąpienia paliw kopalnych, utrzymywania stosunkowo niskiej ceny, łatwości w przechowywaniu, niskiego ryzyka środowiskowego. Korzyść środowiskowa zależna jest od sposobu produkcji, jednak w mniejszym stopniu występuje ryzyko eksplozji występującej w przypadku wodoru, emisji szkodliwego metanu przy transporcie LNG, czy związków azotu, jakie występują w przypadku amoniaku.

W przypadku drugiego podproblemu przeanalizowano scharakteryzowane wcześniej różne formy napędu pomocniczego z ich uzupełnieniem o dodatkowe czynniki (tab. 3).

Tab. 3. Czynniki wpływające na wybór napędu pomocniczego

Rodzaj WASP	Żagle rotorowe	Żagle sztywne	Żagle latawcowe	Żagle typu „suction wing"
Najkorzystniejszy typ wiatru	Burtowy	Rufowy lub burtowy (zależnie od konstrukcji)	Rufowy	Burtowy
Wymagają stałego zasilania?	Tak	Nie	Nie	Tak
Uniwersalność	Ograniczona	Ograniczona	Pełna	Ograniczona
Liczba jednostek (dane na rok 2023)	38	16	3	44
Szacowane ograniczenie zużycia paliwa	6-30%	10-30%	20%	4,5% Deklaratywnie 60%

Źródło: opracowanie własne na postawie [Kołodziejski i Sosnowski, 2025, s. 8; Norsepower, www.norsepower.com/bulk-carrier/; Econowind, econowind.nl/how-does-it-work/; EcoMarinePower, www.ecomarinepower.com/en/rigid-sails-and-solar-power-for-ships].

4. Dyskusja wyników

Przedstawione zestawienia nie wskazują na jednoznaczne rozwiązanie podproblemu. Każdy z możliwych scenariuszy posiada pewien zbiór korzyści. Teoretycznie połączenie różnych koncepcji mogłoby stanowić złoty środek. Żagiel latawcowy - na przykład - w optymalnych warunkach może wspierać działanie innych typów napędu. W tym przypadku pojawia się jednak ryzyko zawadzenia o wysokie elementy, które stanowią pozostałe rodzaje żagli. Z kolei żagle sztywne pewnych konstrukcji najlepiej sprawdzają się przy wietrze rufowym, zaś pozostałe propozycje uzyskują większą korzystność dla wiatrów burtowych. Pod kątem badania odrzucono koncepcję żagli latawcowych jako technologii pozostającej na niskim poziomie rozwoju. W przypadku żagli typu „sucction wing" obawy wzbudza różnica między wartościami rzeczywistymi i deklaratywnymi, a także, podobnie jak przy żaglach sztywnych, konieczność występowania odpowiednio silnych, stabilnych wiatrów. Ponadto żagle sztywne same w sobie stanowią stosunkowo szeroką gamę rozwiązań, które podlegać powinny dalszym badaniom. Z tego powodu na potrzeby dalszej analizy zdecydowano się na wybór żagli rotorowych. Do rozwiązaniu podproblemu 3 podjęto decyzję o wyborze PALS ze względu na podobieństwa do zwykłego ALS pod kątem ograniczania zużycia paliwa poprzez zmniejszanie oporów statku przy równoczesnym ograniczeniu zapotrzebowania energetycznego i mniejszej awaryjności pomp względem sprężarek [Scanvi Interyards SA].

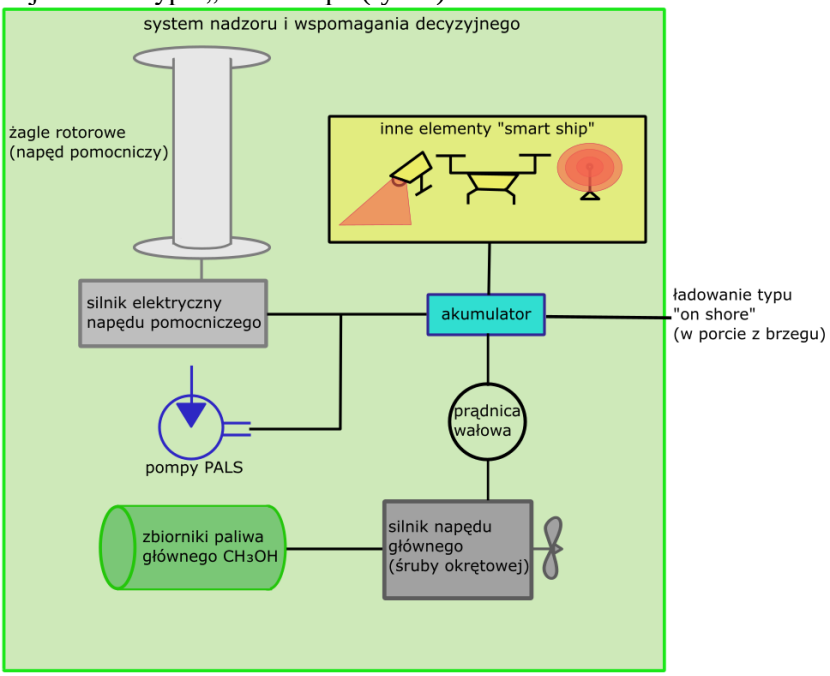
W ramach podproblemu 4 wybrano stosunkowo bezpieczne rozwiązanie opracowania jednostki typu „smart ship" jako z jednej strony podnoszącej wygodę i bezpieczeństwo w zakresie sterowania oraz obsługi statku, z drugiej zaś nie wymagającej bardzo dużych zmian czy stosowania niesprawdzonych, ryzykownych technologii. Jednostki zdalnie sterowane zależne są silnie od utrzymywania stałego, ustabilizowanego połączenia. Z kolei statki autonomiczne mogą zachowywać się nieprzewidywalnie oraz trudno określić jak reagować będą w nowych sytuacjach. Obecna technologia pojazdów bezzałogowych sprawdzać może się przy niedużych obiektach, jednak ryzyko katastrofy wynikającej z błędu oprogramowania w przypadku ogromnego statku transportowego, w szczególności podczas manewrowania w porcie lub kanale jest niemożliwe do zlekceważenia. Przeprowadzone rozważania pozwoliły opracować finałową macierz morfologiczną (tab. 4).

Tab. 4. Ostateczna macierz morfologiczna

Paliwo napędu głównego (silnikowego)	LNG	Metanol	Wodór	Amoniak	
Rodzaj napędu pomocniczego (żaglowego)	Żagle rotorowe	Żagle sztywne	Żagle latawcowe	Żagle typu „sucction wing”	Brak napędu pomocniczego
System smarowania powietrzem	Standardowy ALS	Pasywny ALS	Brak ALS		
Poziom autonomizacji	jednostka załogowa tradycyjna	jednostka typu „smart ship”	jednostka zdalnie sterowana	Jednostka autonomiczna	

Źródło: opracowanie własne.

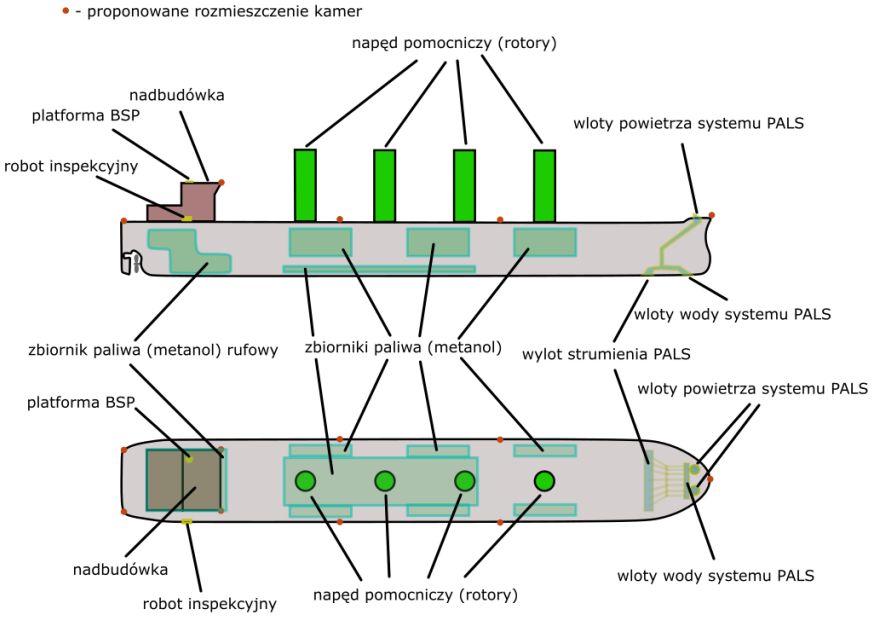
Opracowano także ideowy schemat układu łączącego w sobie przedstawione propozycje w ujęciu powiązań systemu, w tym elementy mogące wchodzić w cały ekosystem jednostki typu „smart ship” (rys. 1).



Rys. 1. Schemat proponowanego układu napędowego i zarządczego jednostki

Źródło: opracowanie własne.

Uzupełnieniem tych rozważań jest przedstawiona w uproszczonej formie propozycja rozmieszczenia elementów na jednostce pływającej w oparciu o sylwetkę statku klasy Kamsarmax (rys. 2).



Rys. 2. Propozycja rozmieszczenie elementów układu napędowego

Źródło: opracowanie własne na podstawie [flettner.org, 19.04.2026]

Opracowana propozycja stanowi jedynie uproszczoną koncepcję. W praktyce elementy układu należy dostosować do jednostki, sposobu operowania i ogólnych potrzeb, na przykład poprzez wprowadzanie różnej liczby lub rozmieszczenia żagli rotorowych.

W dalszej części w ujęciu tabelarycznym (tab. 5) przedstawiono szacowane korzyści wynikające z wprowadzeniu układu analogicznego do zaproponowanego (rys. 2). Procentową oszczędność paliwa oszacowano jako wartość opartą o sumę oszczędności z wykorzystania rotoru oraz uzyskaną dzięki zmiennej konfiguracji. Szacunkowe całkowite ograniczenie emisji zostało określone dla wartości ograniczenia emisji na skutek wykorzystania metanolu na poziomie 80%.

Tab. 5. Szacowane skutki wdrożenia układu

Czynnik	Wartość
Ograniczenie emisji	paliwo: 60-95%; żagle rotorowe: 5,4%; PALS: do 10% Szacunkowe całkowite: około 92,7%
Przeciętna miesięczna oszczędność zużycia paliwa (ilość) [t]	63
Oszczędność miesięczna zużycia paliwa (wartość) [zł]	270 270
Komfort załogi	Podniesiony dzięki lepszej kontroli warunków sanitarnych oraz większej świadomości sytuacyjnej
Bezpieczeństwo	Podniesione dzięki automatycznym, dodatkowym systemom detekcyjnym oraz kontrolnym
Wpływ na operacyjność jednostki	Konieczne zmiany organizacyjne w zakresie bunkrowania paliwa
Zagrożenie środowiskowe	Zmniejszone: metanol w razie wycieku charakteryzuje się mniejszą szkodliwością niż paliwa ropopochodne
Dostępność paliwa w przyszłości	Zielony metanol może być produkowany w bezpośredniej bliskości portów; przewiduje się zmniejszenie jego kosztów oraz zwiększenie dostępności wraz ze wzrostem popytu

Źródło: opracowanie własne na podstawie wcześniej prezentowanych danych oraz symulacji z wykorzystaniem [flettner.org, 19.04.2026].

Przedstawione charakterystyki obrazują korzyści związane z wprowadzeniem układu. Przy jego modyfikacjach zajdą zmiany konkretnych wartości, jednak ogólne kierunki korzyści zostaną zachowane. Tym samym cel związany z ograniczeniem negatywnego wpływu na środowisko w połączeniu z zachowaną operacyjnością uznać należy za spełniony.

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza stanowi przykład połączenia ze sobą istniejących już technologii w ramach układu napędowego. Należy podkreślić, że o ile nie ma ona charakteru projektu technicznego, o tyle może stanowić za podstawę do opracowania faktycznej koncepcji wdrożenia tego rozwiązania w nowej lub tworzonej jednostce. Dotychczasowe propozycje ograniczały się do jednego lub dwóch elementów o charakterze prośrodowiskowym, z reguły koncentrując na łączeniu ze sobą bardziej ekologicznego paliwa napędu głównego i dodatkowego napędu typu WASP/WAPS (na przykład M/V Estraden na mieszankę o ograniczonej emisji) [BORE]. Podejście to nie wydaje się być wystarczające z perspektywy zbliżających

się celów klimatycznych. Tym samym propozycja połączenia ze sobą trzech różnych technologii bezpośrednio wpływających na emisyjność napędu ze wsparcie nowoczesnego systemu zarządzania podnoszącego sprawność i bezpieczeństwo żeglugi stanowi innowacyjne, dotychczas nieprezentowane szeroko podejście.

Z perspektywy utylitarnej cel główny, jakim było opracowanie koncepcji układu napędowego ograniczającego negatywny wpływ na środowisko z zachowaniem operacyjności i korzyści ekonomicznych został osiągnięty. Metanol spośród innych paliw niskoemisyjnych jest najbardziej stabilny, najmniej szkodliwy oraz posiada wysoką gęstość energetyczną (w dalszym ciągu znacznie niższą niż paliwa oparte o ropę), a także może być w łatwy sposób produkowany. Żagle pomocnicze dowolnego typu i system PALS dodatkowo ograniczają zużycie paliwa, a przez to czynią jego stosowanie bardziej ekonomicznym. Z kolei jednostka typu „smart ship" z zaproponowanymi elementami gwarantuje wzrost bezpieczeństwa, efektywności i komfortu obsługi statku, który nadal jest w pełni zależny od ludzkiej załogi.

Również zastosowanie analizy morfologicznej stanowi perspektywiczny kierunek w zakresie badań układów napędowych statków transportowych. Pozwoliła ona nie tylko na bardziej racjonalny wybór elementów systemu, ale także usystematyzowanie proponowanych rozwiązań, co wpływa pozytywnie na walory analityczne. Umożliwiła także na zidentyfikowanie obszarów, które wymagają zbadania, takie jak możliwość integracji różnych typów napędu pomocniczego. Równocześnie napotkanym problemem stała się różnorodność technologii we wspomnianym zakresie, a także kwestia możliwe jak najbardziej obiektywnej oceny.

ORCID iD

Marcin Czubaszek: https://orcid.org/0009-0000-2368-0449

Andrzej Daniluk: https://orcid.org/0000-0002-3791-109X

Literatura

1. airseas.com, https://airseas.com/en/new-technical-milestone-seawing-kite-tows-ships/ [15.03.2025].
2. alfalaval.pl, *OceanGlide*, https://www.alfalaval.pl/produkty/rozwiazania-procesowe/fluidalne-smarowanie-powietrzem/oceanglide/ [6.04.2025].
3. Ashish S., *Properties and Specifications od LSHFO, MDO and HFO used for Main Engine, and auxiliary engine*, https://marinersgalaxy.com/properties-and-specifications-lshfo-mdo-hfo-used-main-engine-auxiliary-engine/ [14.02.2025].

4. BAR Technologies, *Pyxis Ocean*, https://www.bartechnologies.uk/project/pyxis-ocean/ [30.03.2025].
5. BORE, //bore.eu/bore-fleet/vessel/m-v-estraden/ [20.03.2025].
6. Bordogna G. (2020) *Aerodynamics of Wind-Assisted Ships Interaction Effects on The Aerodynamic Performance of Multiple Wind-Propulsion Systems*, rozprawa doktorska na Delft Unversity of Technology.
7. businessalaytIQ, *Ammonia price index*, https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/ammonia-price-index/ [7.06.2025].
8. Chaal M., Ren X., BahooToroody A., Basnet S., Bolbot V., Banda O. A. V., Gelder P. V. (2023) *Research on risk, safety, and reliability of autonomous ships: A bibliometric review*, Safety Science, nr 167, pp. 1-18.
9. Chemia i Biznes, *Grupa Azoty Police dokonała podsumowania aktualnej sytuacji na światowym rynku amoniaku.*, https://www.chemiaibiznes.com.pl/artykuly/co-slychac-na-rynku-amoniaku [7.06.2025].
10. CORDIS KE, *Waterborne transport for green future* [dokument elektroniczny] https://publications.europa.eu/resource/cellar/cbbb70a7-247f-11ef-a195-01aa75ed71a1.0001.01/DOC_1
11. cousteau.org, *Cousteau's Alcyone*, https://www.cousteau.org/legacy/vessels/alcyone/ [4.05.2025].
12. Czubaszek M. (2022), *Biel żagli na horyzoncie?* w: Rafalska D., Lewińska T. EkoStudent. Publikacja podsumowująca, Fundacja na rzecz Jakości Kształcenia, Warszawa, pp. 51-56.
13. Czubaszek M. (2024), *Wybrane problemy w transporcie morskim* w: Ejdys S. (red.) *Transport i Logistyka w XXI wieku. Wybrane problemy*, Wydawnictwo RYS, Poznań 2024, pp. 25-38.
14. EcoMarinePower, https://www.ecomarinepower.com/en/about-us [30.03.2025].
15. Econowind, https://econowind.nl/how-does-it-work/ [30.03.2025].
16. EPA, *Understanding Global Warming Potentials*, https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials [1.03.2025]
17. European Hydrogen Observatory, *Cost of hydrogen production*, https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/hydrogen-landscape/production-trade-and-cost/cost-hydrogen [7.06.2025].
18. Futurefuels.imo.org, *What are rigid/hard wing sails and how do they work?*, https://futurefuels.imo.org/faq/what-are-rigid-hard-wing-sails-and-how-do-they-work/ [30.03.2025].
19. Gospodarka Morska, *Amoniak przyciąga branżę żeglugową, ale naukowcy ostrzegają przed zagrożeniami z nim związanymi*, https://www.gospodarkamorska.pl/amoniak-

przyciaga-branze-zeglugowa-ale-naukowcy-ostrzegaja-przed-zagrozeniami-z-nim-zwiazanymi-76197 [7.06.2025].
20. *Huti atakują statki. Ceny transportu uderzą w klientów*, Money.pl,Tryb dostępu https://www.money.pl/gospodarka/huti-atakuja-statki-ceny-transportu-uderza-w-klientow-6983945412811264a.html [5.01.2025].
21. IEA Bioenergy (2020), *Green methanol from biogas in Denmark*, https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/12/Case-Story-DK_-Green-Methanol_web-1.pdf.
22. Interreg. North Sea Region (2023), *Wind Assisted Ship Propulsion "WASP",* https://vb.northsearegion.eu/public/files/repository/20230817094604_WASP-Educationalmaterial2-final.pdf, s. 1.
23. Kenyon K. E. (2016), *On the Magnus Effect*, Natural Science, nr 8, pp. 49-52.
24. Kielec R. (2016), *Analiza i ocena prototypowego projektu automatycznego stanowiska do odmuchiwania elementów aluminiowych po obróbce skrawaniem w wybranym przedsiębiorstwie*, w: Knosala R. (red.) *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, Opole, pp. 129-142.
25. Kite Boat, https://www.kite-boat.com/en/products/wingcommander-rc-en [13.03.2025].
26. Kołodziejski M., Sosnowski M. (2025), *Review of Wind-Assisted Propulsion Systems in Maritime Transport*, Energies, nr. 18, pp. 1-33.
27. Kukawska K. (2025), *Metanolowy olbrzym ochrzczony! A w planach kolejne!* https://obserwatorlogistyczny.pl/2024/01/29/maersk-ochrzcil-pierwszy-duzy-kontenerowiec-na-metanol/ [13.03.2025].
28. Kuś Ł. (2024), *Branża morska stawia na LNG, ale wyzwaniem są emisje metanu*, https://intermodalnews.pl/2024/01/26/branza-morska-stawia-na-lng-ale-wyzwaniem-sa-emisje-metanu/ [2.03.2025].
29. Li B., Zhang R., Li Y., Zhang B., Guo C. (2021) *Study of a New Type of Flettner Rotor In Merchant Ships*, Polish Maritime Research, 28, pp. 28-41.
30. Lim T.-W., Hwang D.-H., Choi Y.-S. (2024) *Design and optimization of a steam methane reformer for ship-based hydrogen production on LNG-fueled ship*, Applied Thermal Engineering 243.
31. *LNG budzi obawy. W tle zagrożenie metanem i klimat*, Urban K., https://smoglab.pl/lng-budzi-obawy-w-tle-zagrozenie-metanem-i-klimat/ [1.03.2025].
32. Marquez C. (2023), *Marine Methanol*, Methanol Institute *Future-Proof Shipping Fuel*, https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2023/05/Marine_Methanol_Report_Methanol_Institute_May_2023.pdf [1.02.2025].
33. Methanex, *Pricing*, https://www.methanex.com/about-methanol/pricing/ [7.06.2025].
34. Michelin, wisamo.michelin.com, https://wisamo.michelin.com/ [30.03.2025].
35. Norsepower, https://www.norsepower.com/bulk-carrier/ [20.03.2025].

36. Oceanbird, oceanbird.com, https://www.theoceanbird.com/ [30.03.2025].
37. Pearson D. (2024) The use of Flettner rotors in efficient ship design, „Influence of EEDI on Ship Design".
38. *Perspektywy energetyki wodorowej* Figiel H., https://www.fis.agh.edu.pl/home/wfiis/wfiis/doc/pl/seminarium/figiel.pdf [2.03.2025].
39. PGNING, *LNG i jego szerokie zastosowanie*, https://pgnig.pl/lng [24.02.2025].
40. Portalmorski.pl, *Pół wieku konwencji MARPOL*, https://www.portalmorski.pl/prawo-polityka/54261-pol-wieku-konwencji-marpol [5.02.2025].
41. Royal Museum Greenwich, *Great Eastern*, https://www.rmg.co.uk/stories/topics/great-eastern [1.02.2025].
42. Scanvi Interyards SA, *Compressor-free hull air lubrication armada technologies*, https://scanvi-interyards.no/als/ [14.05.2025].
43. Schnurr R. E. J., Walker T. R. (2019), *Marine Transportation and Energy Use*, Earth Systems and Environmental Sciences, pp. 1-8.
44. SEA-LNG, *The role of bio-lng inthe decarbonisation of shipping*, https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2022/10/SEA-LNG_BioLNG-Study-Key-Findings-Document_October-2022_amended.pdf.
45. Seddiek I. S., Ammar N. R. (2021), *Harnessing wind energy on merchant ships: case study Flettner rotors onboard bulk carriers*, Environmental Science and Pollution Research, pp. 32695–32707.
46. Sieja B., *Przełom w transporcie morskim. Maersk wyposaży swoje okręty w nowy system smarowania*, https://www.komputerswiat.pl/aktualnosci/biznes/przelom-w-transporcie-morskim-maersk-wyposazy-swoje-okrety-w-nowy-system-smarowania/y0nx0yz [6.04.2025].
47. SIEMENS, *Analiza systemów ALS redukujących opór tarcia z wykorzystaniem metod CFD*, https://resources.sw.siemens.com/pl-PL/white-paper-ship-drag-reduction/ [6.04.2025].
48. Stefaniak P. (2023), *Nie każdy metanol zmniejszy emisję CO2*, https://intermodalnews.pl/2023/08/23/nie-kazdy-metanol-zmniejszy-emisje-co2-statkow/ [7.06.2025].
49. Stefaniak P. (2023), *Nie ma przełomu w dekarbonizacji transportu morskiego* https://intermodalnews.pl/2023/09/21/nie-ma-przelomu-w-dekarbonizacji-transportu-morskiego/ [7.02.2025].
50. Titan LNG, witryna przedsiębiorstwa, https://titan-cleanfuels.com/ [1.03.2025].
51. UNCTAD,*Review of maritime transports 2024*, https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2024_en.pdf [11.12.2024].

52. Walker T. R., Adebambo O., Del M., Feijoo A., Elhaimer E., Hossain T., Edwards S., Morrison C., Romo J., Sharma N., Taylor S., Zomorodi S. (2019), *Environmental Effects of Marine Transportation*, World Seas: An Environmental Evaluation. Volume III: Ecological Issues and Environmental Impacts 3, pp. 505-530.
53. *Zbiorniki na wodór*, H2poland.eu, https://h2poland.eu/pl/kategorie/przesyl-magazynowanie/zbiorniki-na-wodor/zbiorniki-na-wodor/ [2.03.2025].
54. Zittis G., Ahrens B., Obermann-Hellhund A., Giannakis E., Rosto D., Gamez A., Jorda G., Pena M., Rodrigeuz V., Sauret J (2023), *Maritime transport and regional climate change impacts in large EUislands and archipelagos*, „Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration 8, pp. 440-454.

The Use of Morphological Analysis in Developing a Design Concept for the Propulsion System of a Marine Vessel

Abstract

Maritime transport currently plays a key role in the functioning of the economy. It enables the movement of large volumes of goods while maintaining low costs. At the same time, however, the environment bears high costs, mainly due to the use of high-emission petroleum-based fuels, whose prices are also rising and subject to considerable fluctuations.
The aim of the article is to develop a design concept for the propulsion system of a maritime transport vessel using morphological analysis. The study analysed such elements as the main propulsion fuel, the type of wind-based auxiliary propulsion, types of air lubrication systems, and the degree of vessel autonomisation. At the stage of selecting the most suitable solutions, the study also used literature analysis, manufacturers' data, and calculations concerning fuel-use costs. The assessment covered the maintenance of vessel operability, the level of technological maturity, costs, and the reduction of negative environmental impact. Ultimately, the configuration consisting of methanol, rotor sails, passive air lubrication systems (PALS), and a smart ship was selected as currently probably the most advantageous solution. The need for further research into combining different types of solutions within the same category, such as rotor sails and rigid sails, was also identified.

Key words

maritime transport, low-emission propulsion, morphological analysis