

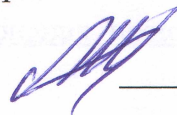
Міністерство освіти і науки України

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Машинобудівний навчально-науковий інститут

Кафедра експлуатації суднових
енергетичних установок та
теплоенергетики

«Допущений до захисту»

В.о. зав. кафедрою



Личко Б.М.
2024 р.

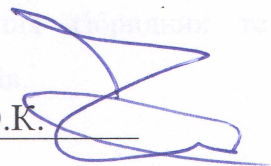
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

Тема роботи *Аналіз можливостей застосування гібридних
технологій перетворення енергії в
енергетичних установках суден газозовів*

Розрахунково-пояснювальна записка

Керівник роботи

Професор Чередніченко О.К.



Студент групи

6211м

Стельмах О.І.



Миколаїв 2024

Міністерство освіти, науки молоді та спорту України
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Ка експлуатації суднових та стаціонарних енергетичних установок

Ступінь	магістр
Галузь знань	13 «Механічна інженерія»
Спеціальність	135 «Суднобудування»
Освітня програма	«Суднові енергетичні установки та устаткування»

"ЗАТВЕРДЖУЮ"
Завідувач кафедри проф.
Б. М. Личко
" " 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську атестаційну роботу

Стельмах Олександр Ігорович

(Прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи "Аналіз можливостей застосування гібридних технологій перетворення енергії в енергетичних установках суден газозовів"

затверджена наказом по університету від " " 20 р. №

2. Мета дослідження визначення енергоефективності пропульсивних комплексів суден газозовів з застосуванням гібридних технологій перетворення енергії

3. Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

- об'єктом дослідження є суднова установка сучасного газозову;
- предметом дослідження є процеси перетворення енергії в судновій енергетичній установці;
- науково-технічний результат дозволяє проаналізувати можливості застосування гібридних технологій перетворення енергії в енергетичних установках суден газозовів

4. Основні задачі дослідження:

- проаналізувати вимоги ІМО щодо енергоефективності транспортних суден, розглянути показники, що впливають на індекс EEDI суден газозовів;
- виконати аналіз існуючих гібридних технологій перетворення енергії в енергетичних установках суден;
- проаналізувати можливості ефективного застосування гібридних технологій перетворення енергії в енергетичних установках суден газозовів.

5. Дата видачі завдання: вересня 2024 р.

6. Термін подання роботи до захисту 01 грудня 2024 р.

5. Розділи роботи

Вступ

Розділ 1 Аналіз сучасного флоту суден газозовів та головні характеристики пропульсивних установок таких суден. Загальна характеристика газозову-прототипу

Розділ 2 Аналіз існуючих та перспективних гібридних технологій для суднових енергетичних установок

Розділ 3 Аналіз можливості застосування гібридної енергетичної установки з паливними елементами для судна-прототипа

Розділ 4 Розрахунок показників індексу EEDI суднової установки газозову з впровадженням гібридних технологій

Висновки

Література

6. Консультанти розділів проекту

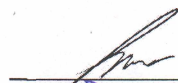
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	"Завдання видав"		"Завдання прийняв"	
		Підпис	Дата	Підпис	Дата
6					

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання	Примітка
1	Уточнення та погодження з керівником і консультантами розділів дипломної роботи		
2	Рукопис розділу 1		
3	Рукопис розділу 2		
4	Рукопис розділу 3.		
5	Рукопис розділу 4		
6	Рукопис розділу 5		
7	Оформлення записки та графічного матеріалу; підписання консультантами та подання на кафедру		

Завдання прийняв до виконання

Науковий керівник



Стельмах О.І.



Чередніченко О.К.

Анотація

Кваліфікаційна робота складається з пояснювальної записки обсягом 120 с. на аркушах формату А4 та 7-ох креслень формату А1.

У першому розділі наведений загальний аналіз флоту газовозів та основні характеристики сучасного газовозу-прототипа.

У другому розділі було проведено аналіз стратегії ІМО щодо зменшення шкідливих викидів в довкілля та методів їх зменшення шляхом введення гібридних технологій в склад пропульсивної установки судна. Окрім цього було розглянуто різні види акумуляторів та паливних елементів та серед них обрано найбільш підходящі.

У третьому розділі проведено аналіз було проведено розрахунок буксирувальної потужності та опору судна, обрано новий склад СЕУ та нові режими роботи судна. Розраховано теплові потоки, розроблено розрахункові схеми перетворення енергії в СЕУ. Додатково було розраховано ККД та КВТ для основних режимів роботи.

У четвертому розділі було розраховано та порівняно значення індексу EEDI до та після впровадження гібридних технологій.

Ключові слова: газовоз, гібридні технології, пропульсивна установка, акумулятори, паливні елементи, індекс EEDI.

Abstract

The qualification thesis consists of an explanatory note comprising 120 pages on A4 sheets and 7 drawings in A1 format.

The first section provides a general analysis of the LNG carrier fleet and the main characteristics of a modern prototype LNG carrier.

The second section analyzes the IMO strategy for reducing harmful emissions into the environment and the methods of their reduction through the integration of hybrid technologies into the ship's propulsion system. Additionally, various types of batteries and fuel cells were considered, with the most suitable options selected.

In the third section, the towing power and ship resistance were calculated, a new composition of the ship's energy unit (SEU) was selected, and new operational modes were defined. Heat flows were calculated, and energy conversion schemes within the SEU were developed. Furthermore, the efficiency (η) and specific fuel consumption (SFC) for key operating modes were determined.

In the fourth section, the Energy Efficiency Design Index (EEDI) values were calculated and compared before and after the implementation of hybrid technologies.

Keywords: LNG carrier, hybrid technologies, propulsion system, batteries, fuel cells, EEDI index.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
Розділ 1. Аналіз сучасного флоту суден газовозів та головні характеристики пропульсивних установок таких суден. Загальна характеристика газовозу-прототипу	6
1.1. Аналіз сучасного флоту суден газовозів та головні характеристики пропульсивних установок таких суден	6
1.2. Загальні відомості про судно-прототип та його основні характеристики ...	17
Розділ 2 Аналіз існуючих та перспективних гібридних технологій для суднових енергетичних установок.....	25
2.1. Аналіз стратегії ІМО щодо зменшення шкідливих викидів	25
2.2. Аналіз існуючих рішень задоволення сучасних екологічних вимог	31
2.3. Аналіз характеристик різних типів акумуляторних батарей для пропульсивного комплексу	37
2.4. Аналіз характеристик різних типів паливних елементів для пропульсивного комплексу.....	45
Розділ 3. Аналіз можливості застосування гібридної енергетичної установки з паливними елементами для судна-прототипа	54
3.1. Розрахунок буксирувального опору судна	54
3.2. Обґрунтування нової схеми енергетичної установки	65
3.3. Комплектуюче обладнання СЕУ	79
3.4. Розрахунок теплових потоків в елементах СЕУ	89
3.5. Визначення коефіцієнтів корисної дії та коефіцієнтів використання теплоти енергетичної установки	104
Розділ 4 Розрахунок показників індексу EEDI суднової установки газовозу з впровадженням гібридних технологій	110
4.1 Загальні поняття	110
4.2. Визначення EEDI до впровадження гібридних технологій в склад СЕУ:	112
4.3 Визначення EEDI після впровадження гібридних технологій в склад СЕУ:.	114
Висновок.....	115
Список використаної літератури	116

Вступ

У сучасних умовах посилення глобалізації морський транспортний флот є невід'ємною частиною сталого розвитку світової економіки. Відносно невелику по розмірам, але не по значенню частку світового транспортного флоту займає перевезення скрапленого природного газу, який визнаний перспективним енергетичним ресурсом завдяки своїй екологічній чистоті. Газовози як і інші судна, стикаються з необхідністю підвищення ефективності своїх енергетичних установок та скорочення викидів шкідливих речовин в атмосферу.

Гібридні технології перетворення енергії, які поєднують у собі різні методи генерації та збереження енергії можуть вирішити цю проблему. Їх використання дозволяє оптимізувати споживання енергії, знизити навантаження головних двигунів та мінімізувати експлуатаційні витрати.

Ця робота має за мету показати на прикладі газовозу-прототипу впровадження гібридних технологій до складу його пропульсивного комплексу.

Результати дослідження можуть стати основою для впровадження інноваційних енергетичних рішень у судноплавній галузі та сприяти подальшому розвитку екологічності транспорту на морі.

					КР.135.6211м	Аркуш
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 1. Аналіз сучасного флоту суден газовозів та головні характеристики пропульсивних установок таких суден. Загальна характеристика газовозу-прототипу

1.1. Аналіз сучасного флоту суден газовозів та головні характеристики пропульсивних установок таких суден

Неможливо уявити сучасний світ та його економіку без цивільного транспортного флоту. Згідно з статистикою UNCTAD за 2023 рік світовий флот досяг вантажопідйомності в 2,3 мільярда тонн дедвейту, що на 70 мільйонів тонн більше, ніж рік тому. Детальний склад світового транспортного флоту за тоннажем зображений на рис.1.1. [1]

Відсотковий склад суднового транспортного флоту на кінець 2023 року

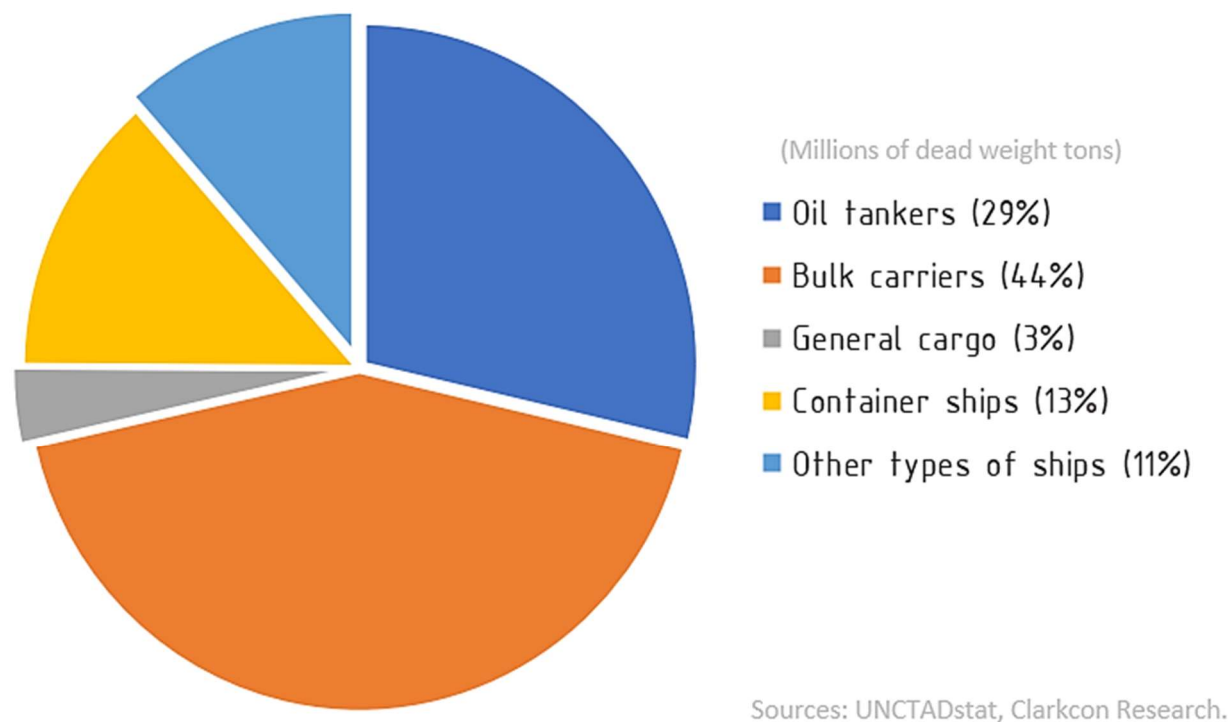


Рис. 1.1. Відсотковий склад суднового транспортного флоту на кінець 2023 року [1]

Глобальний торговельний флот складається з різноманітних типів суден, серед яких значно виділяються декілька домінуючих. Відповідно до рис. 1.1., близько 85% цієї загальної тоннажу становили нафтоналивні танкери, балкери та контейнеровози.

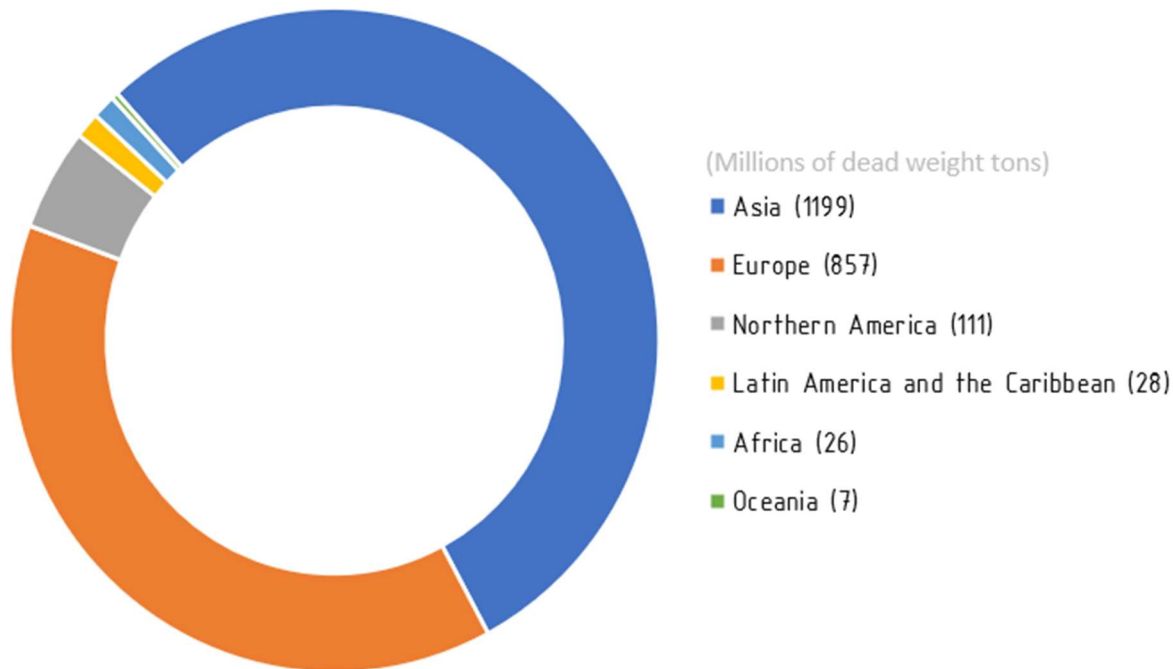
Найбільшу частку займають балкери (Bulk Carriers). Вони складають близько 42% усього флоту за кількістю суден. Це найбільша частка серед типів суден, що зумовлено високим попитом на транспортування сипучих вантажів – руди, вугілля, зерна тощо.

Танкерний флот (oil tankers), в свою чергу, включаючи танкери для хімічних речовин, займає приблизно 29% від загальної кількості. Сюди входять також танкери для зріджених газів, таких як LNG і LPG. Їх кількість сягає близько 2% від загальної частки oil tankers.

Контейнерні судна становлять близько 14%, що підкреслює значну роль контейнерних перевезень у глобальній торгівлі.

Генеральний вантажний флот (General Cargo Ships) має частку близько 10%, обслуговуючи потреби у транспортуванні неконтейнеризованих вантажів.

Відсотковий склад суднового транспортного флоту за регіонами бенефіціарної власності, 2023 рік



Sources: UNCTADstat, Clarkcon Research.

Рис. 1.2. Відсотковий склад суднового транспортного флоту за регіонами бенефіціарної власності на кінець 2023 року [1]

Інші типи суден, зокрема пасажирські судна, риболовецькі судна та спеціалізовані кораблі, складають залишкові 5%.

Дані наведені вище ілюструють, домінуючу позицію у світовому судноплаванні займають балкери та танкери. Це відображає важливість транспортування сировинних матеріалів і енергетичних ресурсів у глобальній економіці.

Згідно з рис. 1.2 сучасного складу світового флоту показує значні регіональні відмінності за бенефіціарною власністю. Згідно з даними UNCTAD за 2023 рік, найбільша кількість суден належить бенефіціарам з Азії, особливо з таких країн, як Китай, Японія та Південна Корея. Ці країни домінують як у числі суден, так і в тоннажі. Європейські країни також зберігають значну частку флоту, зокрема в сегменті пасажирських та спеціалізованих суден.

Цілком закономірно, що домінуючими регіонами є Азія та Європа. Вони мають найрозвиненішу в світі суднобудівну галузь та розвинену інфраструктуру, включаючи численні великі порти, які є важливими транспортними вузлами у глобальному ланцюгу вантажоперевезень, та мають високий рівень спеціалізації у обслуговуванні суден.

Розподіл за віком суден також показує, що новіші судна сконцентровані переважно у розвинених країнах, тоді як старіші судна часто перебувають під бенефіціарною власністю в країнах, що розвиваються, або економіках перехідного типу.

Судна газовози, як одні з найтехнологічніших суден займають значну ланку серед інших суден транспортного флоту. Вони поступаються кількістю баклерам, контейнерним суднам та нафтоналивним танкерам. За даними щорічного видання журналу World LNG Report було складено табл. 1.1.

					КР.135.6211м	Аркуш
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1. Дані по флоту газовозів за IGU World LNG report [2,3,4,5]

The global LNG fleet grew by **7% year-on-year** in 2020.



Дані
зібрано
за 2021
рік

The global LNG fleet grew by **10% year-on-year** in 2021.



Дані
зібрано
за 2022
рік

The global LNG fleet grew by **4% year-on-year** in 2022.



Дані
зібрано
за 2023
рік

The global LNG fleet grew by **5% year-on-year** in 2023.



Дані
зібрано
за 2024
рік

Згідно з даними, що наведені в табл. 1.1 можна зробити висновок, що флот газозовів із року в рік стало збільшується, будуються нові судна та створюються нові замовлення. В середньому починаючи з 2020 щорічно будується 43 газозова, а з 2020 року по 2024 рік включно, кількість активних газозовів збільшилася на 160 одиниць. [5]

У період з 2023 року до кінця лютого 2024 року обсяг затверджених потужностей зі зрідження досяг 58,8 млн тонн на рік, що є значним збільшенням порівняно з 22,4 млн тонн на рік у 2022 році. У зв'язку з цим, станом на кінець лютого 2024 року кількість газозовів, що будуються складала 359 суден, що еквівалентно понад 51% поточного активного флоту. Це ілюструє очікування судновласників щодо того, що торгівля природним газом продовжуватиме зростати відповідно до запланованого збільшення потужностей зі зрідження. [3]

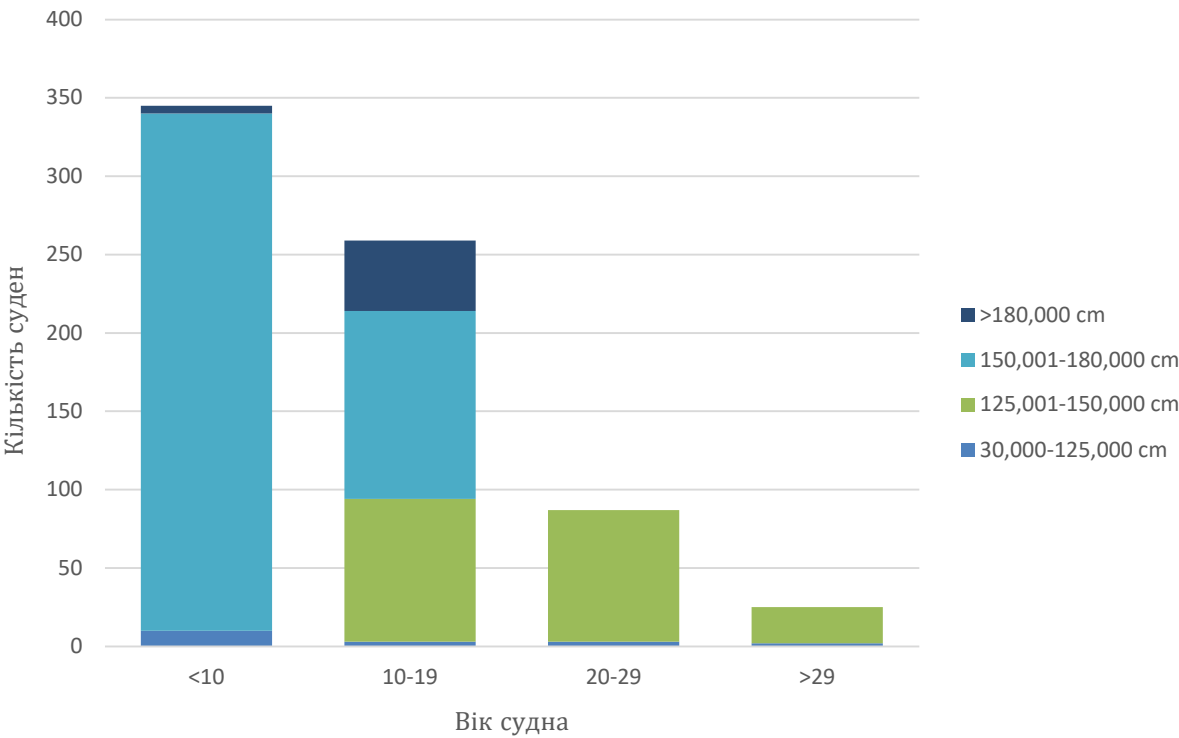


Рис. 1.3. Склад флоту за віком газозовів станом на лютий 2024 року [3]

Нинішній склад флоту газозовів є відносно молодим (рис. 1.3), враховуючи, що найстаріше судно було побудований у 1977 році. Приблизно

85,3% флоту молодше 20 років, що відповідає швидкому зростанню потужностей зі зрідження з початку століття. Крім того, нові судна більші та ефективніші, з кращою економічністю протягом усього терміну служби.

Зважаючи на фінансові проблеми та проблеми безпеки, судновласники експлуатували судно протягом 35-40 років, хоча з майбутнім посиленням правил скорочення викидів виникнути стимулювання модернізації чи переобладнання. Через швидкий розвиток технологій і впровадження нових норм щодо обмеження викидів тривалість служби може скоротитися.

Замовляючи в нове судно, судновласник визначає його місткість на основі власних потреб, існуючих ринкових тенденцій, доступних на цей час технологій, і звісно враховуючи сьогоденні та майбутні екологічні норми. Заводи зрідження та регазифікації також мають обмеження щодо місткості причалів, у той час як певні торгові шляхи можуть обмежувати розміри судна, і всі вони є важливими факторами визначення розмірів майбутнього газовозу та його вантажомісткості. Отже можна зробити висновок, що потужності нових суден залишаються переважно в межах невеликого діапазону, як показано на рис. 1.3.

Через домінування паротурбінних силових установок на початку XXI століття, судна, поставлені до середини 2000-х років, були виключно меншими за 150 000 см, оскільки це був діапазон, який найкраще підходить для парових турбінних установок. Переважна більшість з них були обладнані вантажними танками типу Moss.

Більшість нових суден мають розміри від 150 000 до 180 000 см. Зараз цей діапазон потужностей становить 63,6% поточного парку. Технологічними розробками, які сприяли прийняттю такого розміру, є силові установки з двотактними дизельними двигунами, такі як ME-GI, X-DF тощо. [3]

Іншим вирішальним фактором є нове обмеження розміру Панамського каналу – лише судна, менші за цей розмір, спочатку мали дозвіл проходити через нові шлюзи, що є обов’язковим для будь-якого судна, яке веде торгівлю, пов’язану з поставками LNG із США.

					КР.135.6211м	Аркуш
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наприкінці терміну експлуатації можна прийняти рішення про списання транспортного засобу, перетворення його на FSU/FSRU або повернення в експлуатацію якщо ринкові умови істотно покращаться.

Хоча 174 000 см на даний момент є найпоширенішим розміром для нових суден, що будуються, більші судна можуть знову привернути увагу судновласників завдяки подальшим удосконаленням силових установок з двотактними дизельними двигунами ME-GI та X-DF. Зараз у замовленні чотирнадцять газозовів місткістю 200 000 см.

Значна увага при проектуванні газозову приділяється системі утримання вантажу. Відомо, що LNG зберігається при криогенній температурі приблизно -162°C при атмосферному тиску, що є ключовим елементом конструкції вантажних танків. Останні можна в основному розділити на дві категорії: мембранні та незалежні . Мембранні системи в основному розроблені фірмою Gaztransport & Technigaz (GTT), тоді як до незалежних систем входять сферичні ємності типу Moss і ємностей типу В фірми ІНІ. Сучасні нові газозови, та ті що будуються майже повністю перейняли мембранний тип, про це свідчать дані IGU World LNG report за 2024 рік, які було зібрано по системі вантажоутримання LNG. Ці дані представлені у табл. 1.2. [3]

Таблиця 1.2. Розподіл систем утримання вантажу сучасного флоту газозовів [3]

Характеристика	Мембранні системи	Незалежні системи
Кількість суден	577	124
Частка флоту газозовів	82,3%	17,7%
Системи	GTT-designed: Mark III, Mark III Flex, Mark III Flex+, NO96 series, NO96 Super+ TECH Designed: KC-1, KC-2	Moss Maritime-designed: Moss Rosenberg IHI-designed: SPB LNT Marine-designed: LNT A-BOX

В обох системах невелика кількість СПГ природним чином випаровується під час подорожі. Ця частка газу, що випаровується відома як boil-off gas і є прямим результатом передачі тепла з навколишнього середовища, руху рідини або плескання та процесу зниження тиску в резервуарі. Швидкість википання, так званий boil-off rate (BOR), в мембранних танках у звичайних умовах зазвичай становить до 0,10% ємності резервуара на день, а завдяки системам часткового або повного повторного зрідження ще більше знижують цей показник. Це контрастує з незалежними танками, які в середньому мають показник BOR близько 0,15% ємності танку на день.

Двома домінуючими мембранними системами утримання LNG є танк типу Mark III, розроблений Technigaz, і танк типу NO96, розроблений фірмою Gaztransport. Згодом дві компанії об'єдналися, утворивши Gaztransport & Technigaz (GTT). Системи мембранного типу мають первинну та вторинну тонкі мембрани з металевих або композитних матеріалів, які при охолодженні дають мінімальну деформації під дією низьких температур. Mark III має два ізоляційні шари з пінопласту, тоді як NO96 використовує ізольовані фанерні ящики, продуті газоподібним азотом і заповнені перлітом, потім скловатою і, з недавніх пір, піноізоляцією. Нещодавно GTT анонсувала показник BOR у 0,07% для свого нового танка Mark III Flex+.

Однак, протягом експлуатації, у межах певних рівнів заповнення мембранного танку природний рух судна на хвилях, спричинений хитавицею та вітром, може викликати переміщення рідини всередині танка, що може створити ударний тиск на поверхню резервуара. Цей ефект отримав назву «плескання» і може призвести до пошкодження конструкції мембрани цистерни.

Для запобігання цьому необхідно підтримувати рівень резервуарів у межах, визначених проектувальником танків, а саме фірмою GTT. Зазвичай це нижче рівня, що відповідає 10% висоти резервуара, або вище рівня, що відповідає 70% висоти резервуара.

					КР.135.6211м	Аркуш
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Газовози з незалежною системою вантажоутримання зазвичай мають чотири або п'ять самонесучих алюмінієвих сферичних резервуарів, ізольованих поліуретановою піною. Сферична форма резервуара дозволяє точно прогнозувати напруги та втому матеріалу, що підвищує довговічність і усуває необхідність повної вторинної бар'єрної системи. Однак через свою сферичну форму система Moss Rosenberg неефективно використовує простір порівняно з мембранним танками.

Розроблена ІНІ система утримання вантажу Self-supporting Prismatic type B (SPB) була вперше реалізована в 1993 році на двох газовозах, Polar Spirit і Arctic Spirit, місткістю 89 900 см кожний. З тих пір вона використовувалась в кількох газовозах LPG та невеликих суднах LNG до того, як Tokyo Gas замовила чотири судна місткістю 165 000 см. [3]

Конструкція передбачає чотири танки, розділені всередині. Цистерни мають один поздовжній і один поперечний підрозділ всередині, для зменшення плескання зрідженого LNG. У зв'язку з цим виробник заявляє, що BOR в таких системах утримання не перевищує 0,08%. Варто зазначити, що система SPB ефективніше використовує простір і легша за систему утримання Moss Rosenberg. Типи танків Moss Rosenberg і ІНІ SPB складають трохи менше 20% активного флоту газовозів. Однак, незважаючи на те, що мембранні танки домінуючим вибором резервуарів для суден газовозів, незалежна технологія утримання вантажу все ще доступна та повністю затверджена відповідно до міжнародних норм та стандартів.

Проте одним із елементів судна, що найбільше впливає на рівень капітальних та експлуатаційних витрат, викидів, розмір судна, його надійність та дотримання ним міжнародних норм і правил є пропульсивна установка.

До початку 2000-х років парові турбіни, що працюють на BOG та мазуті, були єдиним доступним рішенням для двигунів газовозів. Збільшення вартості мазуту та суворіші норми щодо викидів призвели до розробки більш ефективних альтернатив, таких як DFDE, TFDE та малообертовий дизель з установкою повторного зрідження (SSDR). В останні роки сучасні системи

					КР.135.6211м	Аркуш
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

утримання з низькими показниками BOR стали причиною попит на більш гнучкі та ефективні системи силових установок для адаптації до різноманітних швидкостей, відстаней та умов плавання. Це призвело до нової хвилі двопаливних силових установок, які в якості основного палива можуть використовувати як BOG з невеликою кількістю пілотного палива так і традиційне дизельне паливо. Сюди входить система високого тиску MAN B&W типу M з електронним керуванням уприскування газу (ME-GI), нова популярна система впорскування газу з електронним керуванням типу M (ME-GA) з впорскуванням низького тиску та два покоління впорскування низького тиску Winterthur Gas & Diesel (WinGD) X-DF. На рис. 1.5 зображений сучасний розподіл суден газозовів за складом пропульсивної установки відносно їх віку.

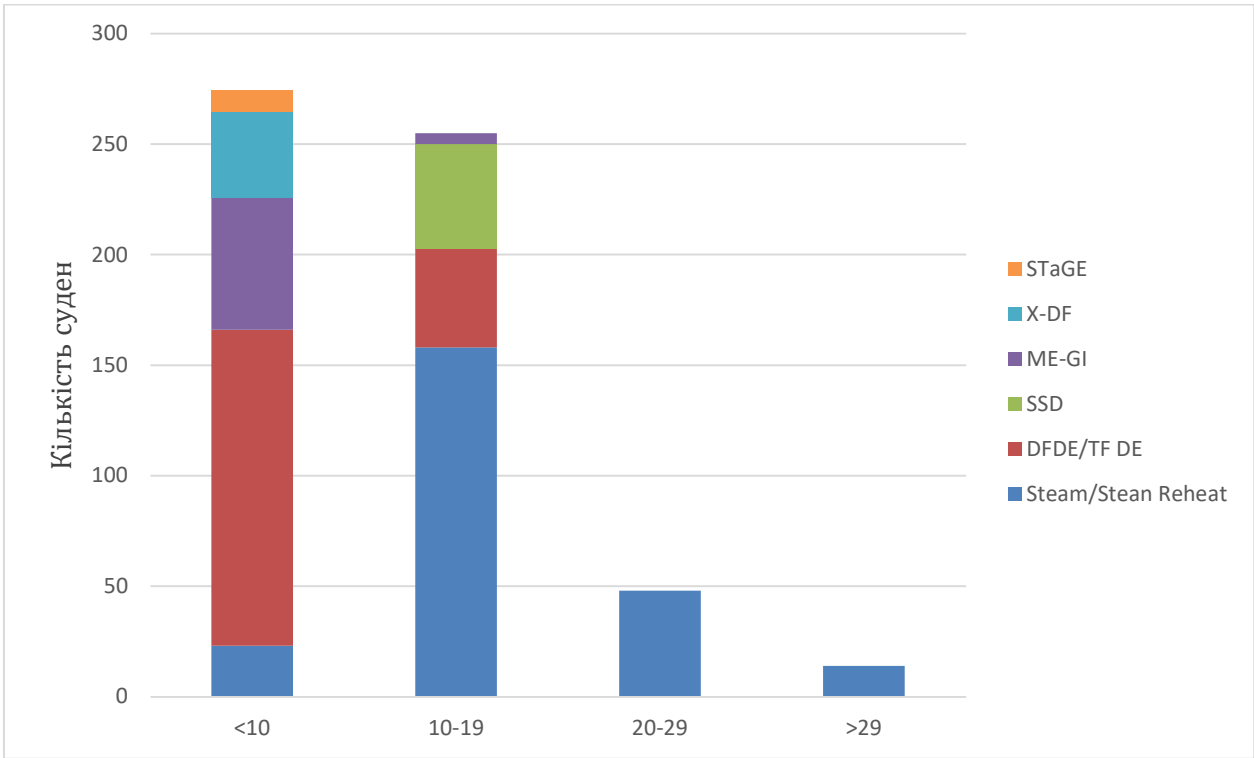


Рис. 1.5. Розподіл флоту газозовів за пропульсивними установками станом на лютий 2024 року [3]

Згідно з статистичними даними наведеними IGU World LNG report на лютий 2024 року системи парових турбін встановленні майже на всіх старих газозовах, а DFDE/TFDE та SSDR становлять невелику частку суден віком понад 10 років. Оскільки майже всі судна SSDR складаються з катарських

кораблів Q-класу, віковий діапазон відповідає даті їх доставки. В свою чергу ME-GI, ME-GA, X-DF і STaGE встановлені на нових судах, займають домінуючі позиції.

1.2. Загальні відомості про судно-прототип та його основні характеристики

Судно BW Tulip (рис. 1.6) є першим судном серії газозовів дедвейтом близько 96 000 тонн, судовий оператор – BW. Воно було побудовано у травні 2017 року південнокорейською суднобудівною компанією DSME (англ. Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd) в Сеулі, що в травні 2023 року була перейменована у Hanwha Ocean. Наразі судно ходить під прапором Сінгапуру. [7]



Рис. 1.6. Загальний вигляд судна-газовозу BW Tulip

BW Tulip транспортує LNG при температурі -163°C , густині 500 кг/м^3 та тиску 0,35 бар. На судні встановлено 4 мембранні танки загальною ємністю у $173\,400\text{ м}^3$ та окремо передбачена система IRS (Integrated Reliquefaction System), яка використовується для зрідження надлишкової кількості газу, що випарувалася в вантажному танку під час рейсу, що дозволяє знизити кількість втраченого вантажу. [7]

Це судно відповідає типу Tanker for Liquified Gas, Ship Type G2, за яким йому присвоюється клас газозову для транспортування вантажу, що вимагає суттєвих профілактичних заходів для запобігання виходу цього вантажу. В табл. 1.3 буде більш детально розглянуто клас судна прототипу.

Табл. 1.3. Характеристика класу судна BW Tulip [8]

Позиція	Пояснення
<i>DNV-GL, +1A1</i>	Судно було побудовано під наглядом класифікаційного товариства DNV (Det Norske Veritas) згідно всіх вимог та правил товариства, що підтверджує присвоєний клас +1A1. Корпус судна, його механізми та обладнання задовольняють вимогам правил DNV або іншого класифікаційного товариства з наступним присвоєнням класу DNV.
<i>Tanker for Liquefied Gas, 2G</i>	Тип судна: <i>Tanker for Liquefied Gas 2G</i> . Воно призначено для перевезення скрапленого природного газу за умов -163 °C, 500 kg/m ³ , 0.35 bar.
<i>NAUTICUS (Newbuilding)</i>	Це знак класу суден корпус яких спроектований на основі розширеної методики DNV. Це позначення вказує на забезпечення клієнта сервісами NAUTICUS: Разом з цим надається доступ 3D моделі судна. Модель створюється і підтримується товариством DNV. Додаткова нотатка Newbuilding вказує на те, що модель абсолютна нова, створена безпосередньо для цього судна.
<i>COAT-PSPC (B)</i>	Ця нотатка вказує на те, що судно задовольняє вимоги SOLAS та резолюцій ІМО MSC.2 15(82) та MSC.288(87) з корозійного захисту танків та просторів. Літера (B) вказує на - вимоги PSPC для баластних танків судів усіх типів. ІМО Resolution MSC.215 (82) регулює покриття баластних цистерн морської води.
<i>EO</i>	Це позначення вказує, що механічна установка судна експлуатується без постійної присутності екіпажу в МВ. Система аварійно-попереджувальної сигналізації машинної установки передбачена на містку. Є система дистанційного управління пропульсивною установкою.
<i>TMON</i>	Цей знак вказує на те, що на судні передбачено засоби моніторингу стану дейдвудного підшипника.
<i>BIS</i>	Позначення BIS вказує, що на судні може проводитися обслуговування та ремонт на воді без використання сухого доку кожні 2,5 роки.
<i>BWM-T</i>	Позначення BWM вказує на те, що судно задовольняє Міжнародну конвенцію про контроль та управління судовими баластними водами та осадами 2004 р. Літера Т вказує на наявність установки для очищення водяного баласту.
<i>Recyclable</i>	Позначення Recyclable відповідає класовому позначенню CLEAN DESIGN, що має більш жорсткі вимоги до рівнів викидів шкідливих речовин у повітря та скидів у море, ніж ті що вимагає ІМО, та безпосередньо вказує на наявність вміст небезпечних матеріалів на борту.
<i>GAS FUELED</i>	Це позначення вказує на можливість використання газоподібного палива для руху судна.

Особливістю цього судна в свій час було нововведення до складу пропульсивної установки судна. В якості ГД використовуються двотактні двигуни MAN 5G70ME-GI-C10.5, які використовують як рідке так і газоподібне паливо. Вибір оператором двигунів ME-GI виконувався з міркувань збільшення ефективності та економії. Важливо зазначити, що в той час це була відносно нова технологія, якій виповнилось тільки 2 роки.

Таким чином на 2018 рік судно BW Tulip було першим судном оператора BW, в склад пропульсивного комплексу якого входили двотактні двигуни, що споживають LNG як паливо. [7]

Основні габаритні розміри судна:

- Довжина найбільша – 294,9 м;
- Довжина між перпендикулярами – 282,4 м;
- Ширина – 46,4 м;
- Висота борту до головної палуби – 26,5 м;
- Осадка – 12,5 м.

Валова місткість судна складає 114 364 тонн, а дедвейт – 95 785 тонн. Кількість водяного баласту, що може буде прийнято на борт становить 61523,9 м³, при цьому місткість вантажних цистерн складає 173 647,9 м³. При бункеруванні судна на борт приймається 5293,9 м³ HFO та 632,4 м³.

Проекції судна на основні площини представлені на рис. 1.7.

					КР.135.6211м	Аркуш
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

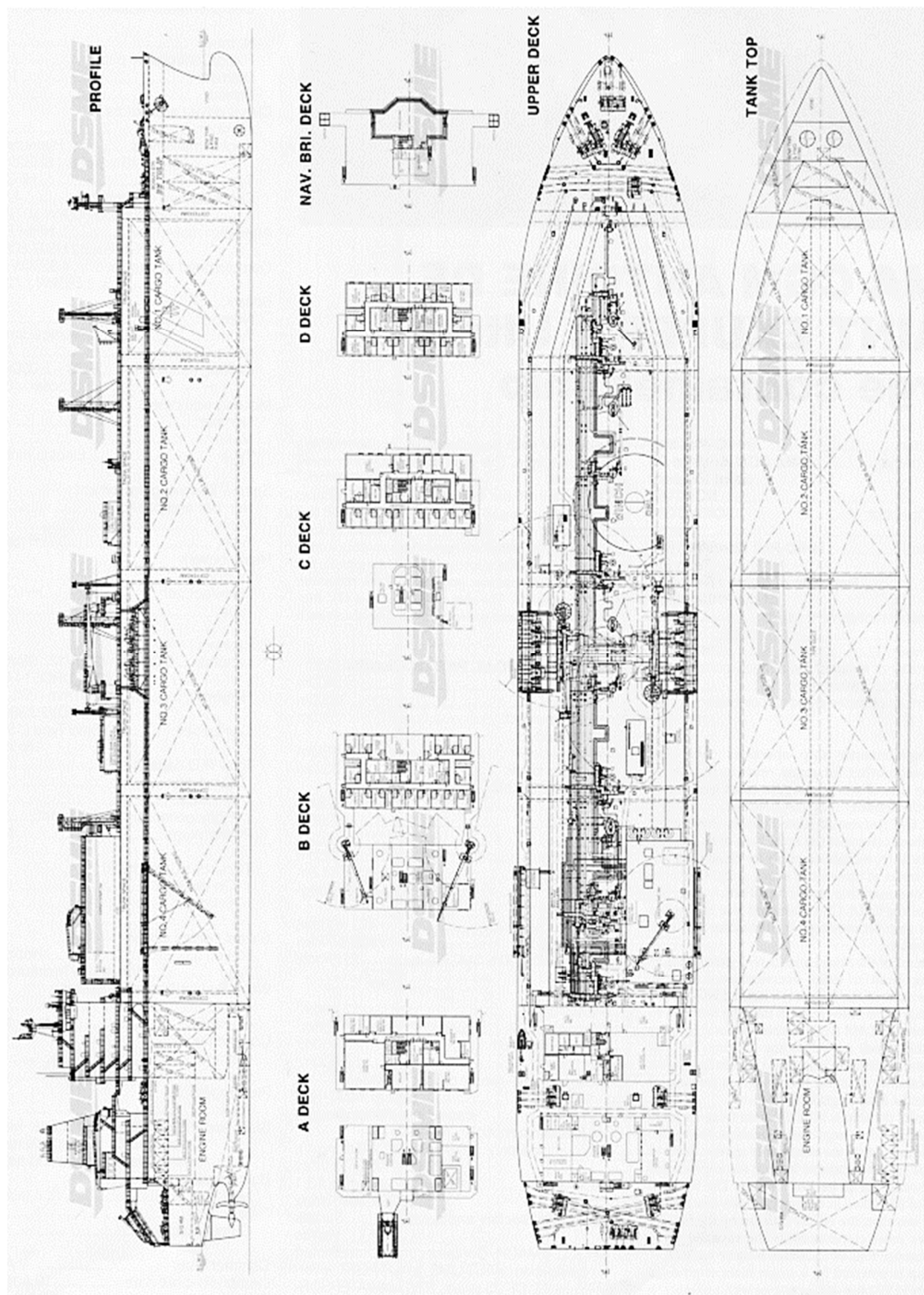


Рис. 1.7. Проекції газовозу BW Tulip на площини [7]

Габаритні розміри судна BW Tulip дозволяють користуватися Панамським та Суецьким каналами.

Форма корпусу судна та його габаритні розміри повинні забезпечувати найкращі морехідні якості при повному завантаженні або при баласті.

					КР.135.6211м	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Судно ходє зі швидкість 19,5 вузлів при осадці 12,5 м та 90% MCR. Максимальний вибіг судна становить 8 його довжин, приблизно 2,4 км або 1300 морських миль. [7]

Остійність судна забезпечується креновою баластною системою, а непотоплюваність – поділ судна на відсіки водонепроникними переборками та палубами.

Корпусу судна BW Tulip присвоєний Hull No. 2435. При його будівництві було використано до 8,4% високоміцної сталі від загальної кількості матеріалу. Загальний вигляд корпусу судна показаний на рис. 1.1.

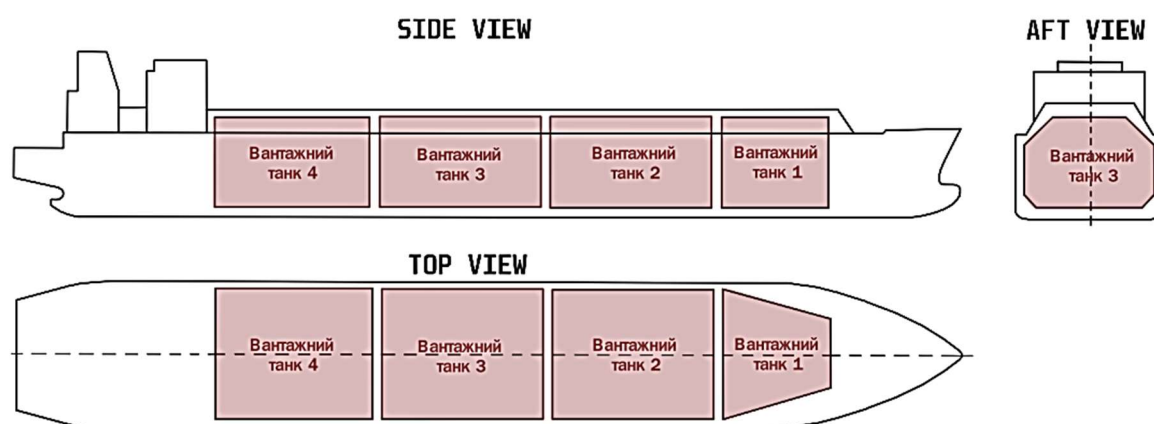


Рис. 1.8. Форма корпусу газовозу BW Tulip

Форма корпусу забезпечує оптимальну кількість простору для розміщення вантажу та оптимальне значення швидкості судна від час рейсу. [7]

Судно обладнане інсєнєраторною піччю фірми Kangrim моделі KFB-110S потужністю 1 100 000 Kcal/hr або 1279,3 кВт.

На судні наявні 2 вантажні крани фірми Oriental вантажопідйомністю 10 тонн кожний та 2 провізійні крани фірми Oriental вантажопідйомністю 8 тонн кожний. Швартове обладнання судна складається з 9 гідравлічних лебідок фірми TTS. Для перекачування вантажу використовуються 8 одноступінчатих відцентрових занурювальних насосів з електричним приводом фірми Shinko продуктивністю 1750 м³/год кожний. Система водяного баласту, що наявна на судні вироблена Teamtec (OceanSaver) та має продуктивність 6000 м³/год.

					КР.135.6211м	Аркуш
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Машинне відділення обладнане системою піногасіння фірми Survitec (Wilhelmsen). [7]

Поточне місцезнаходження судна було встановлене за IMO Number та онлайн сервісу MarineTraffic (рис. 1.9).

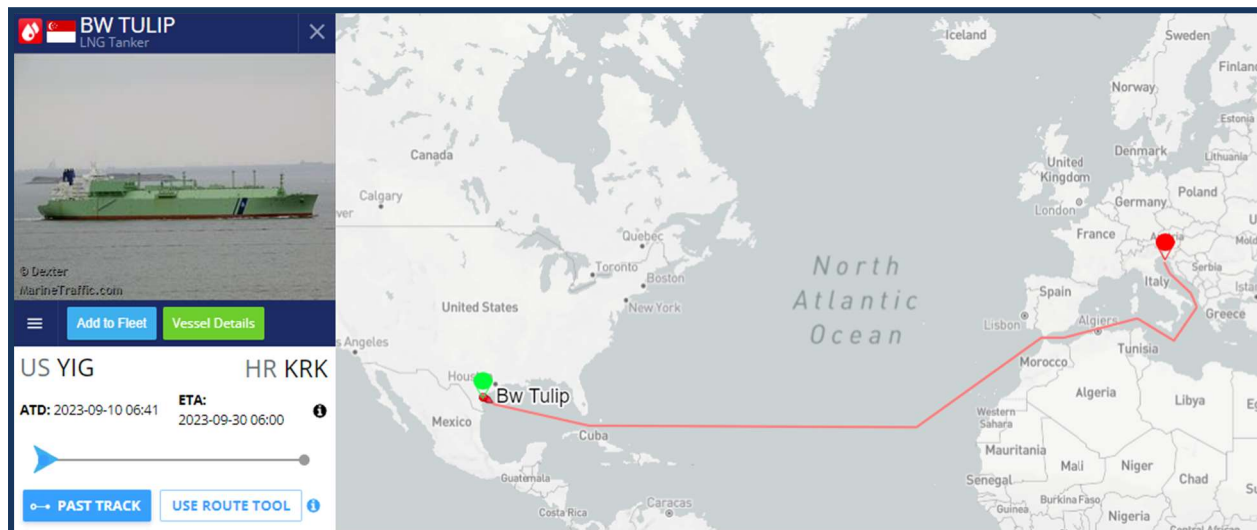


Рис. 1.9. Рейсова лінія газозову BW Tulip (IMO 9758064) [9]

На даний момент судно з порту INGLESIDE (US YIN), США, прямує до порту KRK (HR KRK), Хорватія. Рейс займе близько 20-25 діб.

Елементи суднової енергетичної установки судна з своїми характеристиками показані в табл. 1.4.

Табл. 1.4. Основні елементи енергетичної установки

Елемент СЕУ	Кількість	Виробник	Тип	Характеристика
Головний двигун	2	Win GD	5X72DF-2.2	11 975 кВт; 68 об/хв
Первинний тепловий двигун	4	Wärtsilä	L34DF	3000 кВт; 720 об/хв
Електрогенератор	4	Hyundai	-	2 880 кВт; 720 об/хв
Допоміжний котел	1	Aalborg	Vertical, water tube	6,5 т/год; 6 бар
Інсинератор	1	Kangrim	KFB-110S	1280 кВт

Функціональна схема СЕУ газозову BW Tulip представлена на рис. 1.10.

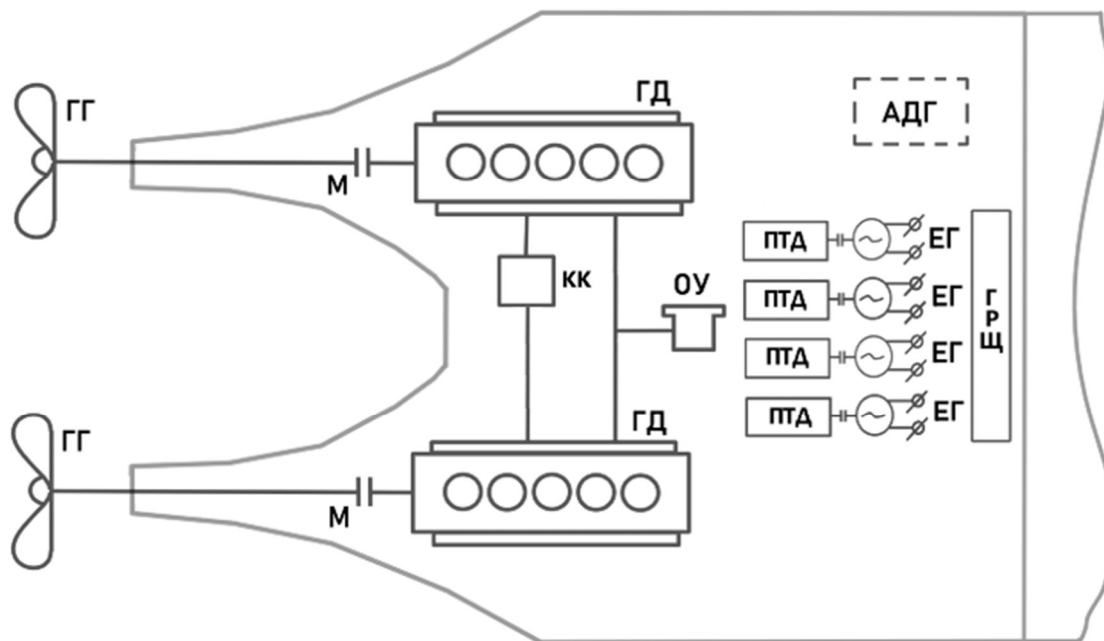


Рис. 1.10. Функціональна схема СЕУ судна BW Tulip:

ГГ – гребний гвинт; ГД – головний двигун; М – муфта; ОУ – опріснювальна установка; ПТД – первинний тепловий двигун; ЕГ – електрогенератор; КК – комбінований котел; АДГ – аварійний дизель-генератор; ГРЩ – головний розподільчий щит.

Пропульсивний комплекс представлений двовальною двомашинною судновою енергетичною установкою з МОД. Передача потужності від двигунів рушіям – пряма. В якості рушія використовується гребні гвинти фіксованого кроку діаметром 8,3 м кожний з частотою обертання 68 об/хв. Обидва гвинта виконані з нікель-алюмінієвої бронзи.

В якості головних двигунів використовуються двотактні малообертові 5X72DF-2.2 фірми Win GD. Ефективна потужність кожного двигуна складає 11 975 кВт при частоті обертання 68 об/хв. Зазначений двигун є двигун типу DF, тобто він може використовувати і рідке і газоподібне паливо.

Потреби електроенергії СЕУ та судна в цілому забезпечуються допоміжною судною електростанцією, яка складається з чотирьох допоміжних дизель-генераторів. В якості приводів до генераторів встановлені двопаливні чотиритактні двигуни Wärtsilä L34DF потужністю 3000 кВт кожний та швидкістю обертання 720 об/хв. Електрогенератори синхронного

типу виконані фірмою Hyundai з вихідною потужністю 2880 кВт та швидкістю обертання 720 об/хв.

Теплова енергія на судні виробляється двома допоміжними паровими вертикальними водотрубними котлами фірми Aalborg продуктивністю 6,5 т/год та тиском пари 6 бар.

Окрім цього, беручи до уваги велику протяжність рейсової лінії судна, в складі СЕУ повинна бути передбачена опріснювальна установка, яка виробляє дистиллят для парових котлів та потреб команди. Ймовірним джерелом для теплоти для отримання прісної води з морської може бути теплова енергія гарячої прісної води, яка охолоджує головні двигуни.

BW Tulip обладнане одуим носовим підрулювачем фірми КТЕ потужністю 2200 кВт.

Судно має кормове розміщення машинного відділення, що дозволяє максимально зменшити довжину валопроводу та покращити умови для розміщення вантажних цистерн.

Автономність судна визначається запасами провізії, питної та технічної води, а також запасами палива для роботи СЕУ. Враховуючи дані з сервісу Marrinetraffic один рейс газозову BW Tulip займає близько 20 діб. Таким чином автономність судна повинна складати від 20 до 25 діб.

При цьому зауважити, що потреби у прісній воді для СЕУ та екіпажу частково забезпечуються опріснювальною установкою.

Судно ходє зі швидкість 19,5 вузлів при осадці 12,5 м та 90% MCR (Maximum continuous rating). Максимальний вибіг судна становить 8 його довжин, приблизно 2,4 км або 1300 морських миль. [7]

					КР.135.6211м	Аркуш
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 2 Аналіз існуючих та перспективних гібридних технологій для суднових енергетичних установок

2.1. Аналіз стратегії ІМО щодо зменшення шкідливих викидів

Екологічні проблеми, пов'язані із судновими енергетичними установками, залишаються важливим питанням у контексті зменшення глобальних викидів шкідливих речовин. Для їх вирішення ІМО створила глобальну стратегію по скорочення викидів парникових газів від міжнародного судноплавства. Викиди GHG (Greenhouse Gases) є ключовим фактором зміни клімату і на міжнародне судноплавство припадає приблизно 2,89% світових викидів парникових газів, згідно зі звітом ІМО за 2018 рік. Для цього була прийнята початкову Стратегію скорочення викидів парникових газів із суден (Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships) у 2018 році з амбітними цілями, включаючи скорочення викидів на 50% до 2050 року відносно рівня 2008 року. [10, 11]

Ця стратегія складається з багатьох етапів, що спрямовані на підвищення енергоефективності, впровадження новітніх екологічних технологій і зменшення споживання палива в судноплавстві.

У червні 2021 року відбулася 76 сесія Комітету із захисту морського середовища (Marine Environment Protection Committee) МЕРС 76 Міжнародної морської організації. Основними рішеннями стали прийняття стандартів енергоефективності для існуючих суден (ЕЕХІ) та індикатора вуглецевої інтенсивності (СІІ). Ці заходи не тільки відповідають цілям ІМО у скороченні викидів на 50% до 2050 року порівняно з рівнями 2008 року, а ще й створюють амбітніші – зменшення викидів вуглецю в міжнародному судноплавстві до 2030 році щонайменше на 40% порівняно з рівнями 2008 року. Для того, щоб це було можливо, на сесії була прийнята низка обов'язкових технічних та експлуатаційних вимог, що спрямовані на покращення дизайну та технічної ефективності існуючих суден за допомогою індексу енергоефективності існуючих суден (ЕЕХІ) та оптимізації експлуатаційної енергоефективності існуючих суден за допомогою індикатора інтенсивності вуглецю (СІІ). [12]

					КР.135.6211м	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Індекс Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) встановлює стандарти ефективності експлуатації. Ці заходи спрямовані на поступове скорочення викидів у міру того, як судноплавні компанії адаптуються до нових технологій.

Індикатора вуглецевої інтенсивності (CII) можна назвати показником, який буде демонструвати інтенсивність викидів вуглецю відповідним судном, що експлуатується. Цей показник оцінює викиди відносно транспортної роботи, що оцінюється у тонно-милях. Його значення буде показувати наскільки ефективно судно використовує енергію під час перевезення вантажу. Кожного року кожному судну присвоюється рейтинг від А до Е залежно від рівня його викидів, де А це найкращий, а Е – найгірший. У випадку, якщо судно отримує низький рейтинг (наприклад, D або E), власник зобов'язаний вжити відповідних заходів для поліпшення ефективності.

В липні 2023 року на сесії МЕРС 80 була переглянута стратегія ІМО щодо викидів парникових газів у всіх її елементах, включаючи підвищення рівня амбіцій. [12]

Стратегічні пункти нової стратегія мають наступний вигляд:

- Зниження інтенсивності викидів вуглецю для нових суден через покращення енергоефективності, з переглядом вимог до дизайну для їхнього посилення.
- Зниження вуглецевої інтенсивності міжнародного судноплавства для скорочення CO₂ на одиницю транспортної роботи щонайменше на 40% до 2030 року (порівняно з 2008).
- Збільшення використання технологій і палива з нульовими або майже нульовими викидами, щоб вони становили щонайменше 5% енергії судноплавства до 2030 року.
- Досягнення чистого нуля для викидів судноплавства до приблизно 2050 року.

					КР.135.6211м	Аркуш
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для досягнення нульових викидів парникових газів, належного відстеження прогресу, внесення корективів та оцінки ефективності заходів були поставлені наступні проміжні задачі: [12]

- скоротити загальні річні викиди GHG від міжнародного судноплавства на мінімум на 20%, (прагнення – до 30%) до 2030 року порівняно з 2008 роком;
- скоротити загальні річні викиди GHG від міжнародного судноплавства на при щонайменше 70% (прагнення – до 80%) до 2040 року порівняно з 2008 роком.

Значною проблемою також є викиди оксидів азоту NO_x та оксидів сірки SO_x , що утворюються під час згоряння палива, в зонах з високою екологічною чутливістю, значною густиною населення, і в цілому, де забруднення судноплавства може впливати на здоров'я людей і довкілля. Конвенція МАРПОЛ, зокрема її Додаток VI, встановлює суворі обмеження на викиди SO_x і NO_x у контрольованих зонах викидів, відомих як Emission Control Area (ECA). Це морська зона, в якій встановлено контроль за викидами в атмосферу оксидів сірки та азоту для їх мінімізації. Спочатку це ці норми були спрямовані на зменшення викидів оксидів сірки SO_x . А згодом, у 2005 році їх було розширено, щоб охопити й викиди оксидів азоту NO_x для кількох районів. ECA з обмеженнями лише на SO_x також відомі як SECA, а ECA з обмеженнями на NO_x – NECA. Ці норми є частиною International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL) додатку VI «Правила щодо запобігання забрудненню повітря з суден». Зокрема, це правила 13 і 14, які стосуються викидів оксидів азоту NO_x і оксидів сірки SO_x і твердих часток (PM) суден. [13]

Наступні ECA наразі «активні» згідно з ІМО:

- Правило 13 / MARPOL VI Контроль No_x :
 - Зона Балтійського моря;
 - Район Північного моря;
 - Північноамериканський район Захід;

					КР.135.6211м	Аркуш
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Північноамериканська зона Схід;
- Район Гаваї;
- Карибська зона Сполучених Штатів.
- Правило 14 / Додаток VI MARPOL (SO_x і PM):
 - Зона Балтійського моря;
 - Район Північного моря;
 - Північноамериканський район Захід;
 - Північноамериканська зона Схід;
 - Район Гаваї;
 - Карибська зона Сполучених Штатів.

Середземне море буде включено до ЕСА у 2025 році. Декілька країн, у тому числі Китай, Південна Корея та Австралія, вже номінували свої територіальні води до складу ЕСА. [13]

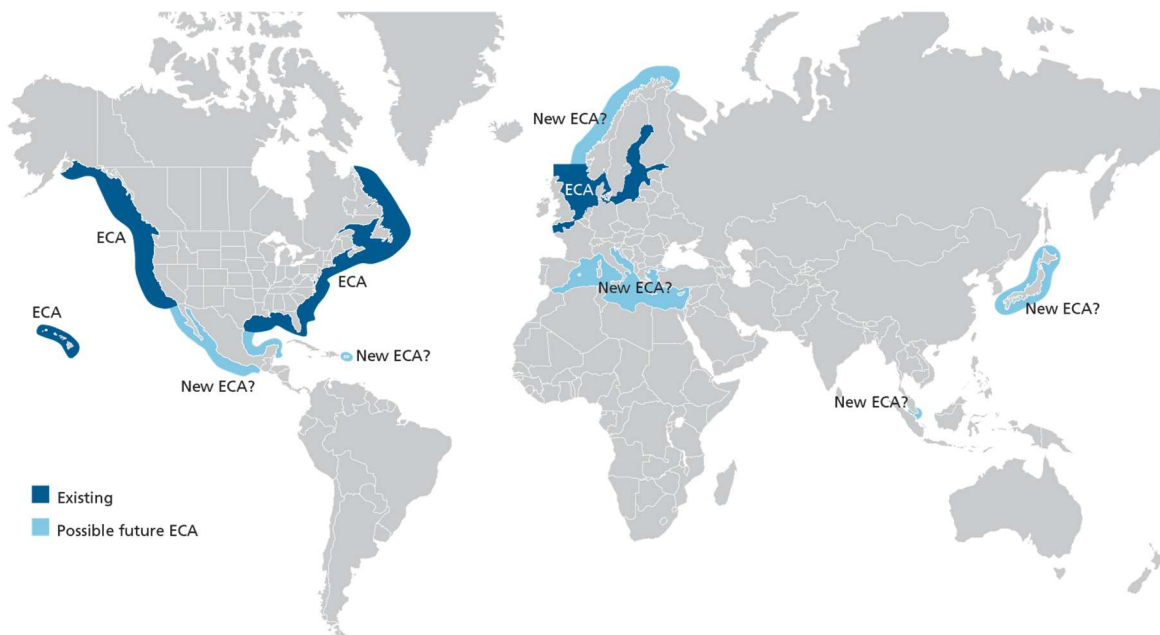


Рис. 2.1. Розташування Emission Control Areas на 2024 [13]

Судна, які плавають у зонах контролю викидів, повинні будуть використовувати на борту мазут із вмістом сірки не більше 0,10%. Під терміном «паливо, що використовується на борту» мається на увазі все паливо, що використовується в головних і допоміжних двигунах і котлах. За межами SECA максимально допустимий вміст сірки в паливі становить 0,50%. На рис.

З показано впровадження максимально допустимого ліміту сірки в SECA, портах ЄС та в усьому світі.

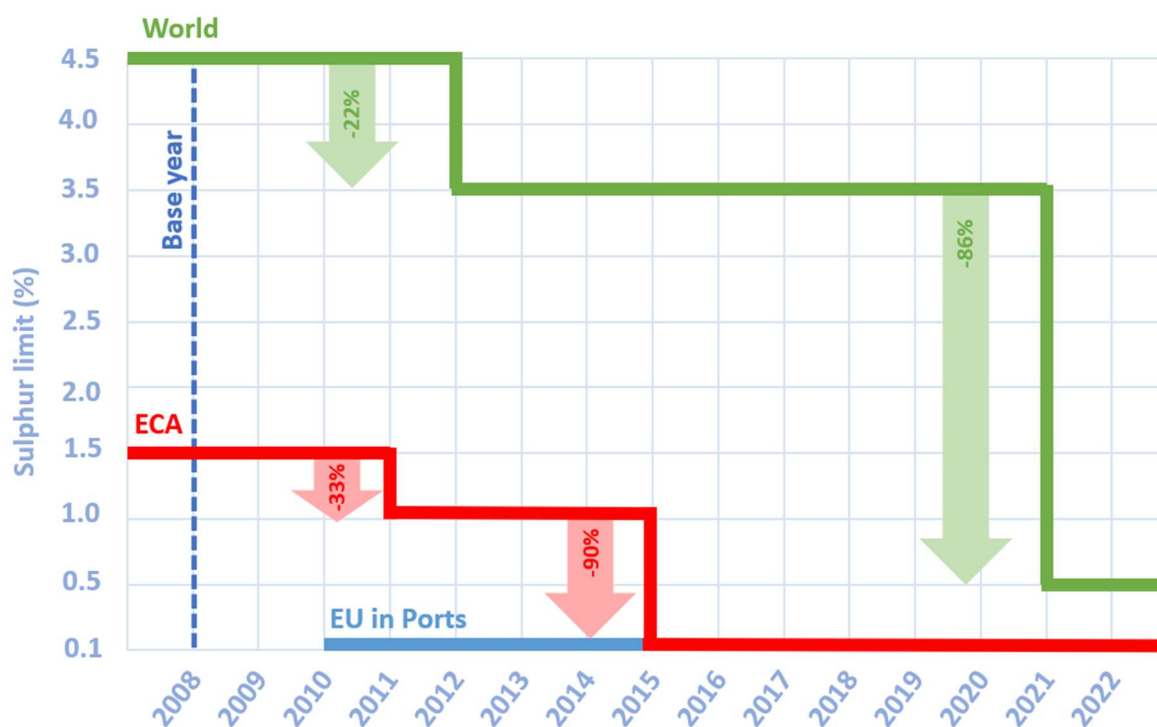


Рис. 2.2. Графік зміни допустимого вмісту сірки в паливі для світу, ЕКА та портів [13]

Судновий дизельний двигун, який встановлено на судні, побудованому після 1 січня 2016, що працює в ЕКА регіону Північної Америки та регіону Карибського моря США та ЕКА регіону Балтійського моря та Північного моря, повинен відповідати стандарту Tier III NO_x. Регламент застосовується у всьому світі до будь-якого встановленого дизельного двигуна з вихідною потужністю понад 130 кВт і встановлює обмеження [г/кВт-год] на основі частоти обертання двигуна [об/хв] і віку судна. За межами цих зон судна повинні відповідати Tier I або II. [13]

Рівні NO_x визначають максимально допустимі викиди для суднового двигуна залежно від віку та місця розташування судна (рис. 2.3). Є три рівні, від найменш суворого до найсуворішого: I-ий, II-ий та III-ій відповідно. Величина викидів для дизельного двигуна повинна визначатися відповідно до Технічного кодексу NO_x 2008 у випадку обмежень рівня II та рівня III. Більшість двигунів Tier I сертифіковано за попередньою версією Технічного

кодексу NO_x від 1997 року, який, відповідно до МЕРС.1/Circ.679, може продовжувати використовуватися в певних випадках до 1 січня 2011 року. Сертифікат видано відповідно до Технічний кодекс NO_x 1997 року залишатиметься дійсним протягом терміну служби таких двигунів.

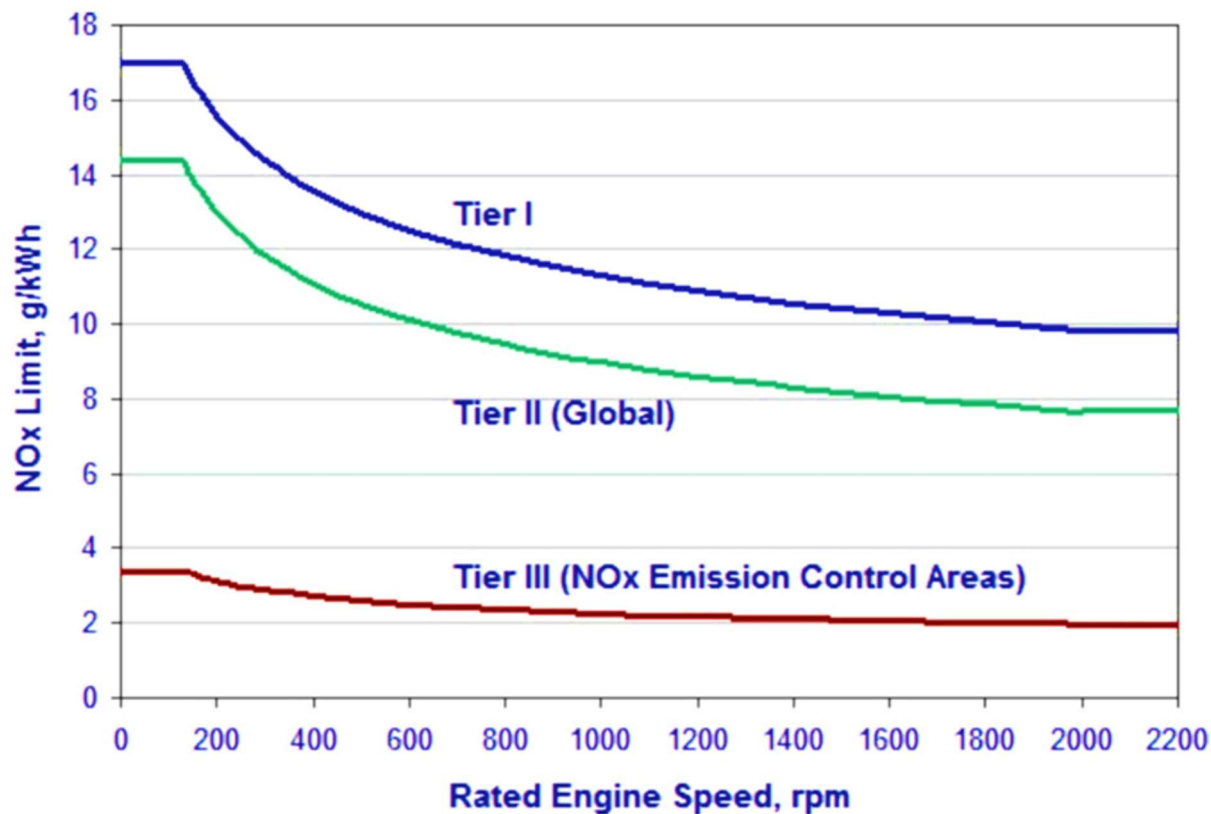


Рис. 2.3. Графік залежності граничних значень викидів NO_x в залежності від швидкості обертання ротора двигуна [13]

Стандарти Tier II, у більшості випадків, забезпечуються виробником двигунів. Однак стандарти Tier III створюють значні проблеми для них та операторів суден, бо з технічної та експлуатаційної точок зору без спеціальної обробки вихлопних газів обмеження викидів NO_x навряд чи будуть досягнуті. В таблиці 1 наведений спосіб розрахунку обмеження викидів NO_x на основі року побудови судна та обертів на хвилину ротору двигуна, що на ньому встановлено. Слід зазначити, що Tier III застосовується лише до суден у NECA.

Таблиця 2.1. Граничні значення викидів NO_x в залежності від року побудови судна та швидкості обертання ротору ГД [13]

Граничне значення викидів NO _x , г/(кВт·год)				
	Ship Built	RPM<130	130≤RPM<2000	RPM≥2000
Tier I	>2010	17	$45 \cdot \text{RPM}^{-0.20}$	9,8
Tier II	>2011	14,4	$44 \cdot \text{RPM}^{-0.23}$	7,7
Tier III	>2016	3,4	$9 \cdot \text{RPM}^{-0.20}$	1,96

2.2. Аналіз існуючих рішень задоволення сучасних екологічних вимог

Сучасна морська індустрія стикається з викликами, пов'язаними з підвищенням вимог до екологічності та енергоефективності суден. Зростання обсягів морських перевезень і посилення міжнародних регуляторних норм Міжнародної морської організації ІМО, підштовхують суднобудівну галузь до пошуку інноваційних технологій, здатних знизити викиди вуглекислого газу (CO₂), оксидів азоту (NO_x), сірки (SO_x) та збільшити ефективність пропульсивного комплексу.

Кожен рік проводяться обширні дослідження підвищення енергоефективності судна за допомогою різноманітних стратегій (оптимізація форми корпусу, удосконалення суднових двигунів, використання альтернативних джерел енергії тощо). Всі вони спрямовані на покращення енергоефективності та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Проте одним із найбільш перспективних шляхами адаптації суднової енергетики під сучасні екологічні норми залишається використання альтернативних джерел енергії та використання гібридних енергетичних установок.

Гібридні енергетичні технології стали важливим кроком на шляху до зменшення впливу морського транспорту на довкілля, поєднуючи електричні та паливні установки для оптимізації енерговитрат і скорочення викидів.

Існуючі гібридні технології, що до складу яких входять комбінації дизельних двигунів, електричних акумуляторів та газових установок, вже застосовуються на деяких типах суден. Наприклад, гібридні системи, що використовують зріджений природний газ (LNG) і паливні елементи, пропонують суттєве зниження шкідливих викидів і стають особливо перспективними для великих суден. У цьому контексті аналіз поточних гібридних рішень і перспектив розвитку нових технологій стає важливим елементом наукових і практичних досліджень у сфері морських перевезень.

Під час обговорення гібридних технологій в контексті суднової енергетики неможливо не згадати системи **PTO/PTI**. Система PTO (Power Take Off) і PTI (Power Take In) була створена, суднова галузь вимагає більш ефективних та екологічних рішень для управління енергією на судні. Її впровадження стало можливим завдяки розвитку електрифікації та інтеграції альтернативних джерел енергії, таких як акумуляторні батареї та паливні елементи, які стали доповнювати традиційні дизельні та газотурбінні двигуни.

Перші гібридні системи для суден почали з'являтися з метою зниження витрат на паливо та зменшення викидів шкідливих речовин, що згодом набуло особливого значення через посилення екологічних стандартів у міжнародних водах, особливо в раніше згаданих ЕСА. Через це декілька суднобудівних компаній та виробників суднових двигунів, а саме MAN і Wärtsilä, почали адаптувати гібридні системи з функціями PTO/PTI, що відкривають можливості для різних джерел енергії взаємодіяти для оптимізації споживання та зниження експлуатаційних витрат.

До складу енергетичної установки з інтегрованою системою PTO/PTI традиційно входять такі елементи:

- Основний двигун, що забезпечує основну потужність для руху судна.
- Електродвигун з функціями PTO/PTI, що може або передавати енергію від основного двигуна до електричної мережі установки

					КР.135.6211м	Аркуш
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(режим РТО), або навпаки — подавати додаткову енергію від електричної мережі до пропульсивної установки (режим РТІ).

- Акумуляторна система, що накопичує енергію, яку можна використовувати для підтримки систем судна на стоянці в зонах ЕСА або під час ходових режимів.
- Інвертори та конвертори, що дозволяють перетворювати та розподіляти електричну енергію між елементами системи.

Також можна окремо зазначити, що гарними доповненнями до складу системи буде паливні елементи, як альтернативні джерела електричної енергії на заміну дизельним двигунам суднової електростанції. Для більш детального розгляду суднових енергетичних установок можна розглянути кілька транспортних суден цивільного флоту різних типів, проаналізувати та скласти принципову схему для кожного.

Color Hybrid — це сучасний пасажирський пором, що належить компанії Color Line і призначений для перевезення пасажирів та транспортних засобів між Норвегією та Швецією. Довжина судна сягає 160 м, а місткість – до 2000 пасажирів та 500 автомобілів.

Воно було побудовано на верфі «Ulstein Verft» у Норвегії у 2019 році. Виробляє енергію на судні гібридна дизель-електрична установка, забезпечуючи рух судна зі швидкість 17 вузлів. Головний двигун – дизельний, а до складу пропульсивного комплексу введена система РТО/РТІ, завдяки якій судно може працювати в безвикидному електричному режимі в зонах ЕСА. [14, 15]

На ходовому режимі під час переходу рейсу між портами призначення використовуються головні дизельні двигуни для руху судна. При цьому електродвигуни можуть працювати для зарядки акумуляторних батарей. Завдяки системі РТО/РТІ вводиться гібридний режим роботи, під час якого працюють на гвинт не тільки головні двигуни. Енергія також може надходити від акумуляторі, що дозволяє економити паливо у ГД. Завдяки акумуляторним батареям вводиться безвикидний режим (електричний). В портах та ЕСА

					КР.135.6211м	Аркуш
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

судно може працювати тільки на акумуляторах, що зменшує викиди в атмосферу до нуля.

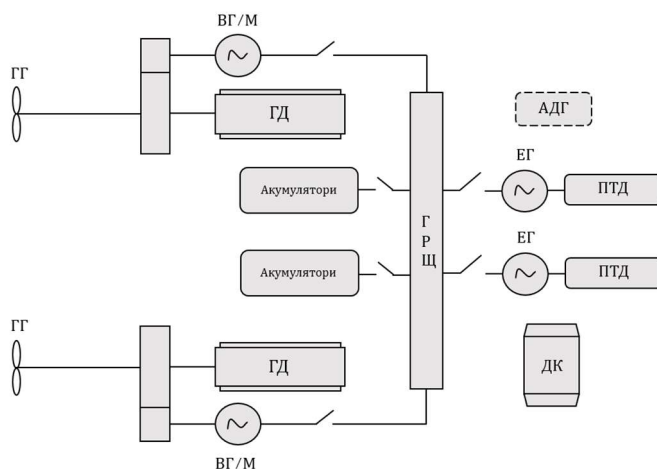


Рис. 2.4. Ймовірний склад суднової енергетичної установки судна Color Hybrid: ГГ – гребний гвинт; ГД – головний двигун; ВГ/М – валогенератор/електродвигун; ГРЩ – головний розподільчий щит; ЕГ – електрогенератор; ДК – допоміжний котел; ПТД – первинний тепловий двигун; АДГ – аварійний дизель-генератор

На стоянковому режимі судно підключається до берегового живлення або використовує акумулятори, забезпечуючи живлення для бортових систем без використання дизельних двигунів суднової електростанції.

Maersk Cape Town — це сучасний контейнеровоз класу New Panamax, що належить до флоту компанії Maersk. Він здійснює міжконтинентальні перевезення контейнерів, зокрема на маршрутах між Європою, Азією та Північною Америкою. Довжина судна сягає 160 м. Maersk Cape Town перевозе до 10 000 TEU (Twenty-foot Equivalent Unit) при швидкості 24 вузла.

Судно оснащено системою РТІ/РТО, що дозволяє використовувати електродвигуни як додаткове джерело енергії або для генерації електроенергії. [16]

До складу пропульсивної установки входить один дизельний чотиритактний двигун, що через редуктор передає механічну енергію на гребний гвинт. Достатню кількість теплової енергії на судні забезпечує комбінований парогенератор, що використовує відхідні гази ГД як джерело

енергії для генерації насиченої пари. До складу суднової електростанції входе 4 дизель-генератора. Окрім цього на судні наявна система акумуляторних батарей, що можуть використовуватись для зберігання надлишкової енергії, отриманої від головного двигуна або дизель-генераторів за допомогою системи РТІ/РТО. На рис. 2.5 представлена ймовірна принципова схема СЕУ судна .

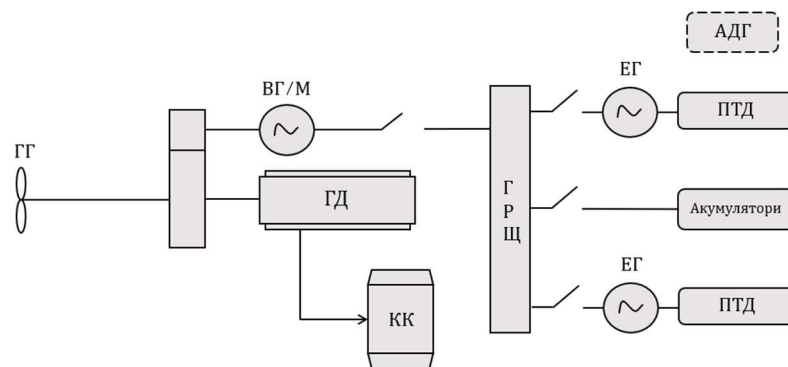


Рис. 2.5. Ймовірний склад суднової енергетичної установки контейнеровозу Maersk Cape Town: ГГ – гребний гвинт; ГД – головний двигун; ВГ/М – валогенератор/електродвигун; ГРЩ – головний розподільчий щит; ЕГ – електрогенератор; ДК – допоміжний котел; ПТД – первинний тепловий двигун; АДГ – аварійни дизель-генератор

На ходовому режимі роботи СЕУ судна головний дизельний двигун працює для забезпечення руху судна. Всі дизель-генератори, працюють для забезпечення електричної енергії для бортових потреб.

На гібридному режимі роботи комбінуються основний дизельний двигун та акумуляторні батареї для зниження витрат пального і зменшення викидів. Система керування енергетичними потоками на борту забезпечує розподіл навантаження між дизельними двигунами та акумуляторами залежно від поточних потреб.

Під час стоянки в порту судно може перейти в режим роботи при низькому навантаженні, де допоміжні дизель-генератори не працюють, а на борт подається енергія від акумуляторних батарей або портових джерел енергії для забезпечення безперервної роботи бортових систем.



a)



б)

Рис. 2.6. Загальний вигляд розглянутих суден з система РТІ/РТО

a) – *Maersk Cape Town*; б) – *Color Hybrid*

На підставі вищезазначеного можна зробити висновок, що гібридна енергетична установка для суден з дизельним двигуном в ролі головного складається з конкретних обов'язкових та опціональних елементів (рис. 2.7).

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КР.135.6211м

Аркуш

36

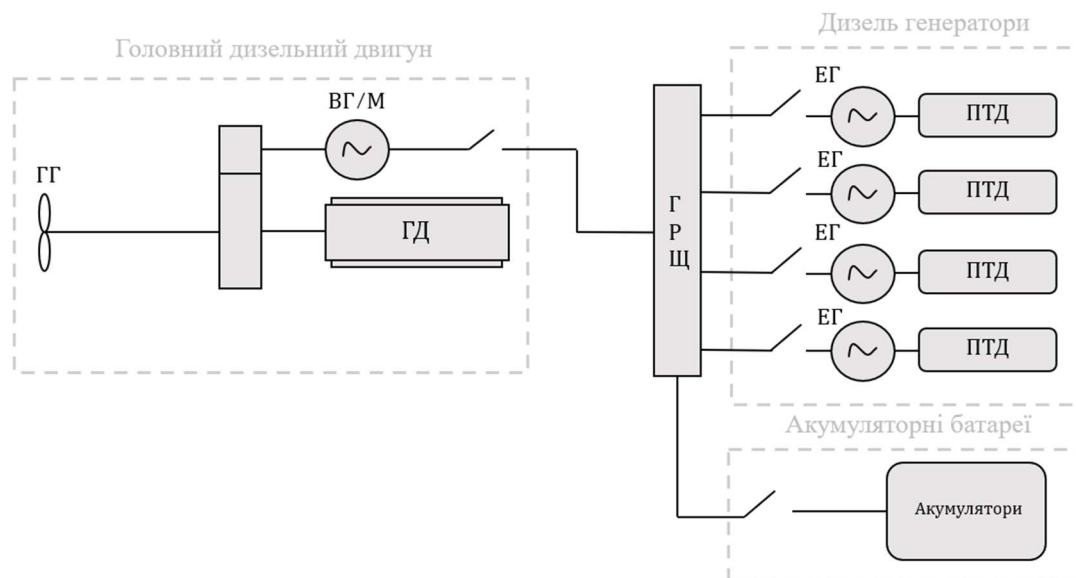


Рис. 2.7. Принципова схема гібридної дизель-електричної енергетичної установки з системою РТІ/РТО

В такій схемі рух судна може забезпечуватись як головним двигуном самостійно, так і комбінацією ГД та електродвигуна, що живиться з електричної мережі ЕУ. Для цього використовується електроенергія, що міститься в акумуляторних батареях. Вони заряджаються дизель-генераторами, якщо судно знаходиться в рейсі, або з станції зарядки, якщо судно знаходиться в порту на стоянці, і якщо порт обладнаний відповідною.

2.3. Аналіз характеристик різних типів акумуляторних батарей для пропульсивного комплексу

Важливим елементом гібридних дизель-електричних установок за представленою схемою є акумуляторні батареї. Вони входять до складу ESS (Energy Storage System), системи, яка зберігає енергію для подальшого використання на судні. Вона забезпечувати живлення для основних та допоміжних систем, що дозволяє зменшити споживання палива, покращуючи таким чином екологічні показники судна, та підвищити його ефективність. Батареї є основним компонентом ESS. Вони використовуються для зберігання електричної енергії. Вибір відповідного типу акумуляторів для СЕУ судна дає змогу оптимізувати експлуатаційні витрати та ефективно адаптувати енергетичну систему.

Далі буде наведено огляд основних типів акумуляторів, які сьогодні використовуються в судноплавстві, з порівнянням їхніх характеристик та можливостей.

Літій-іонні акумулятори (Li-ion) – це тип акумуляторних батарей, що використовують літій-іонну технологію для зберігання електричної енергії. Вони є найпоширенішим типом батарей завдяки своїй високій енергетичній щільності та тривалому терміну служби. Основні технічні характеристики Li-ion батарей: [17]

Енергетична щільність: в межах 150–250 Вт·год/кг або 200–250 Вт·год/л;

Ефективність: 90–95% при циклі заряд/розряд;

Термін служби: 3000–5000 циклів (залежно від режиму використання).

Принцип роботи літій-іонних акумуляторів базується на хімічній реакції з перенесенням іонів літію між двома електродами — анодом і катодом — через електроліт. Цей процес включає заряджання і розряджання батареї, що дозволяє зберігати й використовувати електричну енергію. Анод зазвичай виготовляється з графіту. Під час заряджання іони літію з катода переміщуються до анода і зберігаються в його структурі. Катод складається з літій-вмісних оксидів металів, наприклад, оксиду кобальту або оксиду заліза. Катод є джерелом іонів літію, які під час заряджання переходять до анода. Електроліт дозволяє іонам літію рухатися між анодом і катодом. Він зазвичай містить органічний розчинник з розчиненими солями літію. В ролі сепаратора використовується тонка мембрана, яка розділяє анод і катод, запобігаючи їхньому прямому контакту, але дозволяє іонам літію проходити через неї.

					КР.135.6211м	Аркуш
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

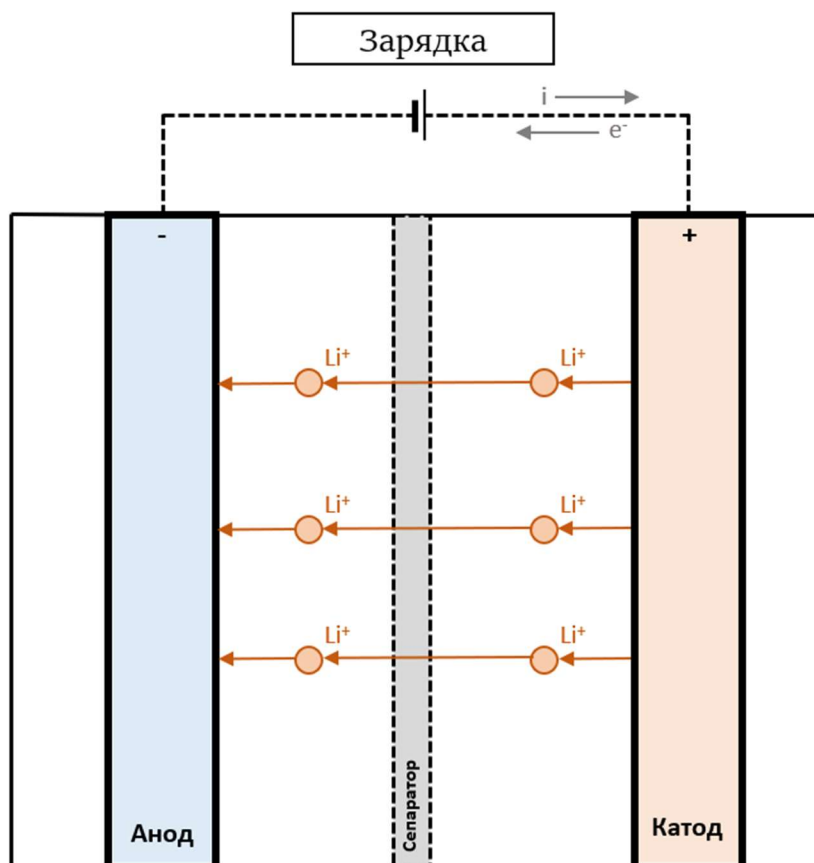
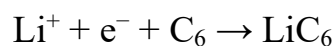


Рис. 2.8. Принципова схем процесу заряджання Li-ion батареї

Коли до батареї прикладається зовнішня напруга (тобто вона заряджається), на катоді відбувається окислення, і іони літію залишають катод та проходять через електроліт до анода. Хімічна реакція на катоді під час процесу заряджання має вигляд:



Одночасно електрони, вивільнені на катоді, рухаються через зовнішній ланцюг до анода. Це створює надлишок іонів літію на аноді, де вони інтегруються в структуру графіту, утворюючи «заряджений» стан батареї. Хімічна реакція на аноді під час процесу заряджання має вигляд:



Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КР.135.6211м

Аркуш

39

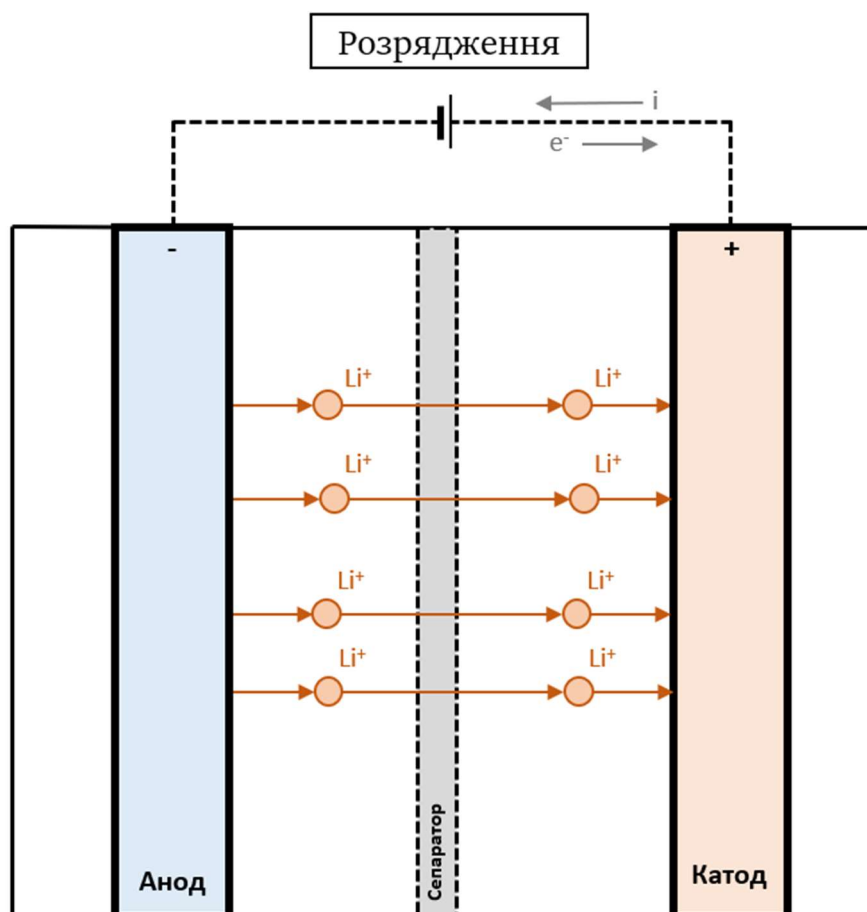


Рис. 2.9. Принципова схема процесу розрядження Li-ion батареї

Коли батарея підключена до навантаження і починає розряджатися, іони літію знову переміщуються від анода до катода через електроліт. Хімічна реакція на катоді під час процесу розряджання має вигляд:



Електрони, накопичені на аноді, рухаються через зовнішній ланцюг до катода, створюючи електричний струм, який живить підключений пристрій. Під час цього процесу катод приймає іони літію назад, і батарея поступово втрачає накопичену енергію. Хімічна реакція на аноді під час процесу розряджання має вигляд:



Таким чином, принцип роботи літій-іонних акумуляторів полягає у циклічному переміщенні іонів літію між анодом і катодом через електроліт, що дозволяє їм накопичувати або віддавати електроенергію.

Літій-іонні акумулятори потребують системи керування батареєю (Battery Management System, BMS) для контролю напруги, температури, струму та заряду. Це допомагає уникнути перегріву, коротких замикань та перезаряду, що може спричинити небезпечні ситуації. [17]

Літій-залізо-фосфатні акумулятори (LiFePO_4) – це різновид літій-іонних акумуляторів, який використовує літій-залізо-фосфат як катодний матеріал. Нижче наведені основні характеристики LiFePO_4 -акумуляторів:

Енергетична щільність: 90–160 Вт·год/кг або 150–180 Вт·год/л;

Ефективність: 90–95%;

Термін служби: до 7000 циклів.

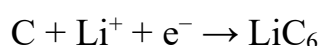
LiFePO_4 – акумулятори мають низький рівень саморозряду (близько 3% на місяць), тому вони довго зберігають заряд, коли не використовуються, що є перевагою для резервних та аварійних джерел живлення. [17]

Як і в інших літій-іонних батареях, робота LiFePO_4 -акумулятора базується на русі літєвих іонів між анодом і катодом. Катод LiFePO_4 є джерелом літєвих іонів. Анод в свою чергу зазвичай складається з графіту, який приймає іони літію під час заряджання. Іони літію переміщуються через електроліт між анодом і катодом, тоді як сепаратор запобігає контакту анода і катода, що забезпечує безпечну роботу.

Принципові схеми процесів заряджання та розряджання у літій-залізо-фосфатних акумуляторів ідентичні Li-іон батареям. Під час заряджання зовнішнє джерело енергії створює різницю потенціалів, змушуючи іони літію виходити з кристалічної решітки LiFePO_4 на катоді. Хімічна реакція на катоді під час процесу заряджання має вигляд:



В результаті Іони літію Li^+ переміщуватися через електроліт до графітового анода, де вони інтегруються між шарами графіту. Це накопичує енергію в акумуляторі. Хімічна реакція на аноді під час процесу заряджання має вигляд:

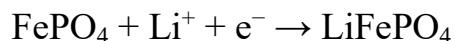


					КР.135.6211м	Аркуш
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Щодо роботи під час розрядження, коли акумулятор підключений до навантаження, іони літію залишають графітовий анод.



Після цього іони літію переміщуються назад до катода, повертаючись у кристалічну решітку LiFePO_4 .



Потік іонів через електроліт генерує електричний струм у зовнішньому колі, який живить підключене навантаження.

LiFePO_4 -батареї мають дуже високу термальну стабільність, що знижує ризик перегріву. Це робить їх менш схильними до займання чи вибуху, навіть у випадку короткого замикання або механічного пошкодження. Завдяки цьому LiFePO_4 є оптимальним вибором для застосувань, де безпека є пріоритетом.

Свинцево-кислотні акумулятори (*Lead-acid*) є найдоступнішим видом акумуляторів. Вони працюють на основі хімічної реакції між свинцевими електродами та електролітом, яким зазвичай є розчин сірчаної кислоти. Основний принцип дії полягає у перетворенні хімічної енергії в електричну під час розрядки та зворотному процесі під час зарядки. Технічні характеристики таких батарей:

Енергетична щільність: в межах 30–50 Вт·год/кг або 50–80 Вт·год/л;

Ефективність: приблизно 70–85%;

Термін служби: 500–1000 циклів (залежно від режиму використання і умов експлуатації).

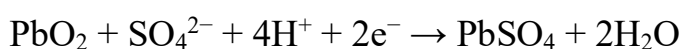
Незважаючи на те, що вони мають меншу енергетичну щільність порівняно з сучасними літій-іонними батареями, свинцево-кислотні акумулятори залишаються популярними завдяки простоті, низькій вартості та надійності.

Основними компонентами свинцево-кислотного акумулятора є позитивна пластина, що зроблена з діоксиду свинцю (PbO_2), негативна пластина, що зроблена з губчастого свинцю (Pb) та електроліт, що представляє собою водний розчин сірчаної кислоти H_2SO_4 , який забезпечує середовище для

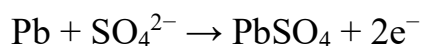
					КР.135.6211м	Аркуш
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

хімічної реакції. Корпус і сепаратори: Корпус захищає батарею від зовнішніх впливів, а сепаратори розділяють пластини, щоб уникнути короткого замикання. Коли свинцево-кислотний акумулятор розряджається, відбувається хімічна реакція між активними речовинами на пластинах і електролітом. Сірчиста кислота розкладається на іони водороду та оксидів сірки:

На позитивній пластині діоксид свинцю (PbO_2) вступає в реакцію із сірчаною кислотою і утворює сульфат свинцю (PbSO_4) і виділяє електрони. Відповідна хімічна реакція:



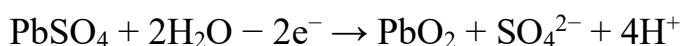
На негативній пластині губчастий свинець (Pb) також реагує з сірчаною кислотою, утворюючи сульфат свинцю (PbSO_4) і виділяючи іони водню. Відповідна хімічна реакція:



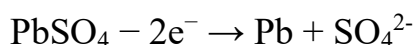
Електрони, що виділяються внаслідок реакцій, рухаються по зовнішньому ланцюгу, створюючи електричний струм, який можна використовувати для живлення електронних пристроїв або обладнання.

У результаті розрядки обидві пластини покриваються сульфатом свинцю, а електроліт втрачає частину своїх сульфат-іонів, що призводить до зниження його щільності.

Коли до акумулятора підключають зарядний пристрій, на нього подається електрична енергія, яка запускає зворотний процес. Заряджання полягає в відновленні активних матеріалів на пластинах. На позитивній пластині сульфат свинцю перетворюється назад на діоксид свинцю:



На негативній пластині сульфат свинцю перетворюється на губчастий свинець.



Сірчана кислота знову концентрується в електроліті, повертаючись до початкового стану.

					КР.135.6211м	Аркуш
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

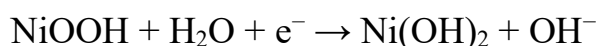
Нікель-металогідридні акумулятори (NiMH) – акумулятори, в яких анодом є водневий металогідридний електрод (зазвичай гідрид нікель-лантан або нікель-літій), електролітом - гідроксид калію, катодом - оксид нікелю.

Технічні характеристики NiMH акумуляторів мають наступний вигляд:
 Енергетична щільність: в межах 60–120 Вт·год/кг;
 Ефективність: 60–70%;
 Термін служби: 1000–2000 циклів.

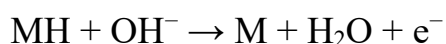
Особливістю акумуляторів NiMH є вищий рівень саморозряду порівняно з іншими типами акумуляторів. Вони втрачають приблизно 20–30% заряду на місяць при зберіганні.

При розряді NiMH акумулятора відбувається перетворення NiOOH на Ni(OH)₂ на позитивному електроді, і металевий гідрид розпадається на метал і воду на негативному електроді.

Реакція на позитивному електроді (нікелевий електрод):



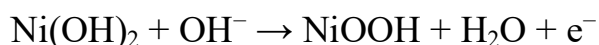
Реакція на негативному електроді (гідридний електрод):



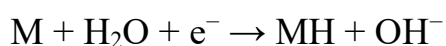
Де MH - металевий гідрид, а M - метал.

При заряді відбувається зворотний процес.

Реакція на позитивному електроді позитивному електроді:



Реакція на негативному електроді:



З урахуванням особливостей суден-газовозів та задовільних технічних характеристик та вартості літій-іонних (Li-ion) батарей, вони є найкращим варіантом серед запропонованих. Вони поєднують в собі оптимальне співвідношення енергетичної щільності, довговічності та швидкості зарядки, що є критичним для роботи такого типу суден.

					КР.135.6211м	Аркуш
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4. Аналіз характеристик різних типів паливних елементів для пропульсивного комплексу

Заміна двигунів внутрішнього згоряння, на паливні елементи, що використовують хімічну реакцію палива та окисника для генерації електричної енергії призведе до дуже позитивних результатів в напрямку проблема енергоефективності та екологічності в галузі суднової енергетики. Паливні елементи можуть використовуватися як складова частка пропульсивного комплексу, так і для забезпечення базового постачання електроенергії під час будь-якого режиму роботи судна.

Паливним елементом називається електрохімічний пристрій, що перетворює хімічну енергію палива і окисника в електричну та теплову енергію. Під час роботи не відбувається спалювання палива, як це відбувається в традиційних двигунах. Замість цього в паливному елементі відбувається електрохімічна реакція, подібна до процесів у акумуляторній батареї, проте на відміну від неї, паливний елемент працює безперервно, поки постачаються паливо та окисник.

Зображений на рис. 2.10 водневий паливний елемент складається з декількох основних компонентів: двох електродів (аноду і катоду) та електроліту. Водень (H_2), потрапляючи у паливний елемент, проходить крізь анод та починає реагувати з OH^- , що вільно рухається електролітом. В результаті вивільняється 4 електрони, які рухаються до катоду крізь дрід, та 4 молекули води. В той же час, потрапив у паливний елемент, кисень (O_2) проходить крізь катод та починає реагувати з водою, захоплюючи при цьому 4 вільні електрони, що прийшли до катоду в результаті реакції на аноді. Таким чином, для отримання 4 гідроксид-іонів необхідно залучити до реакції 2 молекули води. І в результаті цикл у паливному елементі замкнеться.

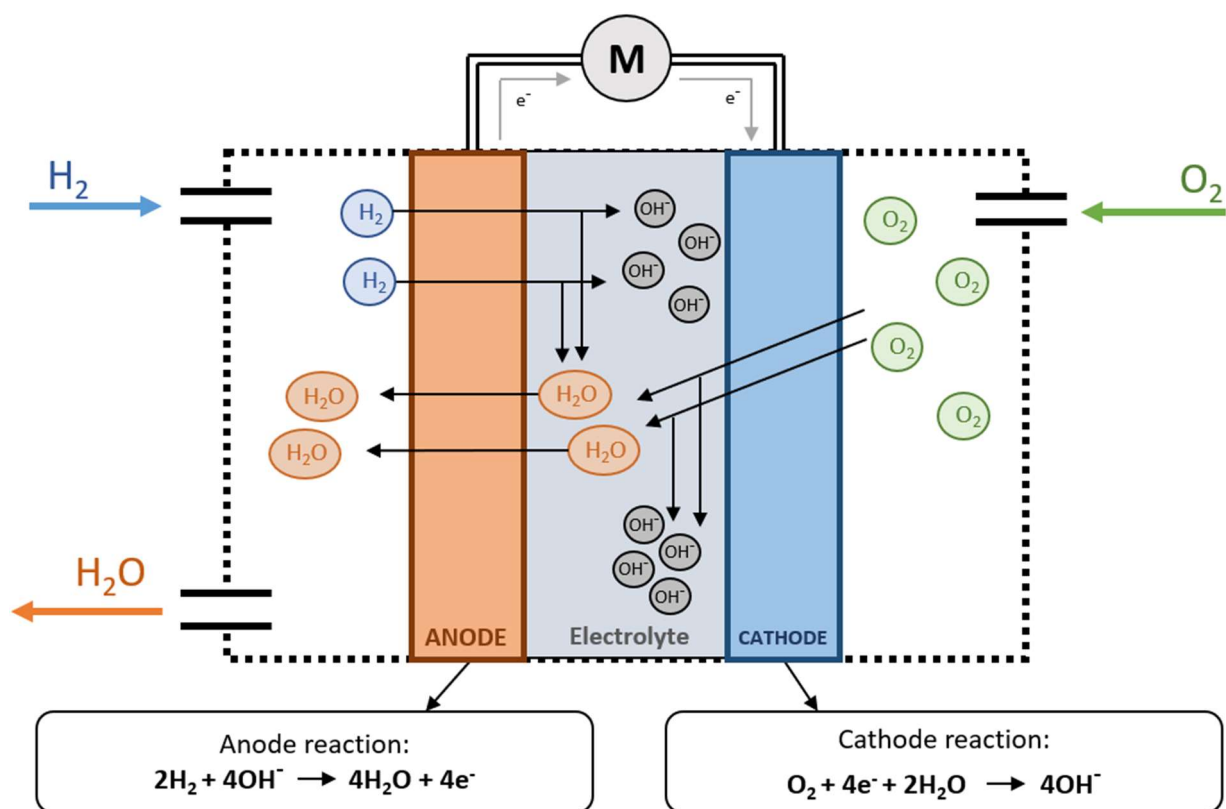


Рис. 2.10. Принципова схема водневого паливного елементу

На сьогодні можна відокремити близько шести поширених різновидів паливних елементів, що демонструють гарні показники життєздатності у морських умовах. Для виявлення найбільш кращого рішення для сучасного газозову всі дев'ять типів паливних елементів заслуговують на розгляд та аналіз як потенційні джерела енергії.

Перший тип паливного елементу, що буде розглядено це – LT-PEMFC.

LT-PEMFC (Low-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell) — це низькотемпературний протонно-обмінний мембранний паливний елемент, який має робочу температуру близько 50– 80°C. [18]

Основні характеристики цього паливного елементу: [19]

Паливо: H_2

Електроди: Pt/C, Pt/C

Робоча температура: 65 – 85 °C

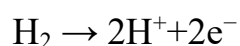
Ресурс роботи: 6000 год

Питома потужність: 1 – 2 Вт/см²

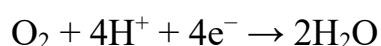
Щільність потужності: 300 – 1000 Вт/кг

					КР.135.6211м	Аркуш
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

LT-PEMFC працює на основі електрохімічної реакції між воднем і киснем, яка відбувається в присутності спеціального каталізатора та протонно-обмінної мембрани. Цей процес дозволяє перетворювати хімічну енергію палива безпосередньо в електричну енергію, тепло і воду. Робота паливного елемента починається, коли водень надходить до анодного боку паливного елемента. На аноді встановлений каталізатор (зазвичай платина), який розщеплює молекули водню (H_2) на 2 протони (H^+) та 2 електрони (e^-). Реакція на аноді:



Після цього іони водню проходять крізь протонно-обмінну мембрану до катода. Електрони, в свою чергу не можуть пройти через мембрану і, рухаючись через зовнішній електричний ланцюг, створюють струм, що забезпечує електроенергією споживачів. Після цього електрони потрапляють на катод. На катоді до електронів, що повертаються, і іонів водню, які пройшли крізь мембрану, додається кисень (зазвичай із повітря). В результаті утворюється 2 молекули води. Реакція на катоді:



При цьому вода, що утворюється, видаляється з паливного елемента є єдиним побічним продуктом роботи цього паливного елемента. Окрім цього завдяки роботі при низьких температурах паливний елемент не витрачає багато часу на запуск, що важливо для оперативного використання на судні. [20]

DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) – це паливний елемент, який для генерації електричної енергії використовує метанолове паливо та кисень.

Основні характеристики цього паливного елемента: [18, 19]

Паливо: MeOH

Електроди: Pt/C, Pt-Ru/C

Робоча температура: 75 – 120 °C

Ресурс роботи: 6000 год

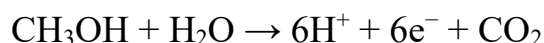
Питома потужність: 0,5 – 1 Вт/см²

					КР.135.6211м	Аркуш
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

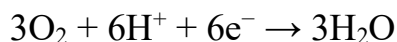
Щільність потужності: 30 – 40 Вт/кг

Ці паливні елементи відносяться до класу паливних елементів з низькотемпературною протонообмінною мембраною (РЕМ). Однак на відміну від LT-PEMFC, в DMFC не використовується газоподібний водень як паливо. Генерація електричної енергії відбувається шляхом каталітичного окислення метанолу. Єдиними відходами цих типів паливних елементів є вуглекислий газ і вода.

Розчин метанолу у воді подається на анод. На аноді встановлений каталізатор (зазвичай на основі платини та рутенію), який сприяє розщепленню метанолу і води. Метанол і вода окислюються, утворюючи вуглекислий газ (CO₂), протони (H⁺) та електрони (e⁻). Реакція на аноді:



Електрони, що утворилися на аноді, не можуть пройти через протонно-обмінну мембрану, тому прямують через зовнішній електричний ланцюг, створюючи електричний струм, до катоду. Протони (H⁺) проходять через протонно-обмінну мембрану до катода, де реагують з киснем, утворюючи воду. Реакція на катоді:



Важливо зазначити, що продуктом реакції на аноді є вуглекислий газ, що є значним недоліком цього паливного елементу. Проте метанол легше зберігати та транспортувати.

AFC (Alkaline Fuel Cell) — це лужний паливний елемент, який працює на основі реакції між воднем і киснем, використовуючи лужний електроліт (зазвичай розчин гідроксиду калію, KOH).

Основні характеристики цього паливного елементу: [18, 19]

Паливо: H₂, MeOH, Hydroxide

Електроди: Pt/Ag, Pt/Ni

Робоча температура: 60 – 200 °C

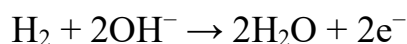
Ресурс роботи: 10 000 год

Питома потужність: 0,5 – 1 Вт/см²

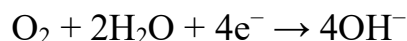
					КР.135.6211м	Аркуш
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Щільність потужності: 35 – 105 Вт/кг

Паливний елемент починає роботу з подачею водню (H_2) на анод, де останній розщеплюється на електрони (e^-) і іони водню (H^+) під дією каталізатора. Після цього водень окислюється, утворюючи воду (H_2O) та електрони. Електрони прямують по зовнішньому електричному колу, створюючи електричний струм. Реакція на аноді:



В той же час на катоді кисень (O_2) з повітря вступає в реакцію з електронами, які повертаються із зовнішнього ланцюга, і з гідроксидними іонами (OH^-) з електроліту. Утворені гідроксидні іони знову повертаються в електроліт, завершуючи цикл. Реакція на катоді:



SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) — це твердооксидний паливний елемент, який використовує твердий оксидний електроліт (зазвичай оксид цирконію, стабілізований оксидом ітрію). SOFC відрізняється від інших типів паливних елементів високою робочою температурою (від 600°C до $1,000^\circ\text{C}$), що дає змогу використовувати широкий спектр палив. [20]

Основні характеристики цього паливного елемента: [18, 19]

Паливо: H_2 , MeOH, Hydroxide

Електроди: Sr/LaMnO₃, Ni/YSZ (Yttria-Stabilized Zirconia)

Робоча температура: 500 – 1000 °C

Ресурс роботи: 20 000 год

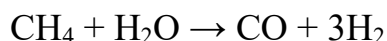
Питома потужність: 0,3 – 1 Вт/см²

Щільність потужності: 15 – 20 Вт/кг

Коли в SOFC як паливо використовується природний газ (головним чином метан, CH_4), процес роботи має додатковий етап — внутрішнє реформування метану для утворення водню і оксиду вуглецю. Це процес перетворення вуглеводневих палив, в нашому випадку метану, CH_4 , у водень (H_2) безпосередньо всередині паливного елемента, зазвичай у зоні анода, де підтримується висока температура. Це є важливою особливістю SOFC, які

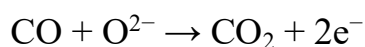
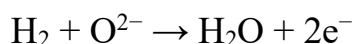
					КР.135.6211м	Аркуш
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

здатні використовувати тепло, що виділяється під час їхньої роботи, для проведення цієї реакції. Таким чином природний газ в присутності водяної пари під дією високих температур у паливному елементі перетворюється у водень (H_2) і оксид вуглецю (CO):

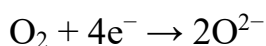


Завдяки цій особливості SOFC відпадає потреба у зовнішньому реформері, що зменшує складність системи і витрати на її та експлуатацію. Однак процеси внутрішнього реформування можуть супроводжуватись утворенням вуглецю, який відкладається на поверхні анода, що може пошкодити паливний елемент і знизити його продуктивність. Для запобігання цьому потрібна оптимізація робочих умов паливного елемента.

Утворений водень та оксид вуглецю використовуються у звичайній анодній реакції SOFC, де вони взаємодіють з іонами кисню (O^{2-}) з електроліту, утворюючи воду, вуглекислий газ та вивільняючи електрони:



На катоді кисень із повітря приймає електрони з зовнішнього ланцюга, утворюючи іони кисню (O^{2-}):



Після реакції на катоді іони кисню проходять через твердооксидний електроліт до анода для завершення реакції.

Важливо зазначити, що в процесі роботи SOFC наявні викиди вуглецю в атмосферу, однак вони значно нижчі ніж у традиційних двигунів внутрішнього згоряння або газотурбінних двигунів, що працюють на природному газі, особливо якщо взяти до уваги той факт, що не відбувається викидів до атмосфери NO_x та SO_x .

MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) — це паливний елемент на основі розплавленого карбонатного електроліту, який працює при високих температурах (близько $650\text{--}700^\circ\text{C}$). Електроліт у цьому типі паливних елементів складається з розплавлених карбонатів лужних металів, таких як

					КР.135.6211м	Аркуш
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

карбонати літію, натрію або калію. MCFC здатні безпосередньо використовувати різноманітні види палива, включаючи природний газ, біогаз або навіть вуглецеві паливні суміші, завдяки внутрішньому реформуванню, подібному до SOFC. [20]

Основні характеристики цього паливного елементу: [18, 19]

Паливо: H_2 , MeOH, Hydroxide

Електроди: Li/NiO, Li/Cr

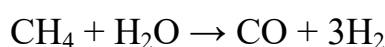
Робоча температура: 650 – 700 °C

Ресурс роботи: 15 000 год

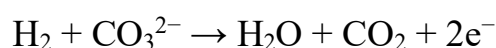
Питома потужність: 0,2 – 0,4 Вт/см²

Щільність потужності: 30 – 40 Вт/кг

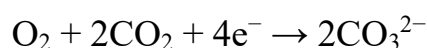
Спочатку природний газ в присутності водяної пари під дією високих температур у паливному елементі перетворюється у водень (H_2) і оксид вуглецю (CO):



Після цього водень надходить до анода, де він окислюється, реагуючи з карбонатними іонами (CO_3^{2-}) з електроліту. У результаті цієї реакції утворюються вода (у вигляді водяної пари), вуглекислий газ (CO_2) і електрони:



Електрони, що вивільняються, прямують через зовнішній електричний ланцюг, створюючи електричний струм. На катоді кисень (O_2) з повітря реагує з вуглекислим газом (CO_2), що подається зовні, і приймає електрони з зовнішнього кола. У результаті утворюються карбонатні іони (CO_3^{2-}), які повертаються до анода через електроліт:



Таким чином цикл роботи паливного елементу замикається.

Треба звернути увагу на те, що висока температура і агресивний характер розплавлених карбонатів можуть спричинити корозію та деградацію

					КР.135.6211м	Аркуш
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матеріалів, що впливає на довговічність паливних елементів. При цьому як і в SOFC, робота MCFC викликає викиди вуглецю в атмосферу. [20]

PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) — це паливний елемент, що використовує фосфорну кислоту (H_3PO_4) як електроліт і працює при середніх температурах, зазвичай близько 140–200°C.

Основні характеристики цього паливного елемента: [18, 19]

Паливо: H_2 , MeOH, LNG

Електроди: Pt/C, Pt/C

Робоча температура: 140 – 200 °C

Ресурс роботи: 10 000 год

Питома потужність: 0,1 – 0,5 Вт/см²

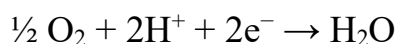
Щільність потужності: 100 – 220 Вт/кг

Спочатку водень (H_2) надходить до анода, де він розщеплюється на протони (H^+) і електрони (e^-):



Протони проходять через електроліт із фосфорної кислоти до катода, тоді як електрони прямують через зовнішнє електричне коло, створюючи електричний струм. Фосфорна кислота в PAFC служить провідником протонів (H^+) від анода до катода, але не проводить електрони, що змушує електрони рухатися через зовнішній електричний ланцюг і утворювати електричний струм.

В один час із цим на катоді кисень (O_2) із повітря реагує з протонами (H^+), які надійшли через електроліт, і електронами, що надійшли через зовнішнє коло, утворюючи воду (H_2O):



Важливо сказати, що PAFC мають вищу стійкість до домішок у водні (наприклад, до чадного газу, CO) порівняно з низькотемпературними паливними елементами, такими як PEMFC.

					КР.135.6211м	Аркуш
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Користуючись даними зі статті [19], що приведені у табл. 2.2, можна обрати тип паливних елементів, що найбільш підходить до застосування у гібридній установці судна газозову.

Таблиця 2.2. Показники різних типів паливних елементів

<i>Показник</i>	<i>AFC</i>	<i>PEMFC</i> <i>C</i>	<i>PAFC</i>	<i>DMFC</i> <i>C</i>	<i>SOFC</i>	<i>MCFC</i>
Ефективність	~60%	~60%	~47,5%	~25%	~60%	~52,5%
Питома витрата палива, г/(кВт·год)	~ 92	~ 60	~ 86	~ 80	~ 100	~ 78
Енергетична щільність, Вт/см ²	1	2	0,5	1	1	0,4
Ресурс роботи, год	10 000	6 000	10 000	6 000	20 000	15 000

Перш за все треба зазначити, що паливом для паливних елементів слід вибрати LNG. Таким чином важливо буде зазначити, що природний газ найкраще підходить для високотемпературних паливних елементів, таких як SOFC (твердий оксидний паливний елемент) та MCFC (плавлений карбонатний паливний елемент), оскільки вони можуть безпосередньо використовувати природний газ або інші вуглеводні завдяки здатності проводити внутрішнє риформінг-перетворення метану. Тобто обирати слід між SOFC та MCFC:

- Ефективність: більше у SOFC на 7,5%, що є гарним показником для паливних елементів;
- Питома витрата палива: у MCFC на 20% менше ніж у SOFC, проте для газозову 100 г/(кВт·год) не критичний показник;
- Енергетична щільність: однозначна перевага у SOFC – більше ніж у два рази займають менше простору при однаковій потужності.
- Ресурс роботи: у SOFC більший на чверть.

Звідси робимо висновок, що найкращим для газозову буде паливний елемент типу SOFC.

Розділ 3. Аналіз можливості застосування гібридної енергетичної установки з паливними елементами для судна-прототипа

3.1. Розрахунок буксирувального опору судна

Для більш ґрунтового аналізу тієї кількості потужності пропульсивного комплексу, яка необхідна для руху судна за заданою швидкістю, краще за все буде розрахувати буксирувальний опір судна. Для цього буде застосований метод Холтропа в програмі Free Ship.

Буксирувальний опір судна R_0 відповідно до досліджень Холтропа подають як суму його складових:

$$R_0 = R_V + R_W + R_{APP} + R_{TR} + R_B + R_A$$

де R_V – в'язкісний опір води (сума опорів тертя та форми корпусу); R_W – хвильовий опір, обумовлений утворенням корабельних хвиль; R_{APP} – опір виступних частин; R_{TR} та R_B – опір транця та опір бульба; R_A – кореляційний додток до опору, та частина що не враховується іншими складовими. [22]

Опір тертя виникає завдяки в'язкості рідини, що обумовлює прилипання її частинок до поверхні судна, та дотичним напруженням. Опір тиску з'являється під впливом різних фізичних процесів у потоці, що обтікає судно, на розподіл тиску вздовж його поверхні.

В'язкість призводить до перерозподілу тиску вздовж корпусу в порівнянні з тиском при обтіканні його нев'язкою рідиною. Примежовий шар формується вздовж судна і досягає найбільшої товщини у районі кінцевої частини. Частка опору тиску, що виникає внаслідок впливу в'язкості, називається в'язкісним опором тиску, або опором форми. Отже, сума опорів тертя і форми – це в'язкісний опір R_V .

Рух судна супроводжується хвилеутворенням. Частина опорів тиску, що виникає внаслідок впливу корабельних хвиль, називається хвильовим опором R_W .

Вертикальні та скулові кілі, рулі, конструкції виходу з корпусу гребних валів – дейдвудні потовщення – це все занурені у воду виступні частини, що впливають на величину опору його руху. Опір виступних частин R_{APP} має

					КР.135.6211м	Аркуш
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

в'язкісну природу й обумовлений складною взаємодією сформованого на них примежового шару з потоком, створеним примежовим шаром основного корпусу.

Табл. 3.1. Основні співвідношення при визначенні буксирувального опору [22]

<i>Velocities</i>	
<i>Ship's speed</i>	V
<i>Arriving water velocity to propeller</i>	V_A
<i>Effective wake velocity</i>	$V_m = V - V_A$
<i>Wake fraction coefficient</i>	$w = (V - V_A)/V$
<i>Forces</i>	
<i>Towing resistance</i>	R_T
<i>Thrust force</i>	T
<i>Thrust deduction fraction</i>	$F = T - R_T$
<i>Thrust deduction coefficient</i>	$t = (T - R_T)/T$
<i>Power</i>	
<i>Effective (towing) power</i>	$P_E = R_T \times V$
<i>Thrust power delivered by the propeller to water</i>	$P_T = P_E \times \eta_H$
<i>Power delivered to propeller</i>	$P_D = P_T \times \eta_B$
<i>Brake power of main engine</i>	$P_B = P_D \times \eta_S$

Транспортні судна мають різну конструкцію транця, неоднакову конфігурацію бульба, що обумовлює і різний опір руху. Відповідно до цих конструктивних особливостей судна окремо розраховуються складові до загального опору: опори транця R_{TR} та бульба R_B . [22]

Особливістю застосованої методики є складова буксирувального опору – кореляційний додаток R_A , який враховує вплив на опір судна його довжини. [23]

На рис. 3.1. зображені складові буксирувального опору

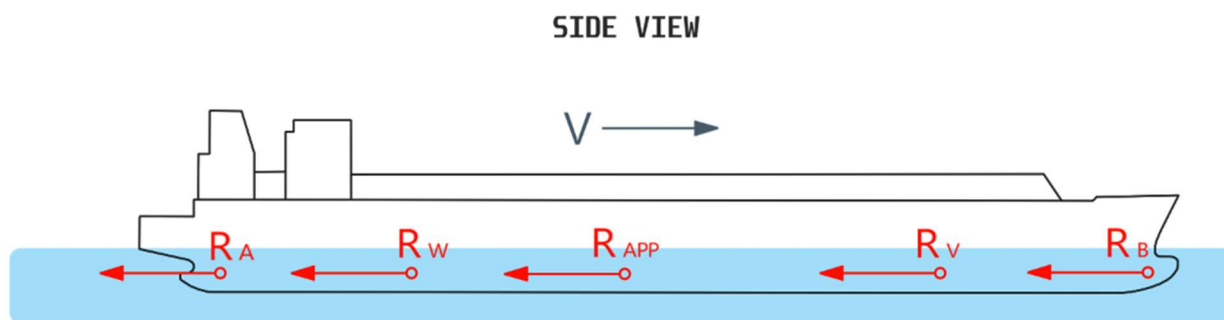


Рис. 3.1. Складові буксирувального опору корпусу судна.

Визначення розрахунковим шляхом величин, які характеризують таке складне явище, як рух судна у воді, лише на підставі теоретичних уявлень практично неможливо. Також неможливо обійтися при цьому лише статистичними натурними даними внаслідок постійних змін у корпусних конструкціях та інших чинників. А тому розрахунок буксирувального опору базується на даних модельних і натурних випробувань, рівень достовірності якого визначається даними LNG, практикою експлуатації різноманітних за формою корпусу суден. Такі розрахунки вдосконалюються по мірі накопичення статистичного матеріалу.

Рейсова лінія – це шлях або маршрут, який регулярно пройдений певним судном між двома або більше пунктами, тобто портами. До основних характерних рейсових ліній газовозів по типу «*BW Tulip*» можна віднести:

- *Маршрути міжнародного транспортування газів.* Газовози зазвичай працюють на маршрутах між різними країнами або континентами для перевезення скрапленого або зрідженого природного газу.
- *Маршрути до терміналів зберігання і регазифікації.* Газовози можуть обслуговувати маршрути до терміналів, де зберігається СПГ або ЗПГ, а також де проводиться процес регазифікації газу перед подальшим його використанням.
- *Маршрути до різних частин світу з точки видобутку газу.* Деякі газовози можуть мати рейси, спрямовані безпосередньо з місць видобутку газу, наприклад, з газових родовищ до різних регіонів

світу, де цей газ буде використовуватися або подальше розподілення.

- *Маршрути через морські канали та ключові шляхи.* Залежно від місць походження та призначення, газовози можуть використовувати морські канали, такі як Суецький або Панамський канали, для скорочення шляху та ефективної доставки.
- *Маршрути в районах з високим попитом на газ.* Газовози можуть працювати на маршрутах до регіонів з високим попитом на газ, таких як індустріальні зони, де використання газу для енергетичних потреб є значним.

Судна типу «BW Tulip» зазвичай служать для перевезення газів на великі відстані, що вимагає спеціальних умов зберігання та транспортування. Їх рейси визначаються як маршрутами міжнародних транспортних потоків газів, так і необхідністю доставки газу до конкретних місць споживання чи зберігання. Звідси можна зробити висновок, що рейсова лінія для судна «BW Tulip» проходить маршрут, що знаходиться між портами або пунктами завантаження чи розвантаження.

Конкретний рейс може включати кілька портів на своєму шляху, наприклад, на період з 10 по 30 вересня 2023 року зазначене судно рухалося рейсом п. "US NYA" – п. "HR KRK". Порт "US NYA" (NYANNIS) - порт у штаті Массачусетс, який обслуговує пасажирські та вантажні судна. Порт «HR KRK» (KRK) – це порт в Хорватії, який розташований на острові Крк в Адріатичному морі.

Для більш детальної характеристики цієї рейсової лінії проведемо аналіз її гідрометеорологічних параметрів, починаючи з визначення кліматичної зони за рис. 3.2. та 3.3.

					КР.135.6211м	Аркуш
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

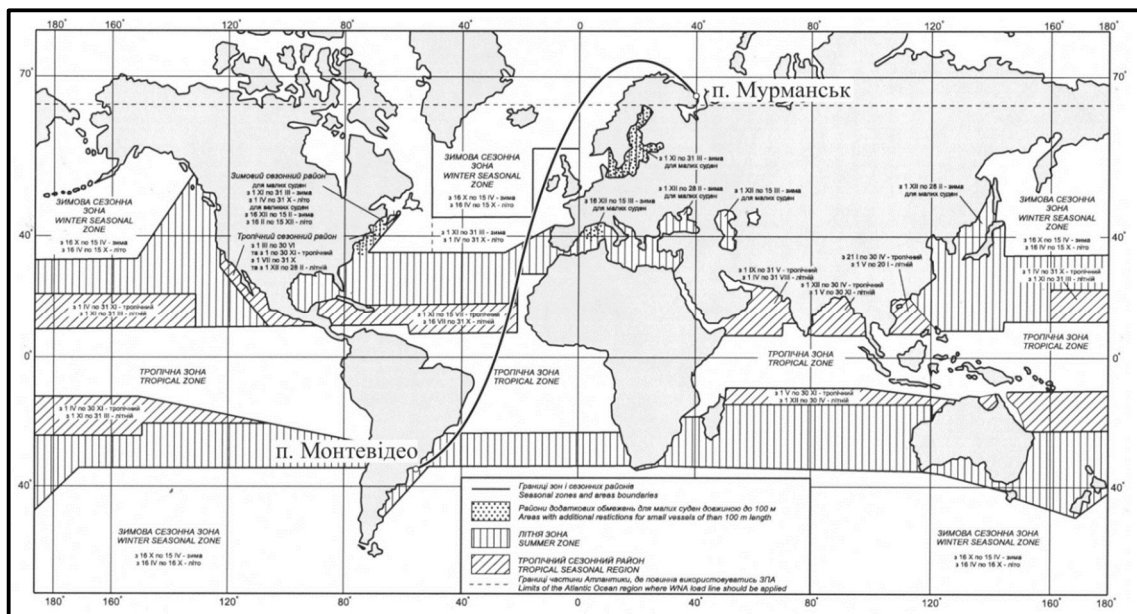


Рис. 3.2. Кліматичні зони світового океану [23]

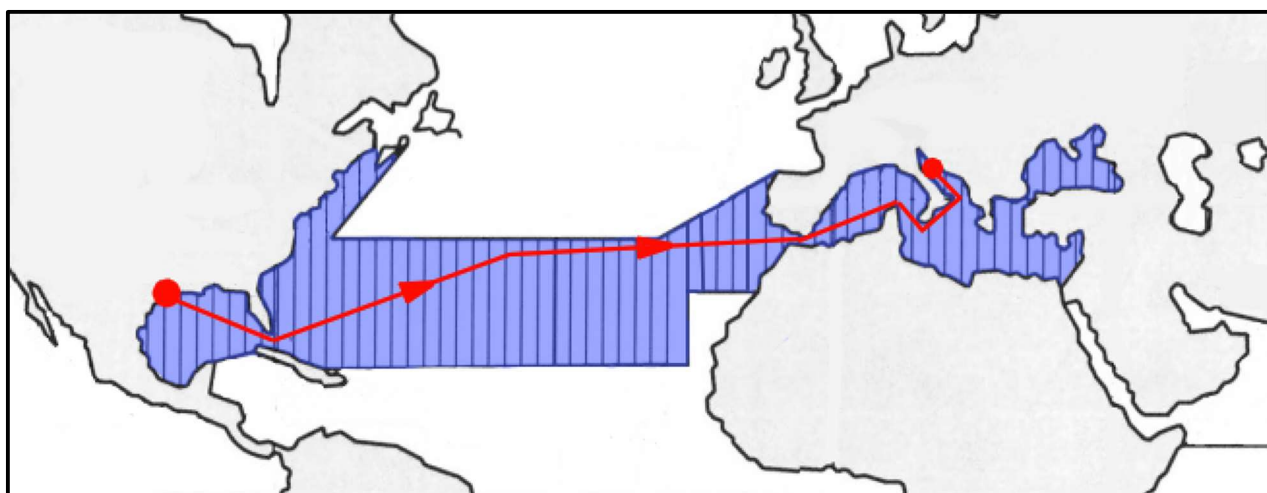


Рис. 3.3. Кліматична зона рейсової лінії US YIN – HR KRK [23]

В результаті побудови рейсової лінії та позначення кліматичної зони (рис. 3.3.) було визначено, що судно весь час рухається літньою зоною.

Користуючись веб-додатком *Earth: a global map of wind, weather and ocean conditions*, можна визначити гідрометеорологічні властивості гідросфери та атмосфери протягом усієї подорожі судна.

За допомогою графічного редактора було прокладено орієнтовну рейсову лінію судна. При цьому місця з найбільшими показниками позначені точками А, В, С та D.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

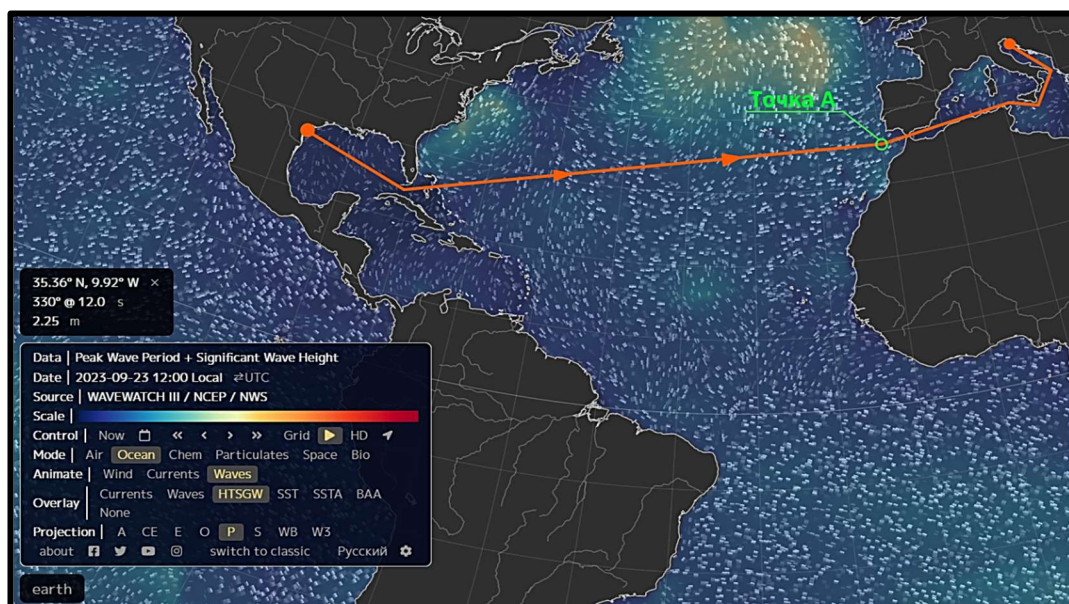


Рис. 3.4. Мапа періоду хвилі та найбільшої висоти хвилі в північних широтах атлантичного океану [24]

Користуючись мапою на рис. 4.3, було визначено, що протягом всієї рейсової лінії судна висота хвилі лежить в межах від 1 м до 2,25 м, при цьому в *точці А* спостерігається найбільше її значення. В *точці А* значення періоду хвилі дорівнює 12 секунду, за цей час хвиля долає шлях, що дорівнює між сусідніми вершинами хвильового профілю.

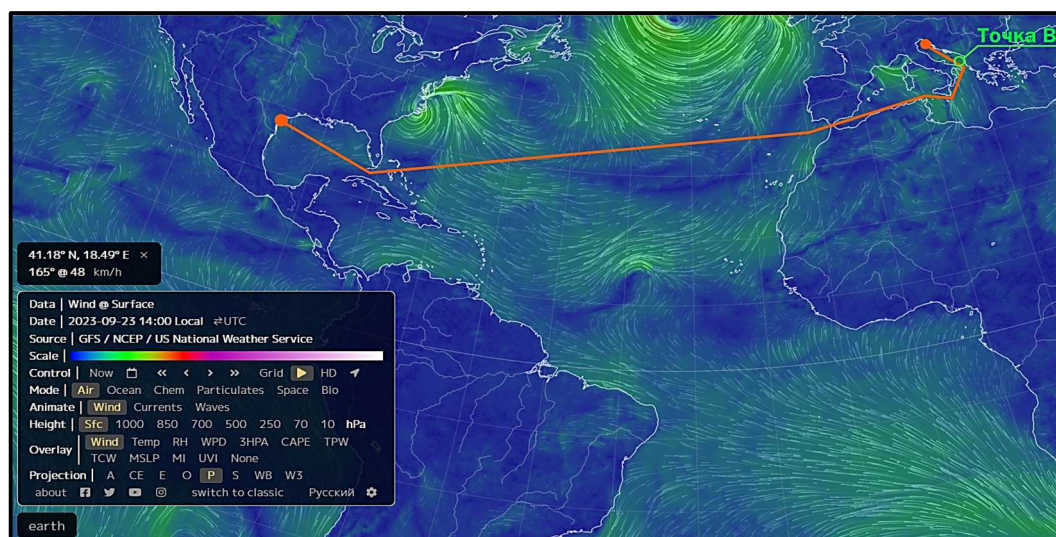


Рис. 3.5. Мапа швидкості вітру атлантичного океану [24]

Якщо взяти до уваги дані з мапи на рис. 3.5, можна зазначити, що протягом всієї рейсової лінії судна швидкість вітру в межах від 4 км/год до 48 км/год, при цьому в *точці В* спостерігається найбільше її значення.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КР.135.6211м

Аркуш

59

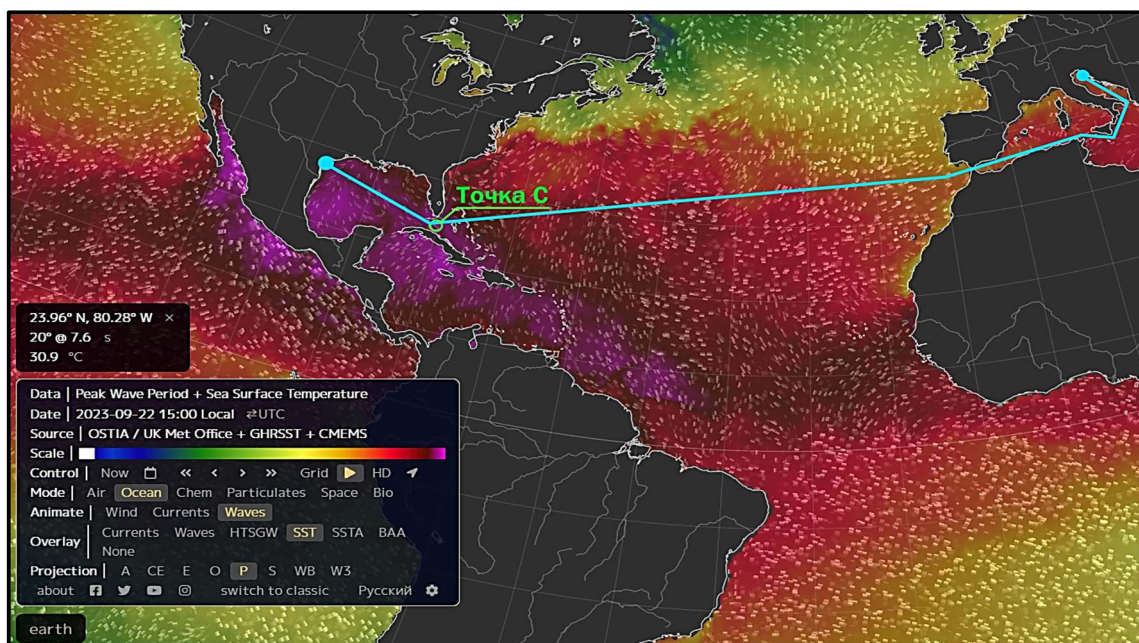


Рис. 3.6. Мапа температури на поверхні атлантичного океану [24]

Користуючись мапою на рис. 3.6, було визначено, що протягом всієї рейсової лінії судна температура на поверхні води приймає значення від 21,9 °C до 30,9 °C, при цьому в *точці С* спостерігається найбільше її значення.

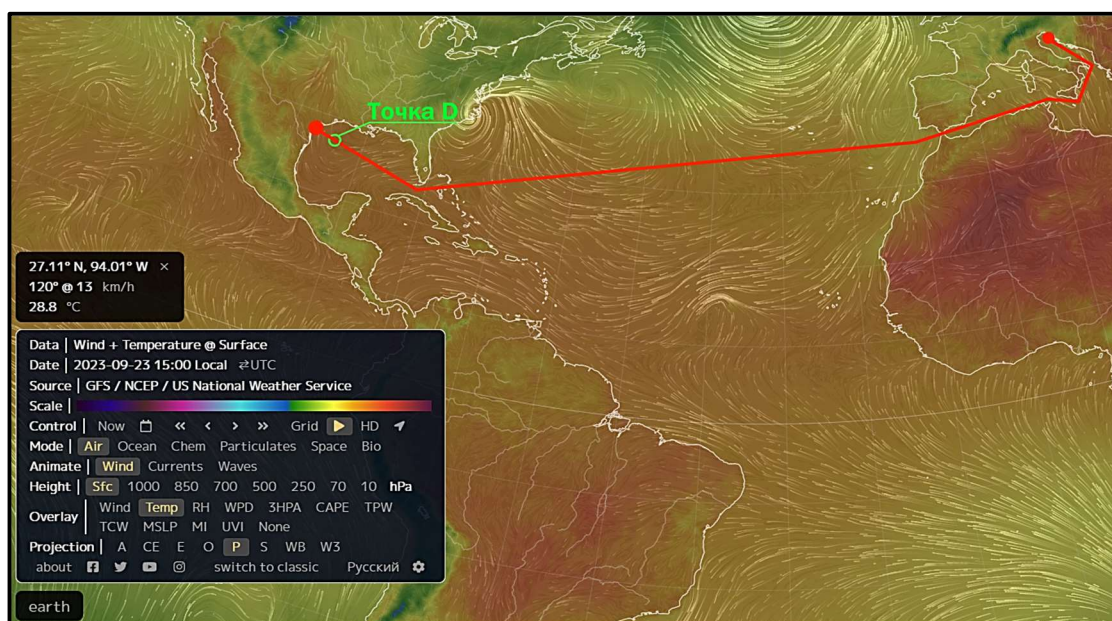


Рис. 3.7. Мапа температури повітря в північних широтах атлантичного океану [24]

Якщо взяти до уваги дані з мапи на рис. 3.7, можна зазначити, що протягом всієї рейсової лінії судна температура повітря приймає значення від 20,5 °C до 28,8 °C, при цьому в *точці D* спостерігається найбільше її значення.

Табл. 3.4. Дані для розрахунку опору судна методом Холтропа у FreeShip [7]

Основні характеристики	
Початкова швидкість	12 вузлів
Кінцева швидкість	19,5 вузлів
В'язкість води	$1,189 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
Питома маса води	$1,025 \text{ т/м}^3$
Корпус	
Довжина між перпендикулярами	282,9 м
Довжина по ватерлінії	294,9 м
Ширина по ватерлінії	46,6 м
Ширина на міделі	46,6 м
Проектна осадка	11,5 м
Осадка на міделі	11,5 м
Осадка носом	11,5 м
Осадка кормою	11,5 м
Абсциса миделя	141,45 м
Змочена площа поверхні	$9257,5 \text{ м}^2$
Площа ватерлінії	$5613,55 \text{ м}^2$
Водотоннажність	$49941,4 \text{ м}^3$
Абсциса центру величини	-2,669%
Призматичний коефіцієнт	0,5842
Дані для обліку умов експлуатації	
Висота хвилі 3% забезпеченості	6 м
Курсовий кут набігання хвиль	110°
Швидкість вітру	12 м/с
Курсовий кут вітру	45°
Висота надводного борту	26,5 м
Питома маса повітря	$1,226 \text{ кг/м}^3$
Глибина води	125 м
Занурена площа мідель-шпангоута	$0,97 \text{ м}^2$
Абсолютна шорсткість	300 мкм
Коефіцієнт урахування експлуатаційних умов K_e	$K_e = 1,08$

Користуючись сформованою таблицею 3.4 виконуємо розрахунок буксирувального опору судна.

На рис. 3.8 наведено скріншот розрахунку методом Холтропа в програмі FreeShip.

В результаті, можна зробити висновок, що лінія рейсу судна має сприятливі показники для виконання подорожі та доставки вантажу.

Розрахунок опору судна методом Холтропа проводиться за допомогою програмного пакету FreeShip. І починається з формування таблиці початкових даних, що наведені в табл. 3.8.

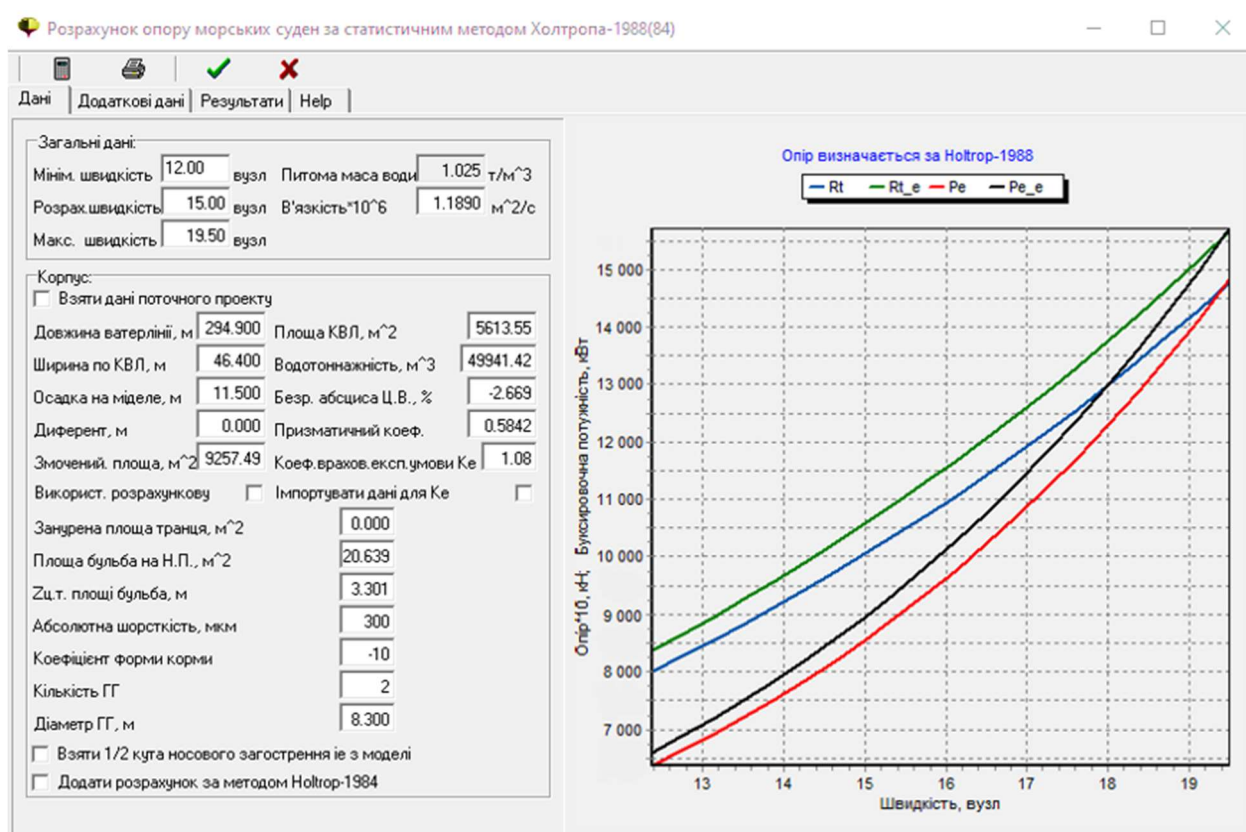


Рис. 3.8. Інтерфейс програми FreeShip під час розрахунку методом Холтропа

Результати розрахунку буксирувальної потужності й опору за методом Холтропа занесено до табл. 3.5, де V_s та V_{ms} – швидкість судна у вузлах та м/с відповідно; R_f та R_r – опір тертя та форми корпусу судна відповідно; R_{T_e} та P_{e_e} – буксирувальний опір та буксирувальна потужність відповідно, що розраховані з урахуванням коефіцієнт $K_e = 1,08$; R_T та P_e – буксирувальний

опір та буксирувальна потужність відповідно, що розраховані при «чистому корпусі».

Табл. 3.5. Результати розрахунку буксирувальної потужності й опору за методом Холтропа в програмі FreeShip

V_s	V_{ms}	F_r	R_f	R_r	R_T	P_e	R_{T_e}	P_{e_e}
вузл	м/с	-	кН	кН	кН	кВт	кН	кВт
12	6.17	0.115	511.0	213.7	424.7	6756,6	458.7	6955,5
12.43	6.39	0.119	532.2	222.1	454.3	6999,6	490.7	7192,3
12.86	6.61	0.123	454.1	230.9	485.0	7267,4	523.8	7444,8
13.29	6.83	0.127	476.6	240.1	516.7	7584,7	558.1	7778,7
13.71	7.06	0.131	499.8	249.8	549.6	7894,4	593.5	8101,2
14.14	7.28	0.135	523.6	259.9	583.5	8187,5	630.2	8406,6
14.57	7.5	0.139	548.0	270.6	618.6	8485	668.1	8678
15	7.72	0.143	573.1	281.8	654.9	8908,2	707.3	9100,1
17.25	8.87	0.165	715.4	352.5	867.9	11258,1	937.4	11678,5
19.5	10.03	0.187	975.1	452.0	1127.1	14318,5	1217.3	14889,5

На основі отриманих даних було побудовано графічні залежності отриманих параметрів від швидкості.

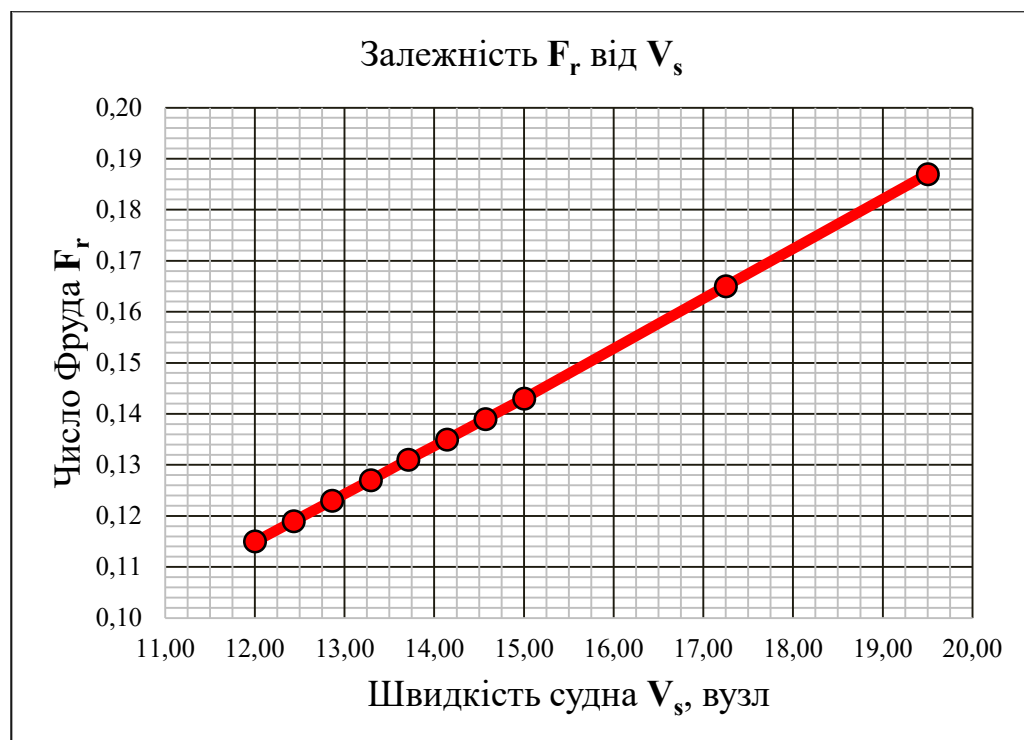


Рис. 3.9. Графічна залежність числа Фруда від швидкості судна

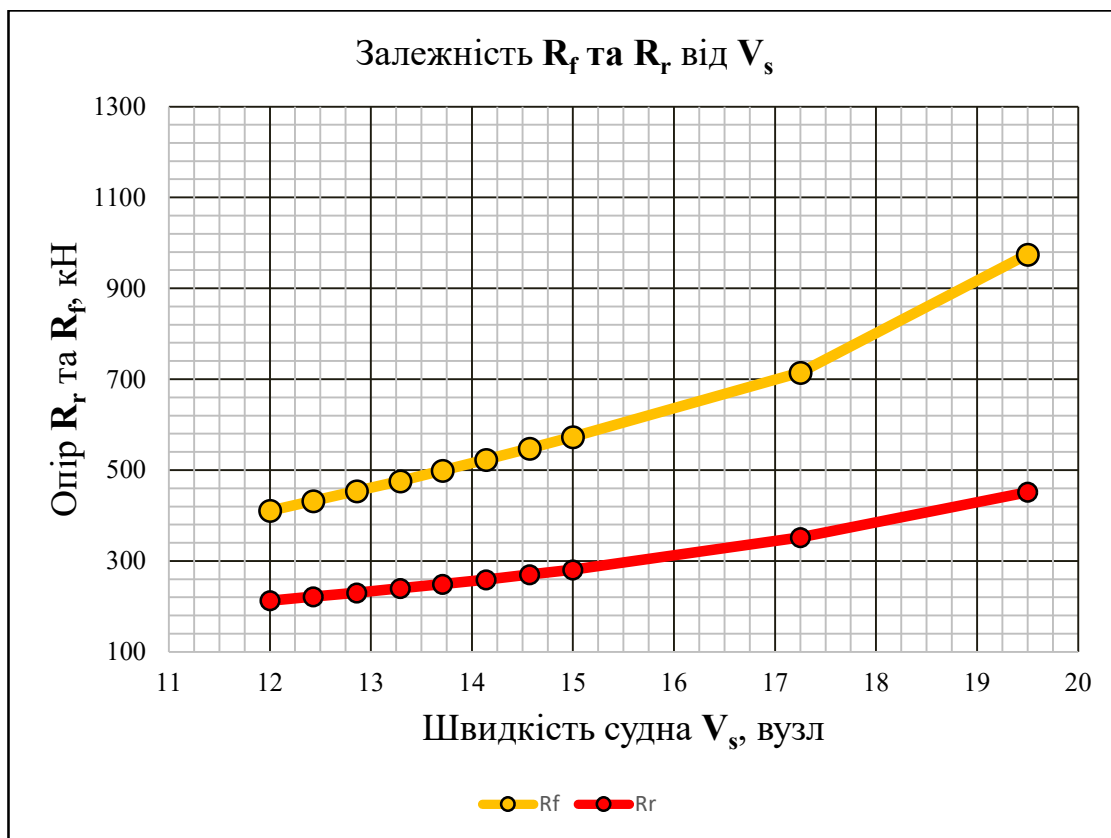


Рис. 3.10. Графічна залежність опорів тертя та форми корпусу від швидкості судна

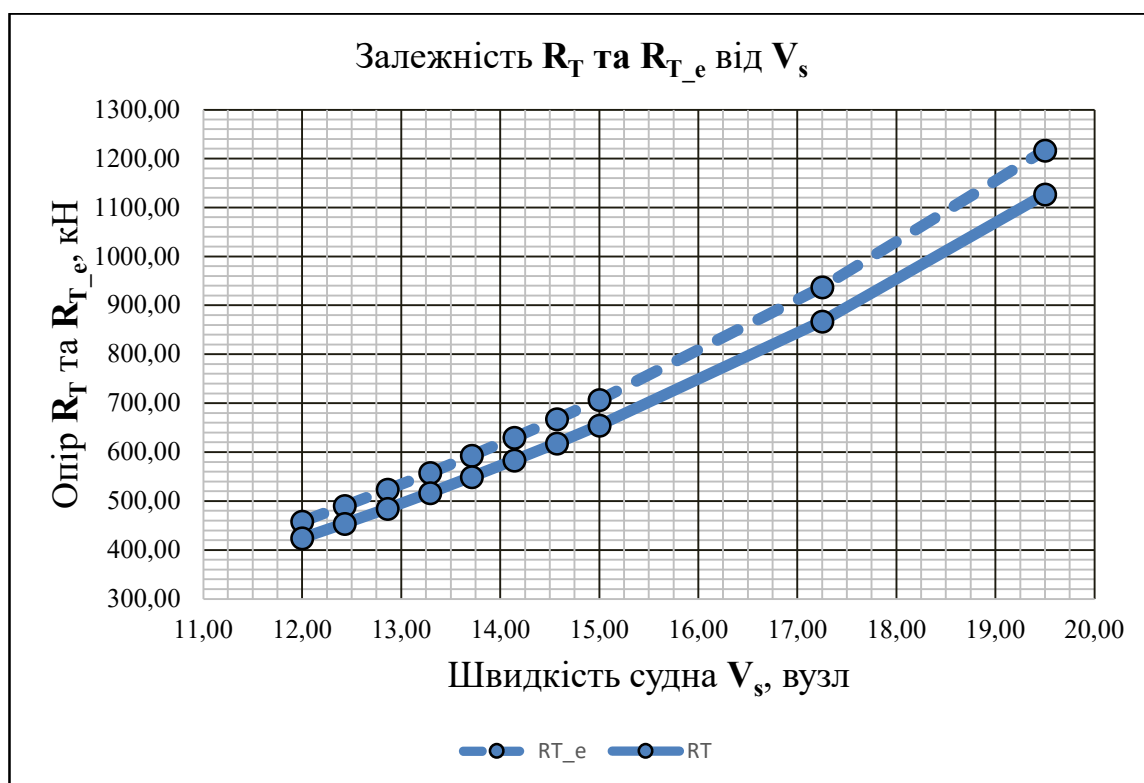


Рис. 3.11. Графічна залежність буксирувальних опорів при різних ступені обростання корпусу від швидкості судна

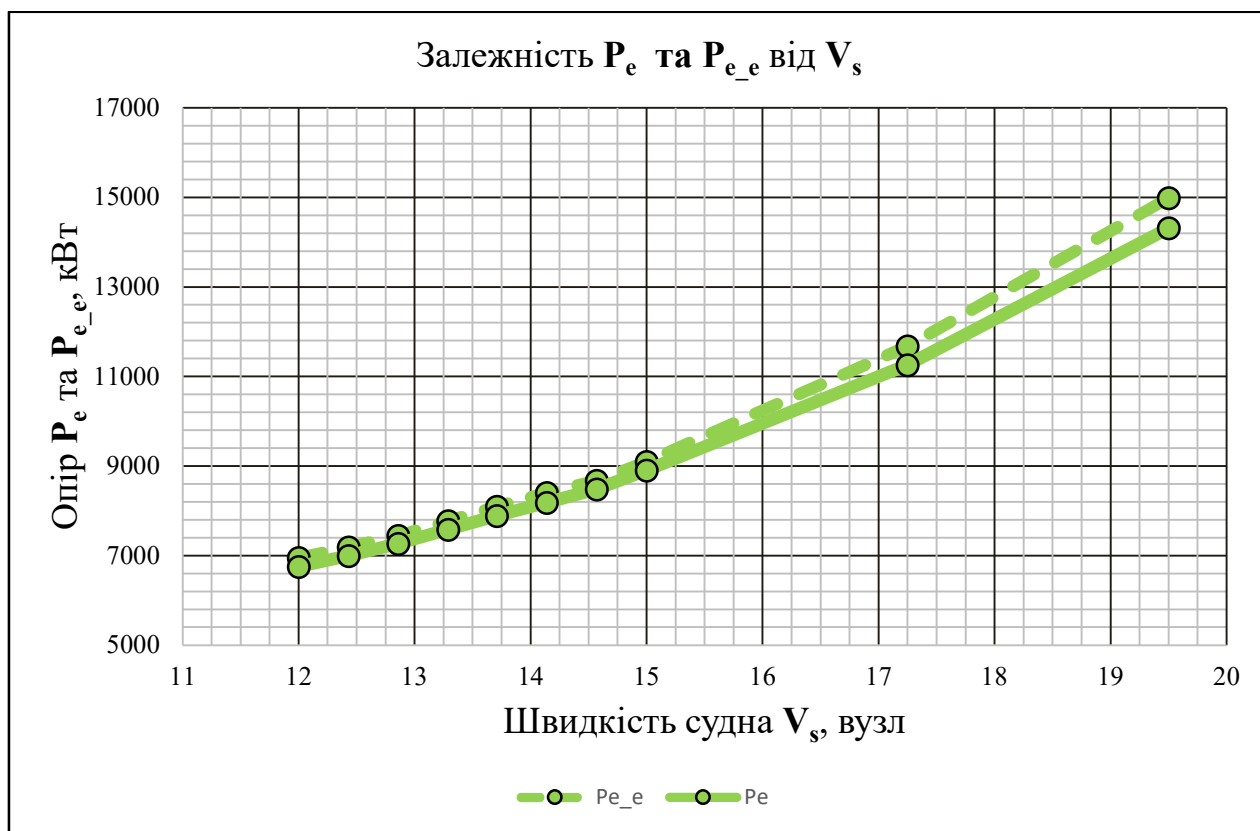


Рис. 3.12. Графічна залежність буксирувальних опорів при різних ступені обростання корпусу від швидкості судна

Аналіз отриманих залежностей показує, що зі зростанням швидкості судна буксирувальний опір і відповідно буксирувальна потужність зростають.

Для досягнення необхідної швидкості у 19,5 вузлів, головні двигуни повинні працювати майже на повну потужність, що збільшує кількість експлуатаційних витрат та погано впливає на ресурс роботи двигуна.

3.2 Обґрунтування нової схеми енергетичної установки

Відповідно до результатів розрахунку буксирувальної потужності й опору за методом Холтропа в програмі FreeShip щоб розігнати судно зі швидкості 17,25 вузл до 19,5 вузл, необхідно прикласти майже на 3МВт більше потужності.

Для подолання буксирувального опору судна і при його роботі зі швидкістю 19,5 вузл пропульсивний комплекс повинен видавати потужність

більшу за $N_R = 14\,889,5$ кВт. При цьому важливо зазначити, що це значення не відповідає вихідній потужності на роторі двигуна. До передачі енергії гребному гвинту ще необхідно врахувати її втрати на механічній передачі, валопроводі та врахувати пропульсивний коефіцієнт. Для цього приймаємо: [25]

ККД валопроводу: $\eta_{ВП} = 0,99$; ККД прямої передачі: $\eta_{П} = 1$; пропульсивний коефіцієнт: $\eta = 0,97$

До впровадження гібридних технологій двигуни судна працювали з навантаження у 90% при $N_e^{ГД(SMCR\ 90\%)} = 10778$ кВт.

Таким чином можна оцінити чи вистачало цієї потужності для руху судна зі швидкістю 19,5 вузл:

$$N_R = 2 \cdot N_e^{ГД(SMCR\ 90\%)} \cdot \eta_{ВП} \cdot \eta \cdot \eta_{П} = 2 \cdot 10778 \cdot 0,99 \cdot 1 \cdot 0,7 = 15012,3 \text{ кВт}$$

Можна зробити висновок, що механічної енергії для приводу гребного гвинта вистачало, проте за проведеною оцінкою її ледве вистачає.

Згідно з виконаним звітом за допомогою застосунку WinGD – GTD (рис. 3.13), технічні характеристики встановленого на судно двигуна 5X72DF-2.2 можна детально проаналізувати при різних навантаженнях.

Conditions				ISO				Design			
Air temperature before compressor				25 °C				45 °C			
Coolant temperature before SAC				29 °C				36 °C			
Relative humidity				30 %				60 %			
Exhaust gas back pressure				450 mm WC				450 mm WC			

Performance				ISO				Design			
Power [%]	Power [kW]	Speed [rpm]	BMEP [bar]	BSFC [g/kWh]	BSFC [g/kWh]	BSEF [kg/kWh]	tEaTm [°C]	BSFC [g/kWh]	BSFC [g/kWh]	BSEF [kg/kWh]	tEaTm [°C]
110.0	13173	75.1	16.74	0.9	178.3	8.18	253	0.9	181.3	7.60	295
100.0	11975	72.8	15.71	0.9	176.8	8.48	236	0.9	179.8	7.90	274
95.0	11376	71.6	15.18	0.9	173.2	8.41	219	0.9	176.2	7.78	259
90.0	10778	70.3	14.64	1.0	170.0	8.43	210	1.0	173.0	7.76	250
85.0	10179	69.0	14.10	1.0	167.9	8.54	204	1.0	170.9	7.84	246
80.0	9580	67.6	13.54	1.0	166.6	8.66	201	1.0	169.6	7.94	243
75.0	8981	66.1	12.97	1.1	165.7	8.91	199	1.1	168.7	8.15	241
70.0	8383	64.6	12.39	1.1	165.3	9.02	197	1.1	168.3	8.24	239
60.0	7185	61.4	11.18	1.3	165.4	9.37	197	1.3	168.4	8.54	239
50.0	5988	57.8	9.90	1.4	166.5	9.59	202	1.4	169.5	8.73	245
40.0	4790	53.6	8.53	1.7	168.5	9.61	216	1.7	171.5	8.72	259
30.0	3593	48.7	7.04	2.0	170.2	10.02	222	2.0	173.2	9.15	260
25.0	2994	45.9	6.23	2.2	170.0	11.27	203	2.2	173.0	10.39	236

Рис. 3.13. Таблиця експлуатаційних характеристик двигуна 5X72DF-2.2 в залежності від його навантаження

Головною метою даної роботи є оцінити можливість зниження навантаження на головному двигуні судна, витрати палива та кількості

					КР.135.6211м	Аркуш
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відхідних газів, компенсуючи його роботою гібридних технологій в складі СЕУ. Для більш наглядної демонстрації представлені графіки залежності технічних параметрів роботи двигуна від його навантаження (рис. 3.14 та 3.15). Використовуючи їх необхідно вибрати відповідну точку, що буде відповідати новому режиму роботи двигуна.

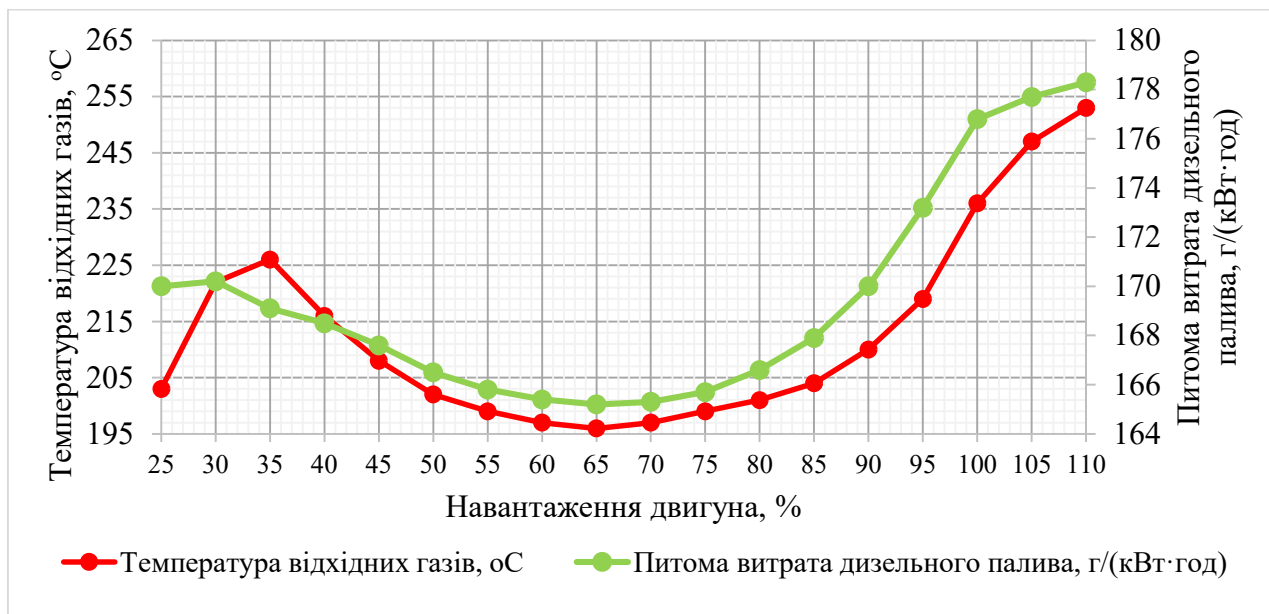


Рис. 3.14. Графік залежності витрати палива та температури відхідних газів в залежності від значення навантаження двигуна

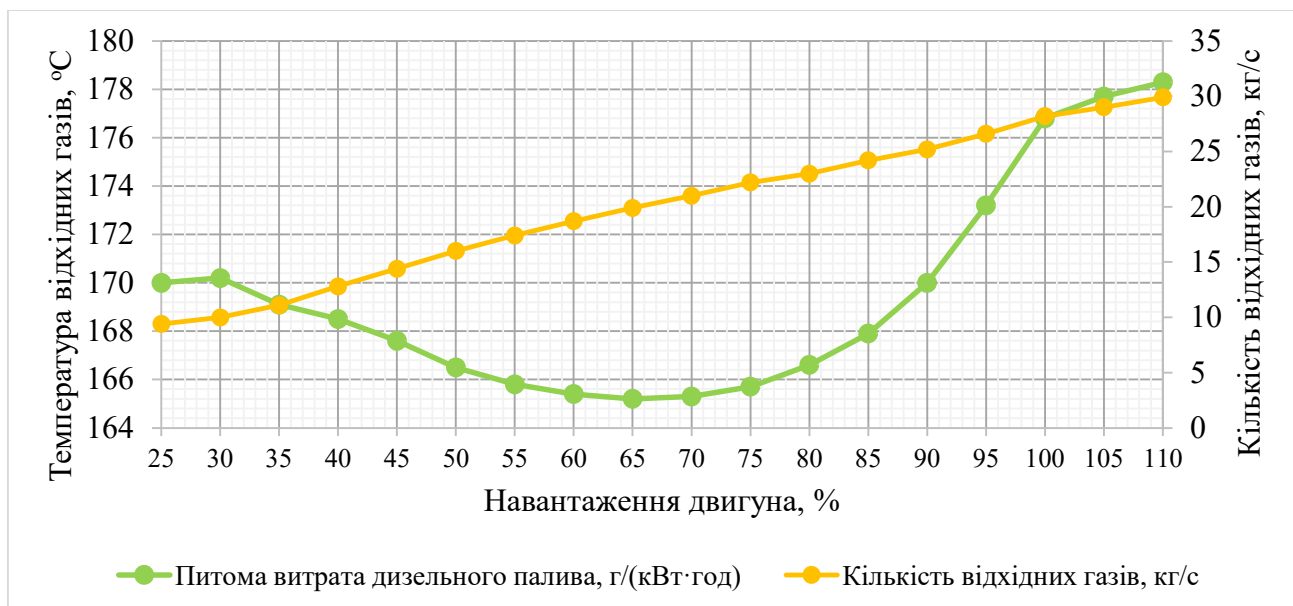


Рис. 3.15. Графік залежності витрати палива та кількості відхідних газів в залежності від значення навантаження двигуна

Одразу важливо зазначити, що експлуатація двигуна нижче 65...70% навантаження може супроводжуватись накопиченням сажі та незгорілих вуглеводнів у камері згоряння, а також в системі вихлопу. Це обумовлене тим, що температура в циліндрах часто недостатньо висока для повного згоряння палива.

По приведеним графікам залежності можна зробити висновок, що починаючи з 70% зниження навантаження на двигуні призводить до зменшення витрати палива лише 0,1 г/(кВт·год), а з 65% навпаки – збільшує його значення. Через це, новим оптимальний режимом роботи для обраного двигуна можна прийняти експлуатацію з навантаження у 70%, потужністю двигуна 8383 кВт, витратою палива 165,3 г/(кВт·год) та кількістю відхідних газів 23,7 кг/с при температурі 200 °С. При новому режимі роботи значення питомої витрати палива може бути знижене на 4,7 г/(кВт·год), а кількість відхідних газів на 4,2 кг/с.

Однак працюючи при такому навантаженні два головних двигуна не зможуть забезпечити необхідне значення механічної енергії для руху судна зі швидкістю 19,5 вузлів. Розрахуємо нестачу енергії у головних двигунів, але вже при $\eta_{\Pi} = 0,99$:

$$N_{\Delta} = (N_R \cdot \eta_{\text{ВП}} \cdot \eta \cdot \eta_{\Pi}) - 2 \cdot N_e^{\text{ГД}(SMCR 70\%)}$$

$$N_{\Delta} = (14\,889,5 \cdot 0,99 \cdot 0,7 \cdot 0,98) - 2 \cdot 8383 = 4143,4 \text{ кВт} \approx 4200 \text{ кВт}$$

Нестачу у 4143,4 кВт пропонується перекрити використанням акумуляторних батарей та паливних елементів.

Також важливо звернути увагу на невелику температуру відхідних газів ГД після турбокомпресора. На виході з котла температура газів не повинна бути нижчою за 180 °С. Таким чином, гази втрачають до 20 °С під час проходженням утилізаційним котлом. У цієї теплової енергії дуже низький парогенеруючий потенціал і для отримання необхідної кількості пари необхідно буде підводити до котла палива і запускати процес згоряння. Для економії кількості палива, що може бути потенційно витрачено пропонується до складу СЕУ включити додатковий утилізаційний котел, що буде

					КР.135.6211м	Аркуш
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовувати теплоту відпрацьованих газів дизель-генераторів для генерації насиченої пари. [25]

В розділі 2 було проаналізовано можливості різних видів зазначених батарей та паливних елементів. Згідно з підведеними підсумками на судні-газовозі доцільніше використовувати паливні елементи SOFC та Li-ion батареї. Вони будуть компенсувати нестачу потужності двигунів пропульсивного комплексу за допомогою інтегрованої системи РТО/РТІ та застосуванням на валопроводі механічної передачі з валогенератором (відбором потужності з ГД – режим РТО) та електродвигуном (додаванням потужності до ГД – режим РТІ). [26]

Враховуючи все зазначене була запропонована нова схема енергетичної установки (рис. 3.16).

Щоб оцінити особливості роботи пропульсивного комплексу та СЕУ в цілому, пропонується розбити вже розглянутий рейс судна на відповідні часові проміжки:

Стоянка в порту – 1 доба. В складі СЕС працюють ДГ та SOFC. Якщо завантаження/розвантаження виконується не портовими засобами, а судовими, то кількість ГД відповідно збільшується. Батареї за можливості підзаряджаються з портової зарядної станції. В іншому випадку від СЕС.

Рейс – 20 діб. Прийнято, що 6 з 20 діб судно зі швидкістю 19,5 вузлів йшло районами ЕСА, Карибський басейн та Середземне море (по 3 доби на кожний район). В цей час ГД працював на прийнятому навантаженні – 70%, а нестачу енергії у ~4200 кВт компенсували акумулятори та паливні елементи з підведенням потужності до валопроводу через електродвигун.

					КР.135.6211м	Аркуш
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

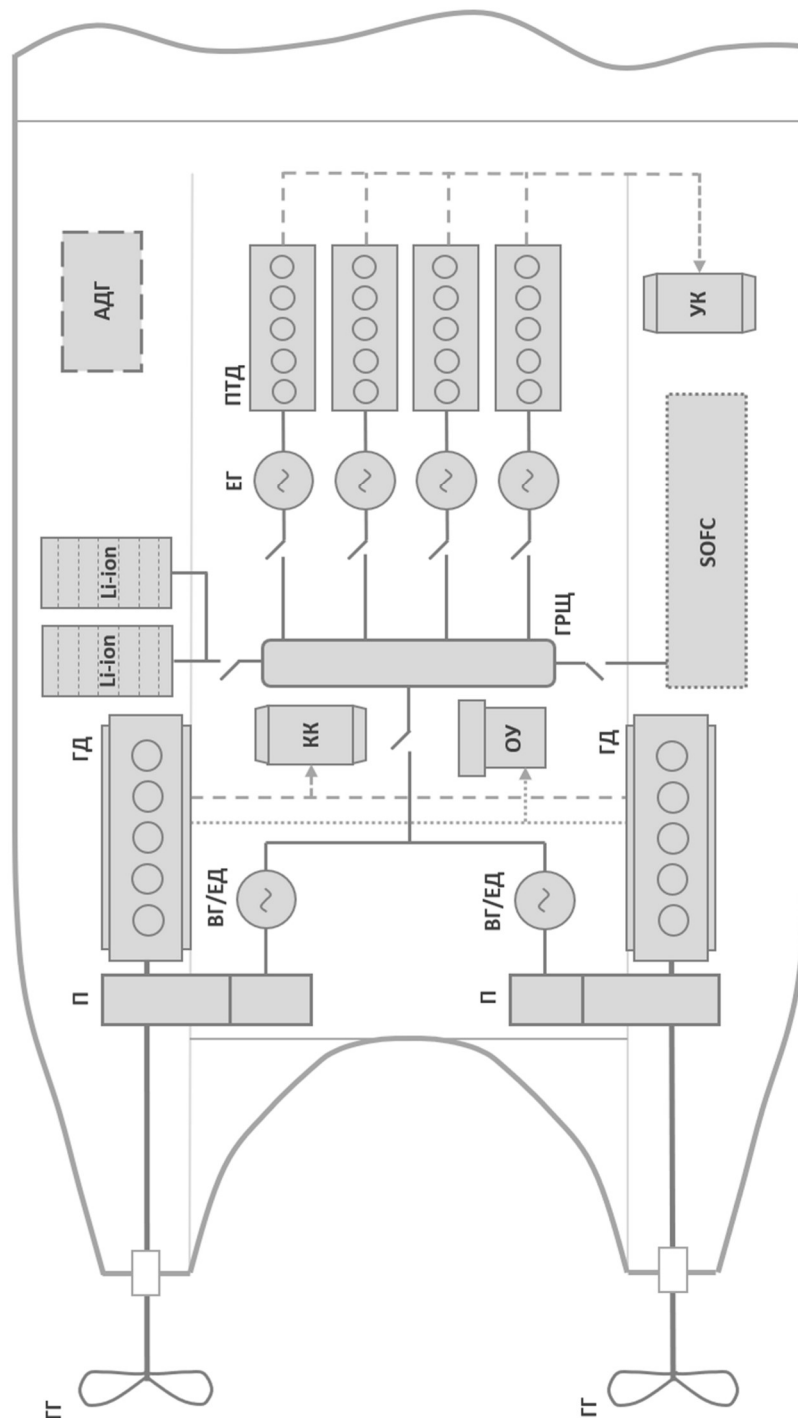


Рис. 3.16. Схема енергетичної установки газозову з впровадженням гібридних технологій:

ГГ – гребний гвинт; П – механічна передача; ВГ/ЕД – валогенератор/електродвигун; КК – комбінований котел; УК – утилізаційний котел; ОУ – опріснювальна установка; ГД – головний двигун; АДГ – аварійний дизель-генератор; ПТД – первинний тепловий двигун; ЕГ – електрогенератор; SOFC – Solid-oxide Fuel Cell

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КР.135.6211м

Аркуш

70

Інші 14 діб судно рухалось районами Атлантичного океану при такій самій швидкості – 19,5 вузл. Приймаємо, що цей час акумулятори не працюють на пропульсивний комплекс. Приймається, що під час руху зоною ЕСА (3-4 доби) вони були розряджені та потребують підзарядки. Таким чином, нестачу енергії батарей необхідно компенсувати. Пропонується це зробити збільшенням навантаження двигуна на 5-10%, щоб не доводилось знижувати швидкість руху судна. Паливні елементи працюють в тому ж режимі.

Стоянка в порту – 1 доба. В складі СЕС працюють ДГ та SOFC. Якщо завантаження/розвантаження виконується не портовими засобами, а судовими, то кількість ГД відповідно збільшується. Батареї за можливості підзаряджаються з портової зарядної станції. В іншому випадку від СЕС.

Далі пропонується розглянути режими роботи СЕУ з гібридними технологіями, що запропоновані виробником РТО/РТИ систем INGEDRIVE режими роботи для паромів середніх розмірів. [27]

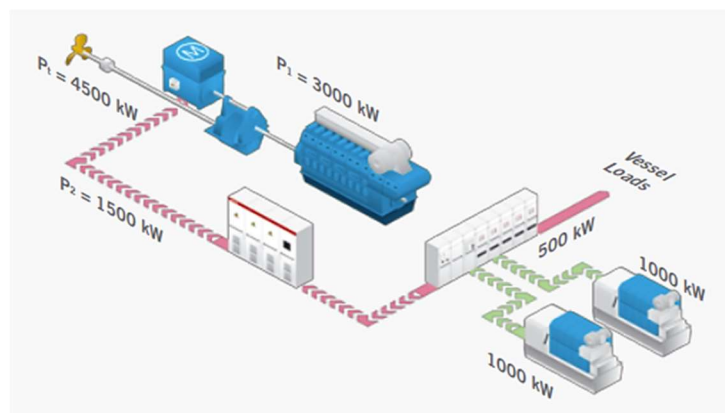


Рис. 3.19. Режим РТИ Booster Mode

Першим режимом, що буде розглянуто, є РТИ Booster Mode (рис. 3.19). Режим, обраний для максимальної швидкості. Валогенератор функціонує як допоміжний двигун і працює паралельно з головним дизельним двигуном. Отже, головний гвинт отримує потужність $P_{total} = P_1 + P_2$. Генератори постачають електроенергію як для силової установки, так і для споживачів судна. [27]

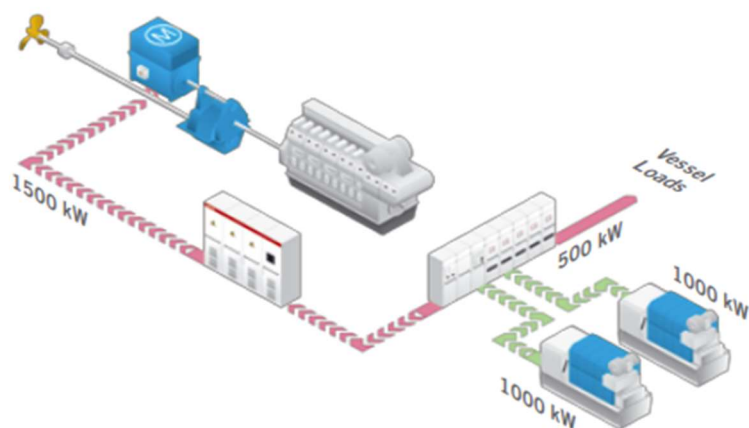


Рис. 3.20. Режим PTI Diesel – Electric Mode

Режим PTI Diesel – Electric Mode (рис. 3. 20) використовується на низьких швидкостях і не потребує основного дизельного двигуна, зменшуючи потребу в обслуговуванні. Потужність генераторів розподіляється між судновими споживачами та пропольсивною установкою. Вал генератора в цьому випадку працює як двигун. СЕУ може працювати в такому режимі у разі несправності головного дизельного двигуна, що дає судну можливість безпечно дістатися найближчого порту для ремонту. [27]

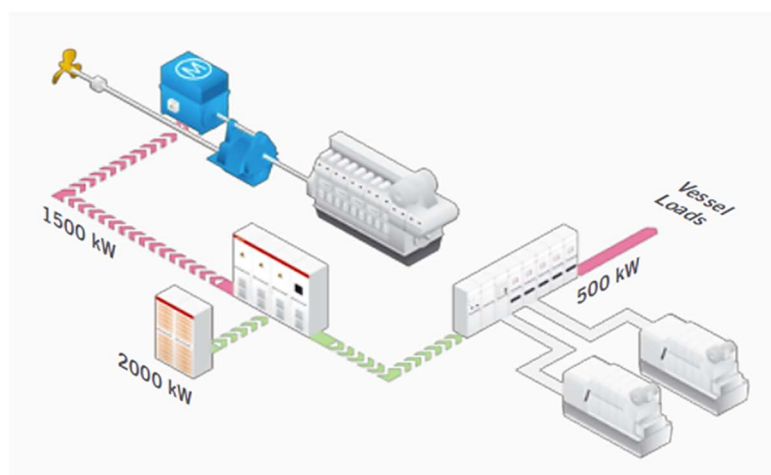


Рис. 3.21. Режим PTI Fully Electric Mode

У режимі, зображено на рис. 3. 21, батареї виробляють енергію, необхідну як для рушію, так і для споживачів судна. Основний дизельний двигун і генераторні установки вимкнені, через що робота судна безшумна та безвикидна. Очевидно, що цей режим, як і попередній, дозволяє у разі несправності ГД безпечно повернутися судну в порт. [27]

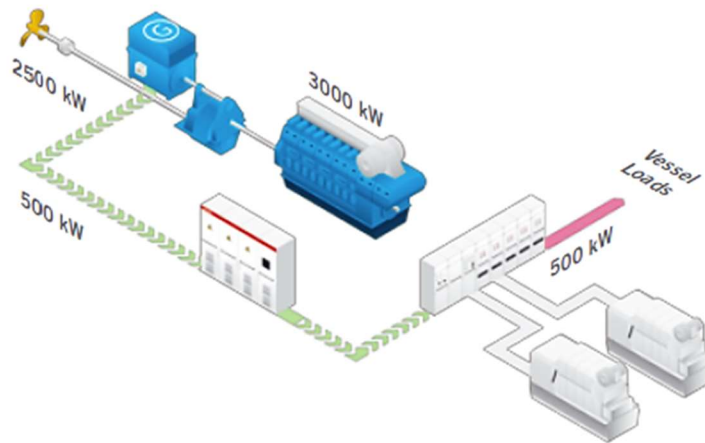


Рис. 3.22. Режим PTO Transit Mode

На режимі PTO Transit Mode головний дизельний двигун забезпечує енергію, необхідну для руху та додатково для забезпечення потреб споживачів судна. Дизель-генератори на цьому режимі не працюють. [27]

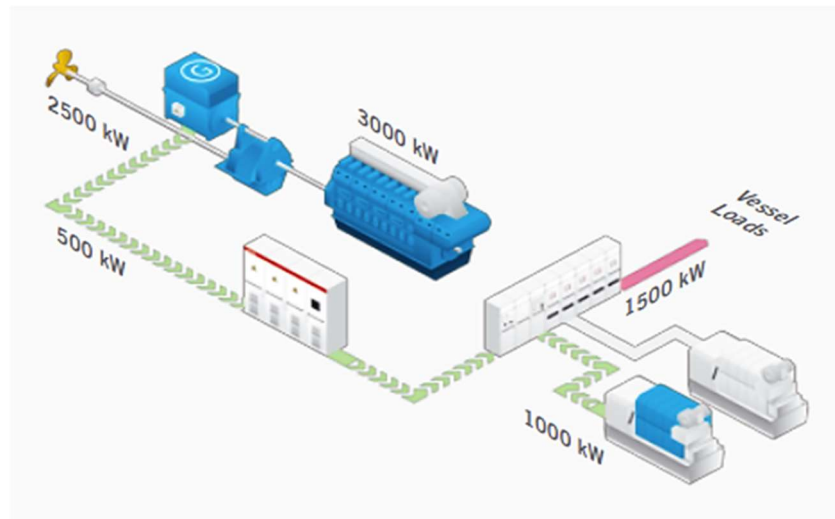


Рис. 3.23. Режим PTO Parallel Mode

Режим показаний на рис. 3. 23 використовується у випадках, коли потужність, необхідна для рушія та навантаження на судно, є вищою, ніж можуть забезпечити самі генераторні установки. У цих випадках головний дизельний двигун працює з частковим навантаженням і змінною швидкістю для оптимізації ефективності гвинта, а також починає працювати один із генераторів. [27]

Враховуючи рекомендації компанії INGEDRIVE та особливості роботи газозовів можна запропонувати наступні режими роботи судна (табл. 3.6).

					КР.135.6211м	Аркуш
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Табл.3.6. Основні та додаткові режими роботи СЕУ газозову BW Tulip з гібридними технологіями

Елемент СЕУ	Режими					Примітка
	Ходові					
	Ходовий поза зоною ЕСА з вантажем	Ходовий поза зоною ЕСА без вантажу	Ходовий поза зоною ЕСА з підзарядкою від ДГ	Ходовий поза зоною ЕСА з підзарядкою від ГД	Ходовий в зоні ЕСА з вантажем	
ГД	+2	+2	+2	+2	+2	
ОУ	+1	+1	+1	+1	+1	
ВГ (PTO)	-	-	-	+2	-	
ЕД (PTI)	+2	+2	+2	-	+2	
КК	+	+	+	+	+1	
УК	+	+	+	+	+	
ДГ	+3	+2	+4	+3	+3	1 ДГ резерв
SOFC	+	+	+	+	+	
Li-ion	-	-	-	-	+	
АДГ	-	-	-	-	-	
Елемент СЕУ	Стоянкові				Аварійний	Примітка
	Стоянковий з вантажними операціями		Стоянковий без вантажних операцій			
ГД	-		-		-	
ОУ	-		-		-	
ВГ (PTO)	-		-		-	
ЕД (PTI)	-		-		-	
КК	+1		+1		-	
УК	+		+			
ДГ	+2		+1		-	
SOFC	+		+		-	
Li-ion	-		-		-	
АДГ	-		-		+	

Судно має 3 основні режими роботи: ходовий режим з вантажем поза зоною ЕСА, ходовий режим з вантажем в зоні ЕСА та стоянковий режим з вантажними операціями. Інші режими є додатковими та використовуються рідше за основні.

Для кращої візуалізації складу суднової енергетичної установки було побудовано 3D-модель (рис. 3.25).

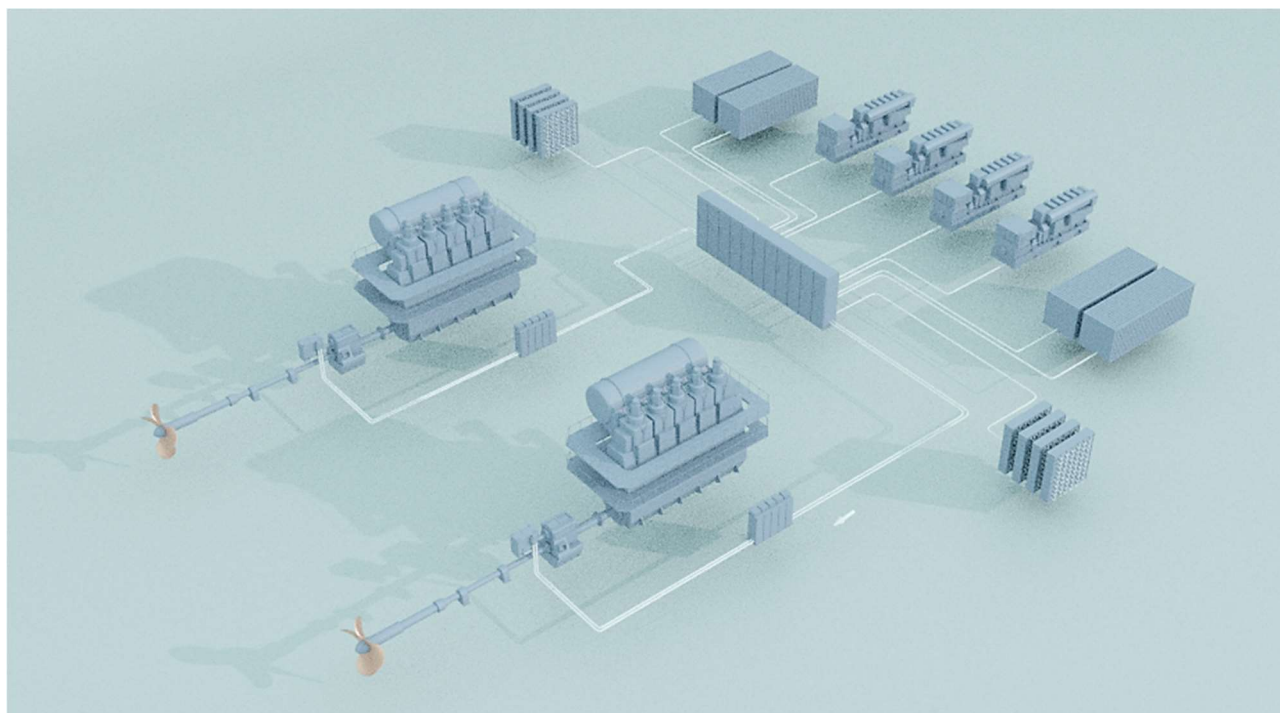


Рис. 3.25. 3D-модель нової схема пропульсивної установки судна

Розглянемо окремо кожний режим роботи СЕУ:

Ходовий режим без вантажу поза зоною ЕСА рідко застосовується через відсутність транспортної роботи газозову. Проте можливі випадки, коли судно прямує в місце для ремонту та обслуговування або повертається в порт призначення з рейсу. На цьому режимі роботи СЕУ два головних двигуна з навантаженням по 80% кожний та паливні елементи працюють на забезпечення судну відповідної швидкості. Два дизель-генератора працюють на забезпечення потреб судна та СЕУ. Теплову енергію для суднових потреб генерують комбінований котел, утилізуючи теплову енергію відхідних газів головних двигунів та спалюючи паливо, та утилізаційний котел, що виробляє насичену пару, використовуючи теплоту відхідних газів ДГ. Також на цьому

режимі працює опріснювальна установка, створюючи дистилат за рахунок теплової енергії води, що виходє з охолоджувального контуру ГД.

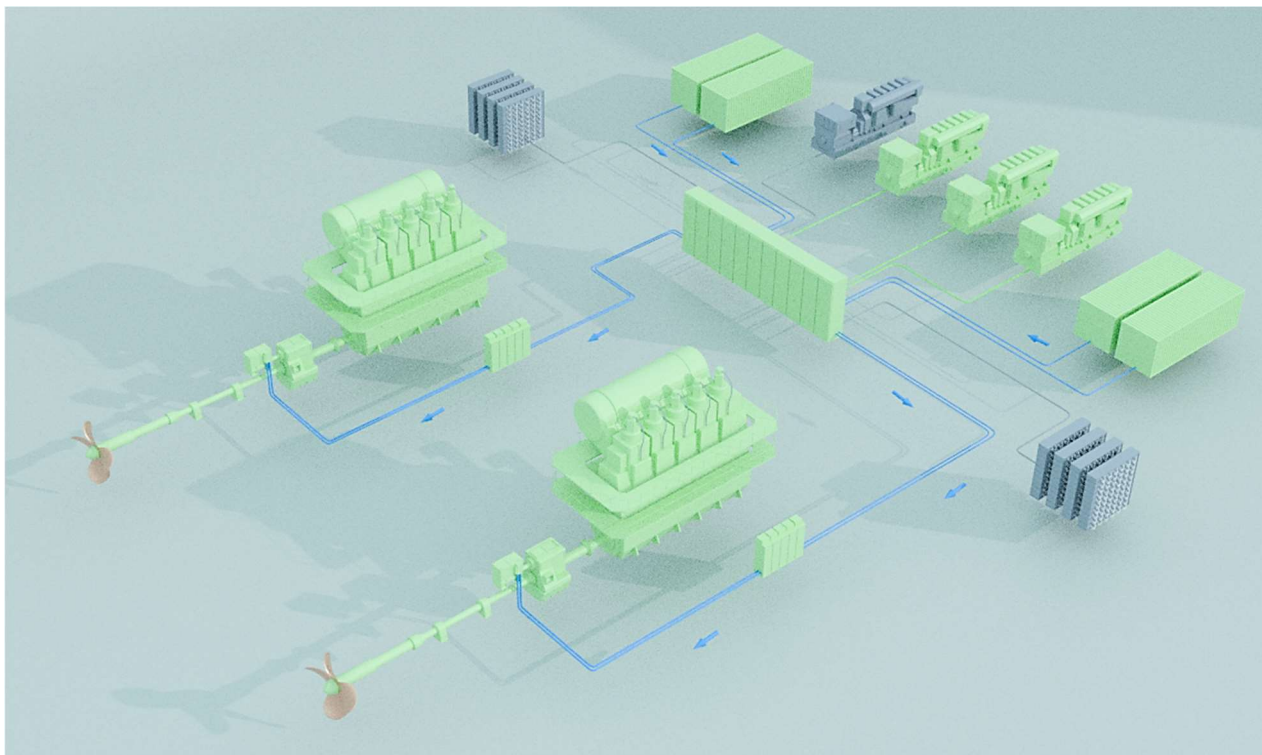


Рис. 3.26. 3D візуалізація роботи елементів пропульсивної установки судна на ходовому режимі з вантажем поза зоною ЕСА

Ходовий режим з вантажем поза зоною ЕСА (рис. 3.26) є найтривалішим режимом роботи СЕУ судна під час рейсу. На рушій в цьому випадку працюють два головних двигуна з навантаженням по 80% кожний. Паливні елементи передають енергію валопроводу через електродвигун, компенсуючи нестачу енергії на валу. Три дизель-генератори працюють для забезпечення потреб судна та СЕУ в електроенергії. Теплову енергію для суднових потреб генерують комбінований котел, утилізуючи теплову енергію відхідних газів головних двигунів та спалюючи паливо, та утилізаційний котел, що виробляє насичену пару, використовуючи теплоту відхідних газів ДГ. Також на цьому режимі працює опріснювальна установка, створюючи дистилат за рахунок теплової енергії води, що виходє з охолоджувального контуру ГД.

Ходовий режим з вантажем в зоні ЕСА (рис. 3.27) – це перший основний ходовий режим роботи СЕУ. Він використовується коли судно входє

у води ЕСА. На рушій на цьому режимі працюють два головних двигуна з навантаженням по 70% кожний. Паливні елементи та батареї передають енергію валопроводу через електродвигун, компенсуючи нестачу енергії на валу. Інакше кажучи в цьому випадку застосовується режим power take-in. Три дизель-генератори працюють для забезпечення потреб судна та СЕУ.

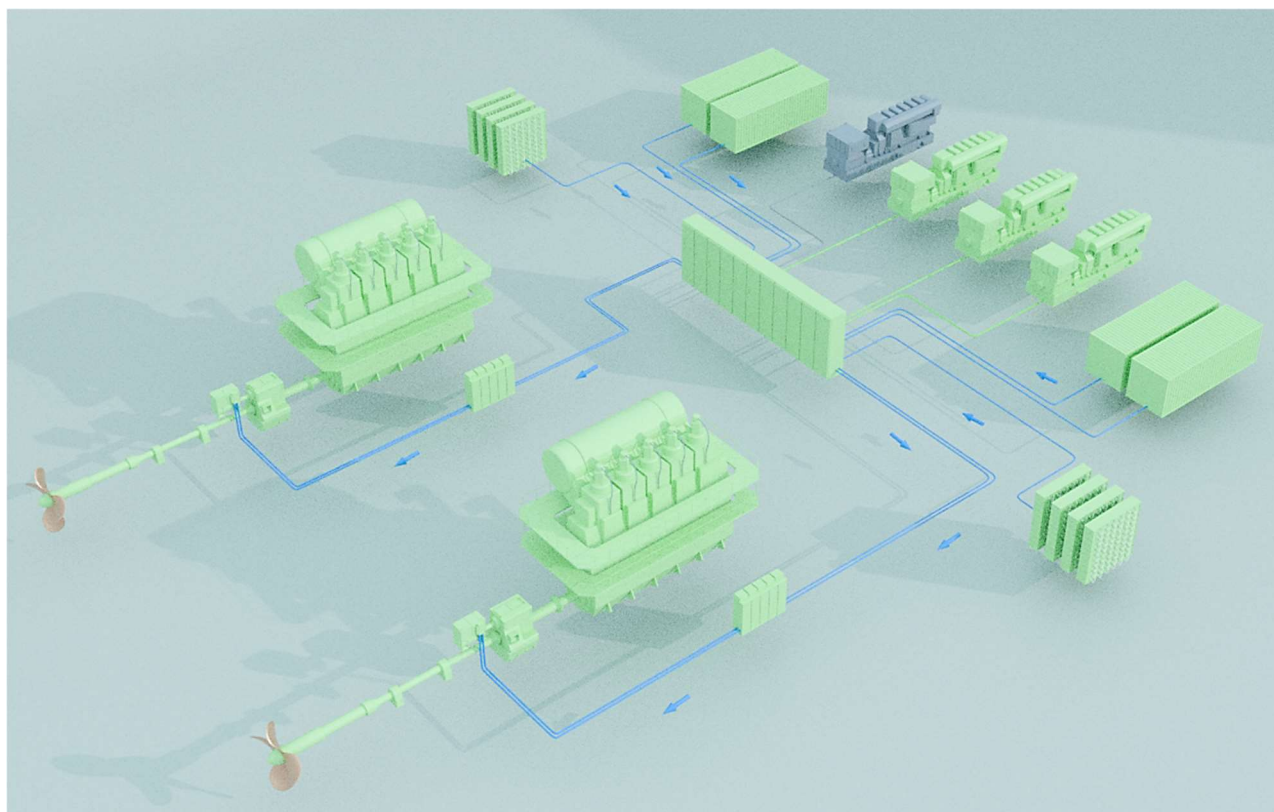


Рис. 3.27. 3D візуалізація роботи елементів пропульсивної установки судна на ходовому режимі з вантажем в зоні ЕСА

Теплову енергію для суднових потреб генерують комбінований котел, утилізуючи теплову енергію відхідних газів головних двигунів та спалюючи паливо, та утилізаційний котел, що виробляє насичену пару, використовуючи теплоту відхідних газів ДГ. Також на цьому режимі працює опріснювальна установка, створюючи дистилат за рахунок теплової енергії води, що виходить з охолоджувального контуру ГД.

Ходовий режим з вантажем поза зоною ЕСА з підзарядкою від ДГ застосовується, коли для заряджання акумуляторних батарей в роботу пускають резервний четвертий ДГ. «На гвинт» в цьому випадку працюють два ГД з навантаженням у 80%. Паливні елементи SOFC передають свою

потужність на електродвигун використовуючи систему power take-in. Три інші дизель-генератори працюють для забезпечення потреб судна та СЕУ. Теплову енергію для суднових потреб генерують комбінований котел, утилізуючи теплову енергію відхідних газів головних двигунів та спалюючи паливо, та утилізаційний котел, що виробляє насичену пару, використовуючи теплоту відхідних газів ДГ. Також на цьому режимі працює опріснювальна установка, створюючи дистилат за рахунок теплової енергії води, що виходє з охолоджувального контуру ГД.

Ходовий режим з вантажем поза зоною ЕСА з підзарядкою від ГД застосовується у випадку, коли всі дизель-генератори та паливні елементи задіяні для забезпечення електроенергії для суднових потреб і єдиним вільним джерелом електричної енергії є ГД. В такому випадку для заряджання акумуляторів навантаження ГД підвищують на 5-10%. Застосовуючи систему power take-out, валогенератор відбирає енергію з валопроводу і передає її до батарей через систему електричної мережі. Два головних двигуна працюють при навантаженні 85% для забезпечення відповідної швидкості судна. Для забезпечення потреб судна та СЕУ у електроенергії як зазначалось раніше працюють всі чотири дизель-генератори та паливні елементи SOFC. Теплову енергію для суднових потреб генерує комбінований котел, утилізуючи теплову енергію відхідних газів головних двигунів. Теплову енергію для суднових потреб генерують комбінований котел, утилізуючи теплову енергію відхідних газів головних двигунів та спалюючи паливо, та утилізаційний котел, що виробляє насичену пару, використовуючи теплоту відхідних газів ДГ. Також на цьому режимі працює опріснювальна установка, створюючи дистилат за рахунок теплової енергії води, що виходє з охолоджувального контуру ГД.

Стоянковий режим з вантажними операціями (рис. 3.28) – це третій основний режим роботи СЕУ, в якому вантажні операції можуть виконуватися як портовими так і судновими пристроями. Для цього передбачено введення в роботу одразу двох дизель-генераторів та паливних елементів. На цьому

					КР.135.6211м	Аркуш
						78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

режимі теплову енергію як і в попередньому забезпечується комбінованим та утилізаційним котлами, що працює на теплоті згоряння палива.

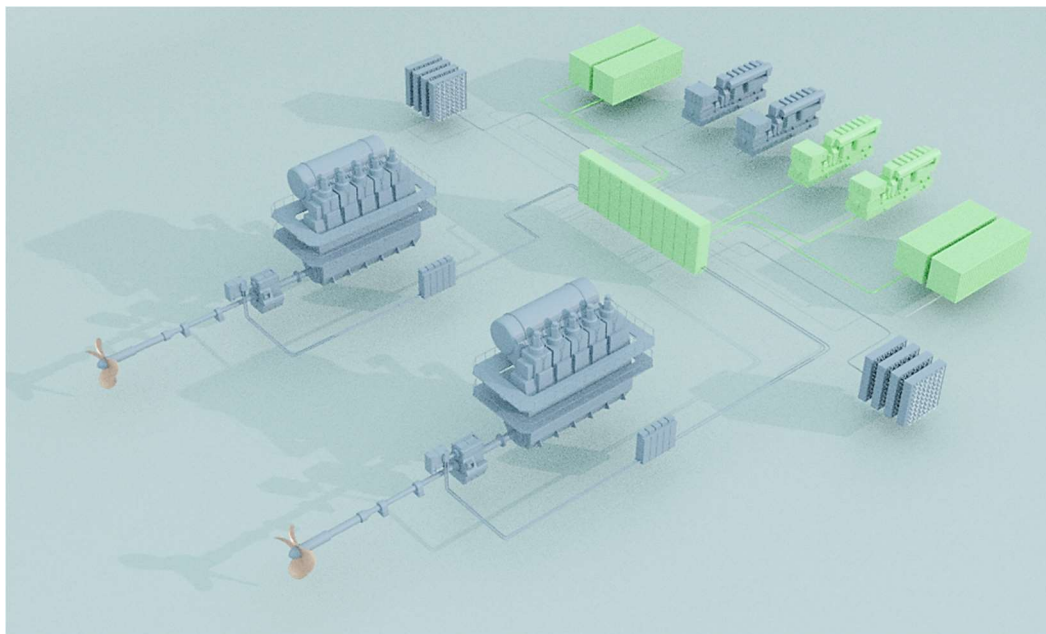


Рис. 3.28. 3D візуалізація роботи елементів пропульсивної установки судна на ходовому режимі з вантажем поза зоною ЕСА

Стоянковий режим без вантажних операцій – це останній додатковий режим роботи СЕУ. На ньому вантажні операції не виконуються. Через це для забезпечення потреб суднових споживачів вводиться в роботу лише один дизель-генератор та паливні елементи. В цьому режимі теплову енергію як і в попередньому забезпечується комбінованим котлом, що працює на теплоті згоряння палива.

Аварійний режим роботи судна – це окремий випадок, в якому працює тільки аварійний дизель-генератор, що розташовано в окремому приміщенні вище ватерлінії з окремим розподільчим щитом. Електроенергія виділяється тільки на життєвонеобхідних споживачів: системи навігації судна, аварійного освітлення та вентиляції, водовідливну та протипожежну системи тощо.

3.3. Комплектуюче обладнання СЕУ

Головними двигунами судна є два **5X72DF-2.2-iCER** фірми WinGD. Це двопаливний малообертовий двотактний дизельний двигун. Марка двигуна: [28]

					КР.135.6211м	Аркуш
						79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 5 – кількість циліндрів у двигуні;
- X – серія двигуна (X-серія відома своєю високою потужністю і економічністю, зазвичай використовується на судах);
- 72 – діаметр циліндра в сантиметрах (72 см);
- DF – подвійне паливо (Dual Fuel), що означає здатність двигуна працювати як на зрідженому природному газі (ЗПГ), так і на традиційному важкому паливі;
- 2.2 – покоління та версія модифікації двигунів;
- iCER – інтелектуальна система управління скиданням (Intelligent Control by Exhaust Recycling). Ця система забезпечує рециркуляцію вихлопних газів для зменшення викидів та підвищення ефективності згоряння.

Для зазначеного двигуна доступна опція встановлення системи iCER, що зменшує кількість метану, що не був спалений в двигуні.

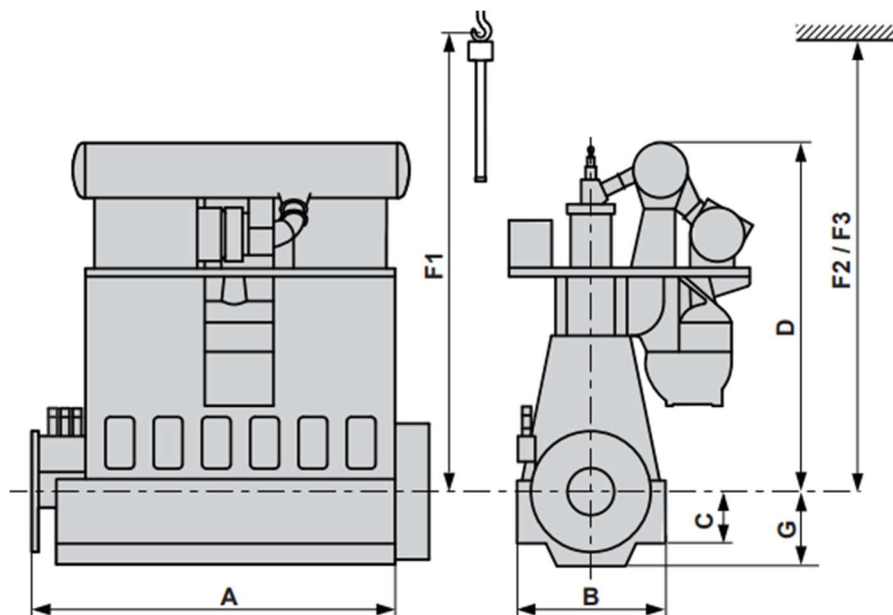


Рис. 3.29. Лінійні розміри двигуна 5X72DF-2.2-iCER

Лінійні розміри двигуна 5X72DF-2.2-iCER фірми WinGD представлені на рис. 3.29 та табл. 3.7. Крім цього в табл. 3.8 позначені компоновка та основні показники зазначеного двигуна. [28]

Табл. 3.7. Масогабаритні характеристики двигуна 5X72DF-2.2-iCER: [28]

<i>Габаритні показники</i>	
<i>B</i>	4 780 мм
<i>C</i>	1 750 мм
<i>D</i>	10 790 мм
<i>G</i>	2 455 мм
<i>F₁</i>	13 655 мм
<i>F₂</i>	13 655 мм
<i>F₃</i>	12 730 мм
<i>Вагові показники</i>	
<i>Вага головного двигуна</i>	570 тонн
<i>Вага охолоджувальної води та масла в двигуні</i>	6,5 тонн

Табл. 3.8. Комплектація та загальна характеристика двигуна: [28]

<i>Характеристика</i>	<i>Значення</i>
<i>Фірма, марка</i>	<i>WinGD 5X72DF-2.2-iCER</i>
<i>Тип</i>	<i>Дизельний, двотактний, двопаливний двигун</i>
<i>Кількість двигунів</i>	<i>2</i>
<i>Ефективна потужність</i>	<i>11 975 кВт</i>
<i>Питома витрата рідкого палива</i>	<i>159 г/(кВт·год)</i>
<i>Питома витрата газоподібного палива</i>	<i>132,4 г/(кВт·год)</i>
<i>Питома витрата пілотного палива</i>	<i>0,9 г/(кВт·год)</i>
<i>Витрата відхідних газів</i>	<i>24,9 кг/с</i>
<i>Температура відхідних газів</i>	<i>231 °C</i>
<i>Частота обертання валопроводу</i>	<i>68 об/хв</i>
<i>Діаметр циліндру</i>	<i>720 мм</i>
<i>Хід поршня</i>	<i>3086 мм</i>
<i>Обробка відхідних газів</i>	<i>HP SCR</i>
<i>Відповідність викидів NO_x</i>	<i>IMO Tier II, Tier III</i>
<i>Тип гвинта</i>	<i>Фіксований крок</i>
<i>Тип та кількість турбокомпресорів</i>	<i>1 x A275-L</i>
<i>Тип та кількість охолоджувачів наддувочного повітря</i>	<i>1 x SAC-C77-SDi</i>

Wärtsilä L34DF – це чотиритактний, середньооборотний рядний двигун з подвійним паливом (Dual Fuel), призначений для роботи на зрідженому природному газі або рідкому паливі. Двигун відповідає вимогам IMO Tier III при роботі на ЗПГ і IMO Tier II при роботі на дизельному паливі. [30]

Табл. 3.9. Технічні характеристики: [30]

Параметр	Значення
Ефективна потужність, кВт	3000
Електрична потужність генератора, кВт	2880
Частота обертання колінчастого валу, хв^{-1}	720
Питома ефективна витрата палива, $\text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$	0,187
Питома ефективна витрата палива на газовому режимі, $\text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$	0,145
Кількість циліндрів	6
Тип палива	HFO, MDO, LSMGO, LNG
Хід поршня, м	0,4
Діаметр циліндру, м	0,34
Швидкість поршня, м/с	10
Вага двигуна, т	35

До складу суднової електростанції входить чотири допоміжних дизельних двигуна Wärtsilä L34DF та чотири генератора електричного струму фірми Hyundai.

На рис. 3.30 показані габаритні характеристики двигуна Wärtsilä 6L34DF.

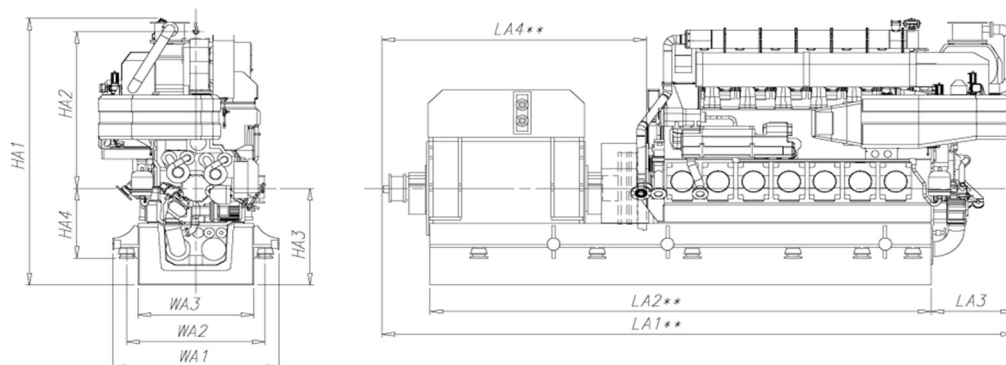


Рис. 3.30. Габаритні розміри двигуна Wärtsilä 6L34DF:

A = 5325 мм; B = 2550 мм; C = 2380 мм; D = 2345 мм; F = 1155 мм.

Табл. 3.10. Масогабаритні параметри двигуна 6L34DF: [30]

Позначення	Значення
LA1	8765 мм
LA2	6900 мм
LA3	1215 мм
LA4	3160 мм
WA1	2290 мм
WA2	1910 мм
WA3	1600 мм
HA1	4000 мм
HA2	2345 мм
HA3	1450 мм
HA4	1055 мм
Маса	60 тонн

В якості валогенератор/електродвигуна використовується обладнання фірми ABB (рис. 3.31) .

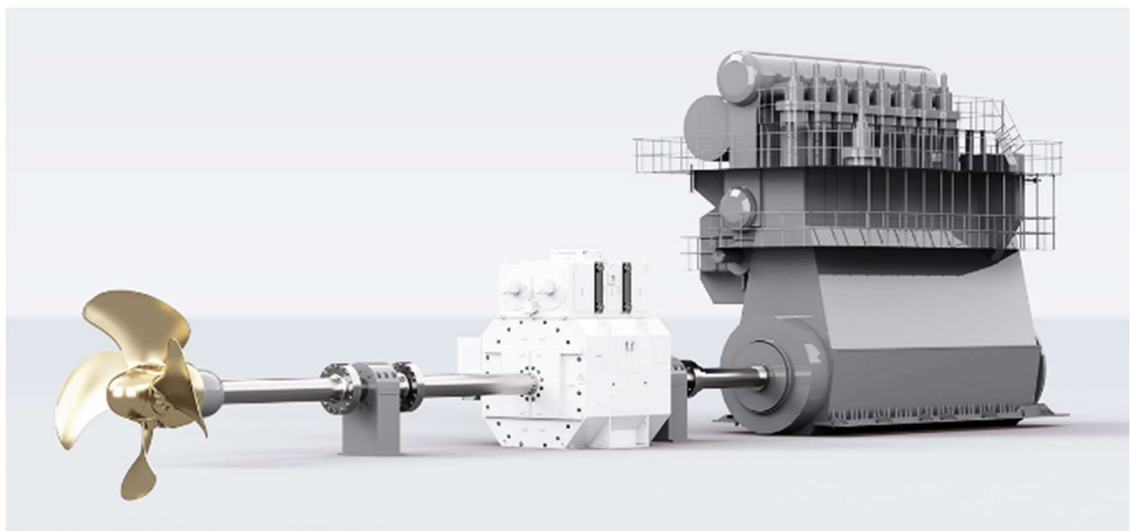


Рис. 3.31. Загальний вигляд пропульсивної установки з вмонтованим валогенератором/електродвигуном фірми ABB [31]

Ефективність систем РТО та РТІ від ABB у вигляді електродвигунів та валогенераторів, за відомостями виробника становить від 95 до 98%. Така висока ефективність досягається завдяки використанню технології постійних магнітів і частотних перетворювачів – Variable Frequency Drive (VFD), що забезпечує оптимальне використання енергії як на високих, так і на низьких навантаженнях. Інтеграція VFD дозволяє обладнанню адаптуватися до змін швидкості двигуна без значних втрат ефективності при різних режимах роботи

пропульсивної установки. технічних та експлуатаційних параметрів для Variable Speed Shaft Generator (VSG) з функціями PTO/PTI від компанії ABB представлені в табл. 3.11. [31, 32]

Табл. 3.11. технічні та експлуатаційних параметрів для Variable Speed Shaft Generator (VSG) з функціями PTO/PTI від компанії ABB [32]

Параметр	Характеристика
Режими роботи	PTO (Power Take-Off): генерація електроенергії з головного двигуна; PTI (Power Take-In): використання генератора як електродвигуна для приводу валу.
Тип генератора	Синхронний або асинхронний
Діапазон потужності	Від 500 кВт до 5 МВт.
Частота обертання ротору	30–100% від номінальної частоти головного двигуна (залежить від змінного швидкісного діапазону).
Перетворювач енергії	Використовується перетворювач ABB ACS6000 для керування змінною частотою генератора та стабілізації напруги.
Ефективність	о 97% у PTO-режимі та 95–96% у PTI-режимі.

До складу допоміжної котельної установки входить два комбінованих парових котла Alfa Laval Aalborg OC-TCi, загальний вигляд якого показаний на рис. 3.34. Вони розташовуються на відхідному газоході кожного з двох головних двигунів.



Рис. 3.32. Загальний вигляд комбінованого котла Alfa Laval Aalborg OC-TCi [33]

Aalborg OC-Tci – це комбінований паровий вертикальний водотрубний котел з боковим розташуванням топкового пристрою. Як джерело теплової

енергії для генерації палива може використовувати відхідні гази ГД, дизельне паливо, низькосірчастий мазут та природний газ. [33]

Aalborg ОС-ТСі в основному використовується для виробництва пари для наступних застосувань:

- системи вентиляції;
- споживачі машинного відділення.

На суднах, які використовують природний газ як паливо, Aalborg ОС-ТСі може підтримувати керування випарним газом. Він може використовувати його як паливо, що не може споживатися допоміжним двигуном.

Табл. 3.12. Технічні параметри котла Alfa Laval Aalborg ОС-Тсі [33]

<i>Параметр</i>	<i>Значення</i>
<i>Паропроодуктивність (на паливному режимі), кг/год</i>	<i>1200...8000</i>
<i>Паропроодуктивність (на утилізаційному режимі), кг/год</i>	<i>300...5000</i>
<i>Тиск насиченої пари, бар</i>	<i>6</i>
<i>Маса, кг</i>	<i>9000...110000</i>
<i>Діаметр котла, м</i>	<i>1800...4650</i>
<i>Висота котла, м</i>	<i>4500...9000</i>
<i>Товщина ізоляції, мм</i>	<i>75</i>
<i>Максимальна температура відхідних газів двигуна на вході, °C</i>	<i>450</i>
<i>Мінімальна температура відхідних газів двигуна на виході, °C</i>	<i>180</i>
<i>Максимальний робочий тиск, бар</i>	<i>10</i>

Водотрубний вертикально-циліндричний утилізаційний котел з примусовою циркуляцією фірми Alfa Laval Aalborg-ХС (рис.3.33) призначений для генерації насиченої пари для суднових потреб використовуючи відхідні гази дизель-генераторів СЕС. Аббревіатура назви: Х – exhaust gas (відпрацьовані гази), С – coil tube boiler (змійовиковий котел). [34]

Котли такого типу можуть поставлятися разом зінтегрованим в конструкцію шумоглушником

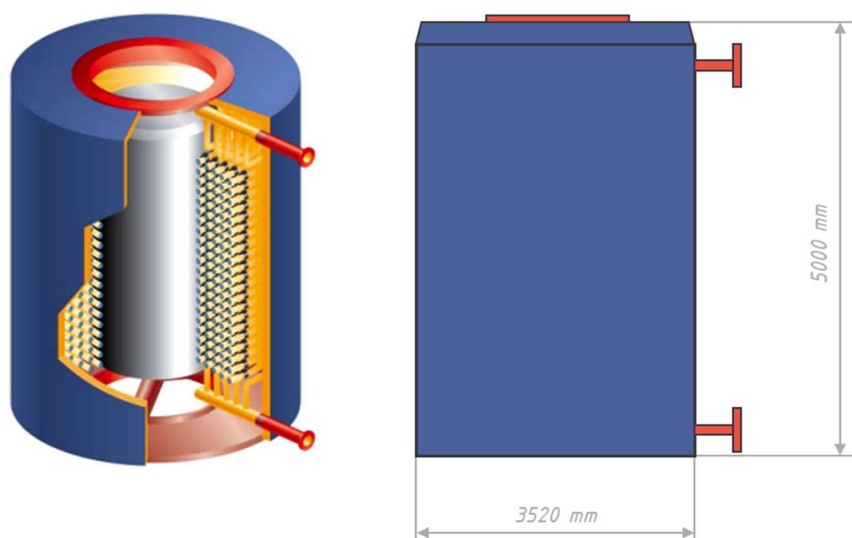


Рис. 3.33. загальний вигляд утилізаційного котла Alfa Laval Aalborg-XC

Табл. 3.13. Технічні параметри котла Alfa Laval Aalborg-XC [34]

<i>Параметр</i>	<i>Значення</i>
<i>Паропроодуктивність, кг/год</i>	<i>700...7000</i>
<i>Тиск насиченої пари, МПа</i>	<i>1,8</i>
<i>Маса, кг</i>	<i>5000...7500</i>
<i>Діаметр котла, м</i>	<i>1350...3520</i>
<i>Висота котла, м</i>	<i>3600...5000</i>
<i>Товщина ізоляції, мм</i>	<i>75</i>
<i>Мінімальна температура відхідних газів двигуна на виході, °C</i>	<i>175</i>
<i>Максимальний робочий тиск, VGF</i>	<i>2,4</i>

До складу СЕУ приймається вакуумна опріснювальна установка, що використовує теплоту охолоджувальної води головного двигуна для генерації прісної води. Обрана установка – DPU-36-C125 фірми Alfa Laval Aalborg, загальний вигляд якої зображено на рис. 3.36. [34]



Рис. 3.36. Загальний вигляд опріснювальної установки DPU-36-C125 [34]

Серія DPU-36-C охоплює діапазон продуктивності від 10 до 55 м³/добу залежно від температури теплоносія та охолоджувальної води.

Табл. 3.14. Технічні характеристики: [34]

<i>Параметр</i>	<i>Значення</i>
<i>Продуктивність, м³/добу</i>	<i>20</i>
<i>Температура живильної води, °C</i>	<i>70</i>
<i>Температура забортної води, °C</i>	<i>22</i>
<i>Габаритні розміри, мм:</i>	
<i>L</i>	<i>1470</i>
<i>H</i>	<i>2685</i>
<i>D</i>	<i>1730</i>

Генератор прісної води може експлуатуватися в діапазоні температури води, що охолоджує двигун від 55°C до 90°C. При цьому продуктивність установки можна змінити, шляхом зменшення або збільшення кількості пластин у внутрішньому пластинчастому теплообміннику.

Відповідно до Додатку VI Конвенції МАРПОЛ 1973/78 ІМО щодо запобігання забрудненню повітря з суден, необхідно суворо дотримуватися вказівок щодо зберігання відходів і видалення відходів у морі.

					КР.135.6211м	Аркуш
						87
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Спалювання різноманітних матеріалів, таких як камбузні відходи, залишки їжі, житлові відходи, білизна, картон, масляні шлами з мастила, мазуту, льяльних і очисних установок, осади стічних вод тощо є одним із найефективніших способів утилізації та зберігання відходів на судах. Крім того, залишки, що залишилися після спалювання, можна легко утилізувати, оскільки вони в основному складаються з золи.

На судні BW Tulip для спалювання твердих відходів встановлено інсинераторну піч фірми Kangrim моделі KFB-110S. Температура димових газів не повинна бути нижчою за 850 °C, при цьому температура 600 °C повинна досягатися протягом 5 хвилин для періодичної подачі. [36]



Рис. 3.37. Габаритні розміри інсинератору Kangrim моделі KFB-110S

Табл. 3.15. Габаритні розміри інсинераторної печі Kangrim моделі KFB-110S [36]

Параметр	Значення
Габаритні розміри, м	
<i>W</i>	2405
<i>H</i>	2250
<i>L</i>	2085
Потужність, кВт	1279,3
Вага, т	6

Для більш демонстраційної оцінки цього значення можна розрахувати значення BOR і порівняти з отриманим значенням споживання палива SOFC. BOR (boil-off rate) – це кількість LNG, що випарувався в

вантажному танку за одиницю часу. Він прямо залежить від кількості теплоти, що була прийнята природним газом під час транспортування вантажними насосами, проходження трубопроводами вантажними та циркуляційними та зберігання в танках.

3.4. Розрахунок теплових потоків в елементах СЕУ

Головні двигуни:

Теплові потоки було розраховано у програмному забезпеченні Win GD – GTD. Результати розрахунку представлені на рис. 1 та табл. 1.

Табл. 3.16. Теплові втрати при роботі головних двигунів

SMCR, %	Теплові втрати з наддувочним повітрям, кВт	Теплові втрати з циліндровим маслом, кВт	Теплові втрати з циркуляційним маслом, кВт	Теплові втрати з випромінювання, кВт	Теплові втрати з охолоджувальною водою, кВт	Потужність двигуна, кВт	Теплові втрати з відхідними газами, кВт
	$Q_{\text{ПОВ}}^{\text{ГД}}$	$Q_{\text{М2}}^{\text{ГД}}$	$Q_{\text{М1}}^{\text{ГД}}$	$Q_{\text{випр.}}^{\text{ГД}}$	$Q_{\text{П.В.}}^{\text{ГД}}$	$N_e^{\text{ГД}}$	$Q_{\text{Г}}^{\text{ГД}}$
100	4910	1330	810	280	670	11975	5492
95	4590	1320	800	270	600	11376	5185
90	4275	1320	805	265	530	10778	4911
85	3955	1305	805	255	480	10179	4643
80	3625	1290	800	250	435	9580	4384
75	3300	1275	800	240	400	8981	4167
70	2995	1235	785	235	380	8383	3949
65	2685	1190	775	225	365	7784	3770
60	2380	1150	765	215	355	7185	3580

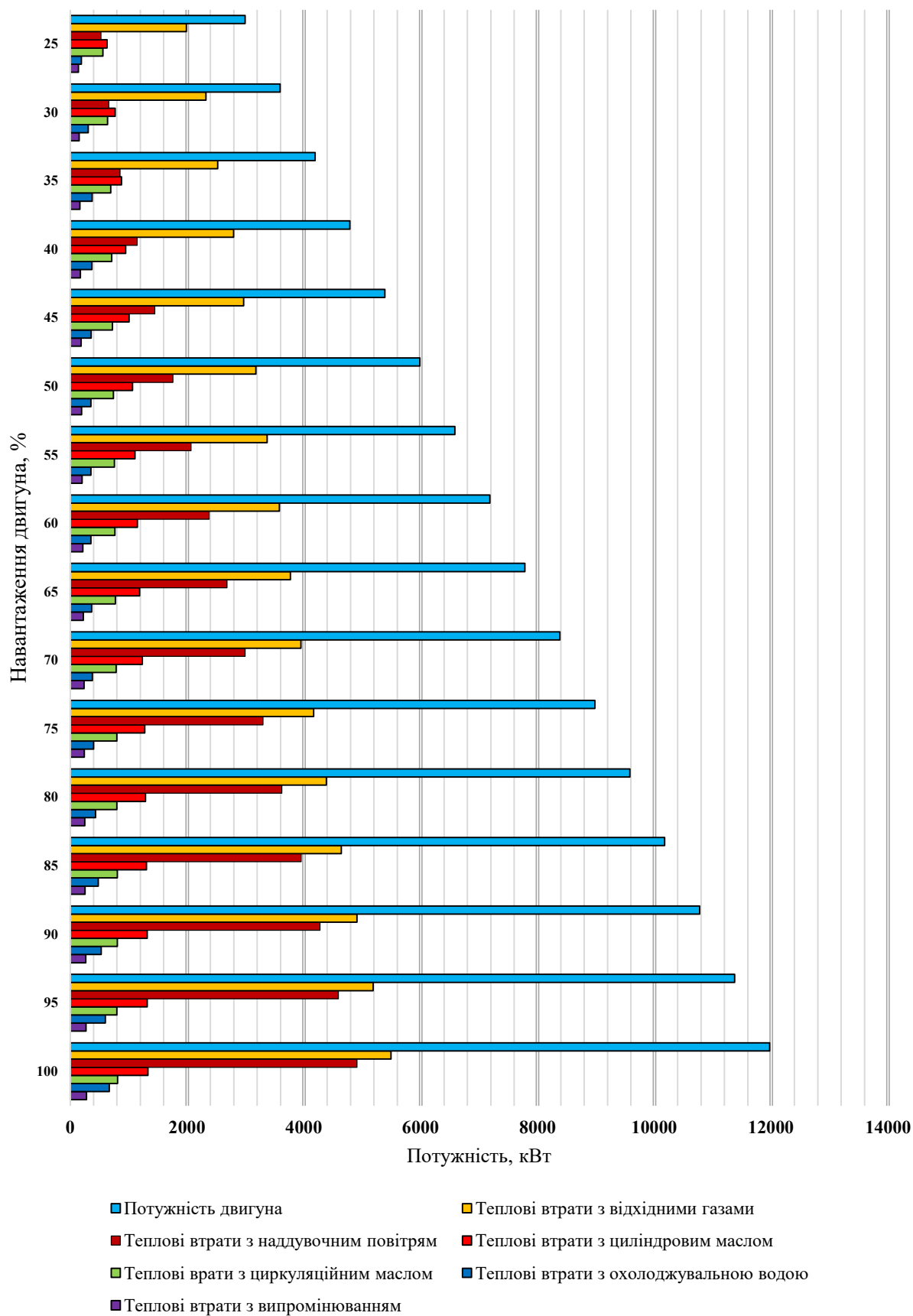


Рис. 3.44. Розподіл величин теплових втрат в двигуні та його потужності в залежності від його навантаження

Для подальшого розрахунку скориставшись розрахунковою схемою перетворення енергії в ГД можна розрахувати сумарну кількість теплоти підведеної до двигунів при навантаженнях 70% та 80%.

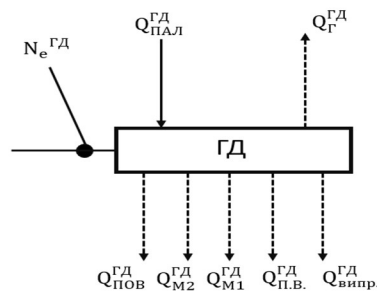


Рис. 3.45. Розрахункова схема перетворення енергії в ГД

При роботі двигуна на 70% SMCR:

Кількість теплоти, що відбирається від наддувочного повітря при його охолодженні: $Q_{\text{ПОВ}}^{\text{ГД}} = 2995 \text{ кВт}$

Кількість теплоти, що відводиться від двигуна з випускними газами:

$$Q_{\text{Г}}^{\text{ГД}} = 3949 \text{ кВт}$$

Кількість теплоти, що відводиться від двигуна охолоджуючою прісною водою: $Q_{\text{П.В.}}^{\text{ГД}} = 380 \text{ кВт}$

Кількість теплоти, що відводиться від двигуна циркуляційним мастилом: $Q_{\text{М1}}^{\text{ГД}} = 785 \text{ кВт}$

Кількість теплоти, що відводиться від двигуна циліндровим мастилом:

$$Q_{\text{М2}}^{\text{ГД}} = 1235 \text{ кВт}$$

Кількість залишкової теплоти, що відводиться від двигуна в навколишнє середовище [7]: $Q_{\text{випр}}^{\text{ГД}} = 235 \text{ кВт}$

Кількість теплоти, що виділяється при згорянні палива в циліндрах двигуна: $Q_{\text{ПАЛ}}^{\text{ГД}} = Q_{\text{випр}}^{\text{ГД}} + Q_{\text{М2}}^{\text{ГД}} + Q_{\text{М1}}^{\text{ГД}} + Q_{\text{П.В.}}^{\text{ГД}} + Q_{\text{Г}}^{\text{ГД}} + N_e^{\text{ГД}} + Q_{\text{ПОВ}}^{\text{ГД}} = 17962 \text{ кВт}$

При роботі двигуна на 80% SMCR:

Кількість теплоти, що відбирається від наддувочного повітря при його охолодженні: $Q_{\text{ПОВ}}^{\text{ГД}} = 3625 \text{ кВт}$

Кількість теплоти, що відводиться від двигуна з випускними газами:

					КР.135.6211м	Аркуш
						91
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Q_{\Gamma}^{\Gamma\Delta} = 4384 \text{ кВт}$$

Кількість теплоти, що відводиться від двигуна охолоджуючою прісною водою: $Q_{\text{п.в.}}^{\Gamma\Delta} = 435 \text{ кВт}$

Кількість теплоти, що відводиться від двигуна циркуляційним мастилом: $Q_{\text{М1}}^{\Gamma\Delta} = 800 \text{ кВт}$

Кількість теплоти, що відводиться від двигуна циліндровим мастилом:

$$Q_{\text{М2}}^{\Gamma\Delta} = 1290 \text{ кВт}$$

Кількість залишкової теплоти, що відводиться від двигуні в навколишнє середовище [7]: $Q_{\text{випр}}^{\Gamma\Delta} = 250 \text{ кВт}$

Кількість теплоти, що виділяється при згорянні палива в циліндрах двигуна: $Q_{\text{ПАЛ}}^{\Gamma\Delta} = Q_{\text{випр}}^{\Gamma\Delta} + Q_{\text{М2}}^{\Gamma\Delta} + Q_{\text{М1}}^{\Gamma\Delta} + Q_{\text{п.в.}}^{\Gamma\Delta} + Q_{\Gamma}^{\Gamma\Delta} + N_e^{\Gamma\Delta} + Q_{\text{ПОВ}}^{\Gamma\Delta} = 20364 \text{ кВт}$

Дизель-генератори:

Користуючись даними наведеними в табл. 3.17 та розрахунковою схемою перетворення енергії в ДГ виконаємо розрахунок його теплових потоків.

Табл. 3.17. Основні характеристики дизель-генератора потужністю: [30]

Характеристика	Значення
Тип двигуна та фірмова марка	6L34DF
Кількість	4
Ефективна потужність $N_e^{\Delta\Gamma}$, кВт	3 000
Ефективна потужність $P_{eg}^{\Delta\Gamma}$, кВт	2880
Частота обертання $n_{\Delta\Gamma}$, хв ⁻¹	720
Питома ефективна витрата палива $g_e^{\Delta\Gamma}$, кг/(кВт·год)	0,187
Температура повітря на вході в дизель $T_{\text{ПОВ}}$, К	313
Температура газів після турбіни агрегату наддування T_{Γ} , К	593
Коефіцієнт надлишку повітря α	2
Показник адіабати процесів стиснення повітря в компресорі агрегату наддування k	1,4
Ступінь підвищення тиску в компресорі агрегату наддування π_k	5
Коефіцієнт корисної дії компресора агрегату наддування η_k	0,8

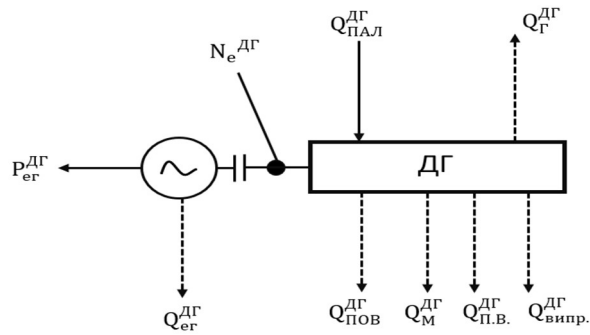


Рис. 3.46. Розрахункова схема перетворення енергії в ДГ

Витрата палива двигуном:

$$G_{\text{ПАЛ}}^{\text{ДГ}} = \frac{g_e^{\text{ДГ}} \cdot N_e^{\text{ДГ}}}{3600} = \frac{0,187 \cdot 3000}{3600} = 0,156 \text{ кг/с}$$

Кількість теплоти, що виділяється при згорянні палива в циліндрах двигуна:

$$Q_{\text{ПАЛ}}^{\text{ДГ}} = G_{\text{ПАЛ}}^{\text{ДГ}} \cdot Q_i^r = 0,156 \cdot 42700 = 6661,2 \text{ кВт}$$

Витрата повітря у двигуні:

$$G_{\text{ПОВ}}^{\text{ДГ}} = L_0 \cdot G_{\text{ПАЛ}}^{\text{ДГ}} = 14,3 \cdot 2 \cdot 0,156 = 4,43 \text{ кг/с}$$

Ізобарна теплоємність наддувочного повітря [25]:

$$\begin{aligned} c_p^{\text{ПОВ}} &= 0,95 + 0,00019 \cdot T_{\text{ПОВ}} = 0,95 + 0,00019 \cdot 313 = \\ &= 1,0094 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)} \end{aligned}$$

Витрата випускних газів:

$$G_{\Gamma}^{\text{ДГ}} = G_{\text{ПОВ}}^{\text{ДГ}} + G_{\text{ПАЛ}}^{\text{ДГ}} = G_{\text{ПАЛ}}^{\text{ДГ}} \cdot (1 + L_0 \cdot 2) = 0,233 \cdot (1 + 14,3 \cdot 2) = 4,61 \text{ кг/с}$$

Ізобарна теплоємність відпрацьованих газів:

$$c_p^{\Gamma} = 0,96 + 0,0003 \cdot T_{\Gamma} = 0,96 + 0,0003 \cdot 593 = 1,1379 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$$

Кількість теплоти, що відводиться від двигуна з випускними газами:

$$\begin{aligned} Q_{\Gamma}^{\text{ДГ}} &= G_{\Gamma}^{\text{ДГ}} \cdot c_p^{\Gamma} \cdot T_{\Gamma} - G_{\text{ПОВ}}^{\text{ДГ}} \cdot c_p^{\text{ПОВ}} \cdot T_{\text{ПОВ}} = \\ &= 4,61 \cdot 1,1379 \cdot 593 - 4,43 \cdot 1,0094 \cdot 313 = 1711,1 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Температура повітря після компресора наддування [25]:

$$T_K = T_{\text{ПОВ}} \cdot \left(1 + \frac{\pi_k^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_k} \right) = 313 \cdot \left(1 + \frac{5^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1}{0,8} \right) = 541,4 \text{ К}$$

Кількість теплоти, що відбирається від наддувочного повітря при його охолодженні від температури T_K до $T_{\text{пов}}$ [7]:

$$Q_{\text{пов}}^{\text{ДГ}} = G_{\text{пов}}^{\text{ДГ}} \cdot c_p^{\text{пов}} \cdot (T_K - T_{\text{пов}}) = 4,43 \cdot 1,0094 \cdot (541,4 - 313) = 1021,3 \text{ кВт}$$

Кількість теплоти, що відводиться від двигуна охолоджуючою прісною водою [25]:

$$Q_{\text{п.в.}}^{\text{ДГ}} = 0,085 \cdot Q_{\text{пал}}^{\text{ДГ}} = 0,085 \cdot 6661,2 = 566,2 \text{ кВт}$$

Кількість теплоти, що відводиться від двигуна мастилом [25]:

$$Q_{\text{м}}^{\text{ДГ}} = 0,04 \cdot Q_{\text{пал}}^{\text{ДГ}} = 0,04 \cdot 6661,2 = 266,4 \text{ кВт}$$

Кількість залишкової теплоти, що відводиться від двигуні в навколишнє середовище [25]:

$$Q_{\text{зал.}}^{\text{ДГ}} = 0,015 \cdot Q_{\text{пал}}^{\text{ДГ}} = 0,015 \cdot 6661,2 = 99,9 \text{ кВт}$$

Кількість теплоти, що витрачається у електрогенераторі:

$$Q_{\text{ег}}^{\text{ДГ}} = N_e^{\text{ДГ}} - P_e^{\text{ДГ}} = 3000 - 2880 = 120 \text{ кВт}$$

Коефіцієнт корисної дії електрогенератора:

$$\eta_{\text{ег}} = \left(\frac{P_e^{\text{ДГ}}}{N_e^{\text{ДГ}}} \right) \cdot 100\% = 96\%$$

Комбінований котел:

Користуючись даними наведеними в табл. 3.18 та розрахунковою схемою перетворення енергії в КК виконаємо розрахунок його теплових потоків.

Табл. 3.18. Основні характеристики допоміжного котла [25, 28, 33]:

Характеристика	Значення
Кількість КК $i_{\text{КК}}$	1
Тип КК та його фірма	Aalborg OC-TCi
Паропродуктивність ДК $D^{\text{КК}}$, кг/год;	5000
Тиск пари $P_s^{\text{КК}}$, МПа	0,6
Температура живильної води КК $T_{\text{Ж.В.}}^{\text{КК}}$, К	343
Температура газів на виході з КК $T_{\text{Г ВИХ}}^{\text{КК}}$, К	453
Температура повітря на вході в топку котла $T_{\text{пов}}$, К	313
Кількість теплоти, що міститься у відхідних газах ГД (SMCR 70%), кВт	3949
Коефіцієнт надлишку повітря в топці КК α	1,1
Витрата відпрацьованих газів $G_{\text{Г}}^{\text{ГД}}$, кг/с	
• SMCR 70%	21
• SMCR 80%	23
Ізобарна теплоємність відпрацьованих газів $c_p^{\text{Г}}$, кДж/(кг · К)	1,101
Температура відпрацьованих газів після агрегату наддування $T_{\text{Г}}$, °С	
• SMCR 70%	197
• SMCR 80%	204
Температура газів на виході з УК $T_{\text{Г ВИХ}}^{\text{УК}}$, К	453

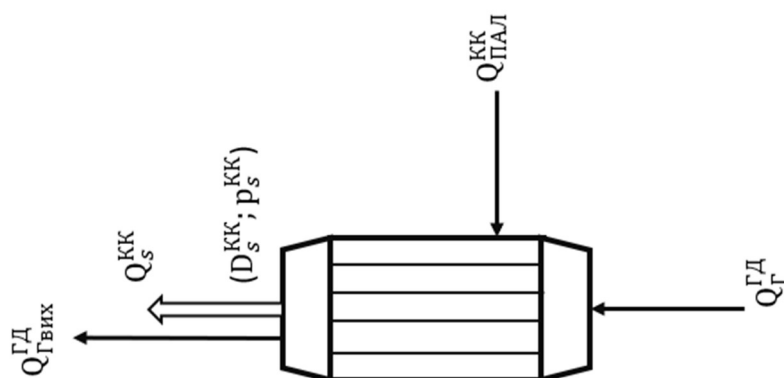


Рис. 3.47. Розрахункова схема перетворення енергії в КК

За тиском P_s^{KK} , визначається ентальпія насиченої пари h'' та її температура T_s^{KK} [37]:

$$h'' = 2\,763 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

За температурою живильної води $T_{ж.в.}^{KK}$, визначається її ентальпія h' [37]:

$$h' = 251,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

На утилізаційному режимі при SMCR ГД 70%:

Кількість теплоти Q_{Γ}^{KK} , що потенційно може бути передана від відпрацьованих газів головного двигуна живильній воді для утворення пари [25]:

$$Q_{\Gamma}^{KK} = Q_s^{KK \text{ ут}} = 2 \cdot G_{\Gamma}^{\Gamma Д} \cdot c_p^{\Gamma} \cdot (T_{\Gamma ВХ}^{KK} - T_{\Gamma ВИХ}^{KK}) = 2 \cdot 21 \cdot 1,101 \cdot (470 - 453) = 786 \text{ кВт}$$

Кількість пари, що може бути утворена теплою переданою від відпрацьованих газів живильній воді:

$$D^{KK \text{ ут}} = \frac{Q_s^{KK \text{ ут}} \cdot (h'' - h')}{3600} = \frac{786 \cdot (2\,763 - 251,1)}{3600} = 548,4 \text{ кг/год}$$

Така кількість пари занадто мала, тому використання комбінованого котла виключно на утилізаційному режимі не рекомендується.

Кількість теплоти, що витрачається на отримання залишку насиченої пари в КК:

$$Q_s^{KK} = \frac{(D^{KK} - D^{KK \text{ ут}}) \cdot (h'' - h')}{3600} = \frac{(5000 - 548,4) \cdot (2\,773,3 - 293,2)}{3600} = 3066,2 \text{ кВт}$$

Теплота, що виділяється при згорянні палива при $\eta_{KK} = 0,83$ [38]:

$$Q_{\text{ПАЛ}}^{KK} = \frac{Q_s^{KK}}{\eta_{KK}} = \frac{3066,2}{0,83} = 3694,8 \text{ кВт}$$

Витрата палива в КК, за умовою що котел споживає важке паливо з нижчою теплотою згорання $Q_i^{HFO} = 40600 \text{ кДж/кг}$:

					КР.135.6211м	Аркуш
						96
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$G_{\text{ПАЛ}}^{\text{КК}} = \frac{Q_{\text{ПАЛ}}^{\text{КК}}}{Q_i^{\text{HFO}}} = \frac{3694,8}{40600} = 0,091 \text{ кг/с}$$

На утилізаційному режимі при SMCR ГД 80%:

Кількість теплоти $Q_{\Gamma}^{\text{КК}}$, що потенційно може бути передана від відпрацьованих газів головного двигуна живильній воді для утворення пари [25]:

$$Q_{\Gamma}^{\text{КК}} = Q_s^{\text{КК ут}} = 2 \cdot G_{\Gamma}^{\text{ГД}} \cdot c_p^{\Gamma} \cdot (T_{\Gamma \text{ ВХ}}^{\text{КК}} - T_{\Gamma \text{ ВИХ}}^{\text{КК}}) = 2 \cdot 23 \cdot 1,101 \cdot (477 - 453) = 1215,5 \text{ кВт}$$

Кількість пари, що може бути утворена теплою переданою від відпрацьованих газів живильній воді:

$$D^{\text{КК ут}} = \frac{Q_s^{\text{КК ут}} \cdot (h'' - h')}{3600} = \frac{1215,5 \cdot (2763 - 251,1)}{3600} = 848,1 \text{ кг/год}$$

Така кількість пари занадто мала, тому використання комбінованого котла виключно на утилізаційному режимі не рекомендується.

Кількість теплоти, що витрачається на отримання залишку насиченої пари в КК:

$$Q_s^{\text{КК}} = \frac{(D^{\text{КК}} - D^{\text{КК ут}}) \cdot (h'' - h')}{3600} = \frac{(5000 - 848,1) \cdot (2773,3 - 293,2)}{3600} = 2860 \text{ кВт}$$

Теплота, що виділяється при згорянні палива при $\eta_{\text{КК}} = 0,83$ [38]:

$$Q_{\text{ПАЛ}}^{\text{КК}} = \frac{Q_s^{\text{КК}}}{\eta_{\text{КК}}} = \frac{2860}{0,83} = 3446 \text{ кВт}$$

Витрата палива в КК, за умовою що котел споживає важке паливо з нижчою теплотою згорання $Q_i^{\text{HFO}} = 40600 \text{ кДж/кг}$:

$$G_{\text{ПАЛ}}^{\text{КК}} = \frac{Q_{\text{ПАЛ}}^{\text{КК}}}{Q_i^{\text{HFO}}} = \frac{3446}{40600} = 0,084 \text{ кг/с}$$

На паливному режимі:

Кількість теплоти, що витрачається на отримання насиченої пари в КК:

$$Q_s^{\text{КК}} = \frac{(D^{\text{КК}} - D^{\text{КК ут}}) \cdot (h'' - h')}{3600} = \frac{5000 \cdot (2773,3 - 293,2)}{3600} = 3444,4 \text{ кВт}$$

Теплота, що виділяється при згорянні палива при $\eta_{\text{КК}} = 0,83$ [38]:

$$Q_{\text{ПАЛ}}^{\text{КК}} = \frac{Q_s^{\text{КК}}}{\eta_{\text{КК}}} = \frac{3444,4}{0,83} = 4149,9 \text{ кВт}$$

Витрата палива в КК, за умовою що котел споживає важке паливо з нижчою теплотою згорання $Q_i^{\text{HFO}} = 40600$ кДж/кг:

$$G_{\text{ПАЛ}}^{\text{КК}} = \frac{Q_{\text{ПАЛ}}^{\text{КК}}}{Q_i^{\text{HFO}}} = \frac{4149,9}{40600} = 0,102 \text{ кг/с}$$

Утилізаційний котел:

Користуючись даними наведеними в табл. 2 та розрахунковою схемою перетворення енергії в УК виконується розрахунок його теплових потоків.

Табл. 3.19. Основні характеристики утилізаційного котла [30, 34]:

Характеристика	Значення
Кількість ГД $i_{\text{ГД}}$	1
Кількість УК $i_{\text{УК}}$	1
Тип УК та його фірма	Aalborg ХС
Паропродуктивність УК $D^{\text{УК}}$, кг/год;	3000
Тиск пари $P_s^{\text{УК}}$, МПа	1,8
Витрата відпрацьованих газів $G_{\text{Г}}^{\text{ГД}}$, кг/с	4,61 x 4
Ізобарна теплоємність відпрацьованих газів $c_p^{\text{Г}}$, кДж/(кг · К)	1,1379
Температура відпрацьованих газів після агрегату наддування $T_{\text{Г}}$, К	593
Температура газів на виході з УК $T_{\text{Г ВИХ}}^{\text{УК}}$, К	413
Температура живильної води УК $T_{\text{Ж.В.}}^{\text{УК}}$, К	333

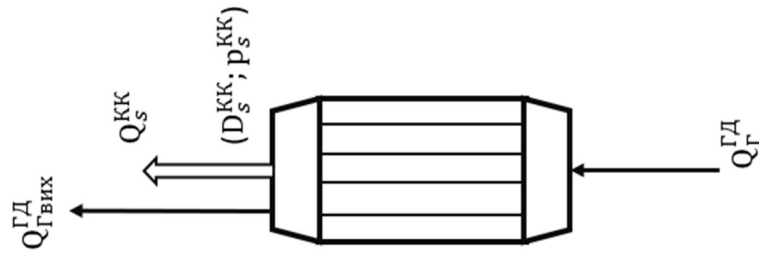


Рис. 3.48. Розрахункова схема перетворення енергії в УК

За тиском $P_s^{УК}$, визначається ентальпія насиченої пари h'' та її температура $T_s^{УК}$ [37]:

$$h'' = 2790 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

За температурою живильної води $T_{Ж.В.}^{УК}$, визначається її ентальпія h' [37]:

$$h' = 251,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

При роботі одночасно трьох ДГ:

Кількість теплоти $Q_{Г}^{УК}$, що потенційно може бути передана від відпрацьованих газів головного двигуна живильній воді для утворення пари [25]:

$$\begin{aligned} Q_{Г}^{УК} &= G_{Г}^{ГД} \cdot c_p^Г \cdot (T_{ГВХ}^{УК} - T_{ГВИХ}^{УК}) = 4,61 \cdot 3 \cdot 1,1169 \cdot (593 - 413) \\ &= 2780,1 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Кількість теплоти, переданої від відпрацьованих газів живильній воді для утворення пари:

$$Q_s^{УК} = \frac{D^{УК} \cdot (h'' - h')}{3600} = \frac{3000 \cdot (2790 - 251,1)}{3600} = 1756,4 \text{ кВт}$$

Кількість теплоти, що відводиться з УК відпрацьованими газами:

$$Q_{ГВИХ}^{УК} = Q_{Г}^{УК} - Q_s^{УК} = 2780,1 - 1756,4 = 1024,7 \text{ кВт}$$

Коефіцієнт використання теплоти в УК:

$$\eta_{УК} = \frac{Q_s^{УК}}{Q_{Г}^{УК}} = \frac{1756,4}{2780,1} = 0,63$$

					КР.135.6211м	Аркуш
						99
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При роботі одночасно двох ДГ:

Кількість теплоти $Q_{\Gamma}^{\text{УК}}$, що потенційно може бути передана від відпрацьованих газів головного двигуна живильній воді для утворення пари [25]:

$$Q_{\Gamma}^{\text{УК}} = G_{\Gamma}^{\text{ГД}} \cdot c_p^{\Gamma} \cdot (T_{\Gamma \text{ ВХ}}^{\text{УК}} - T_{\Gamma \text{ ВИХ}}^{\text{УК}}) = 4,61 \cdot 2 \cdot 1,1169 \cdot (593 - 413) = 1853,5 \text{ кВт}$$

Кількість теплоти, переданої від відпрацьованих газів живильній воді для утворення пари:

$$Q_s^{\text{УК}} = \frac{D^{\text{УК}} \cdot (h'' - h')}{3600} = \frac{2000 \cdot (2790 - 251,1)}{3600} = 1143,1 \text{ кВт}$$

Кількість теплоти, що відводиться з УК відпрацьованими газами:

$$Q_{\Gamma \text{ ВИХ}}^{\text{УК}} = Q_{\Gamma}^{\text{УК}} - Q_s^{\text{УК}} = 1853,5 - 1143,1 = 710,6 \text{ кВт}$$

Коефіцієнт використання теплоти в УК:

$$\eta_{\text{УК}} = \frac{Q_s^{\text{УК}}}{Q_{\Gamma}^{\text{УК}}} = \frac{1143,1}{1853,5} = 0,61$$

Опріснювальна установка:

Користуючись розрахунковою схемою перетворення енергії в ОУ виконується розрахунок його теплових потоків.

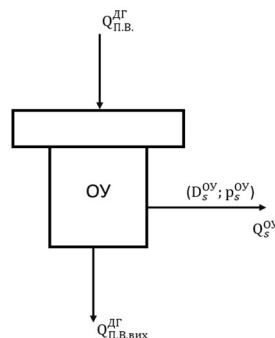


Рис. 3.49. Розрахункова схема перетворення енергії в ОУ

Визначення продуктивності ОУ відбувається за формулою:

$$D^{\text{ОУ}} = k_3 \cdot 2 \cdot (z \cdot d_{\text{н}} + D_{\text{т.н.}}),$$

					КР.135.6211м	Аркуш
						100
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $k_3 = 1,25 \dots 1,5$ – коефіцієнт запасу, $k_3 = 1,25$; d_n – нормована витрата прісної води на одного члена екіпажу за існуючими санітарними нормами $d_n = 180 \dots 280$ кг/(добу·чол), приймаємо $d_n = 280$; z – число членів екіпажу, $z = 16$; $D_{т.н.}$ – добова витрата води на технічні і технологічні потреби, які пов’язані з безперервною продувкою котла та втратами пари у паропроводах та споживачах. Вона визначається по формулі [39]:

$$D_{т.н.} = G_{ук} + G_{дк} = \frac{\alpha}{24} \cdot (\tau_{дк} \cdot D_{дк} + \tau_{ук} \cdot D_{ук})$$

де α – коефіцієнт, що враховує втрати конденсату в котлах, $\alpha = 0,1$; $\tau_{дк}, \tau_{ук}$ – час роботи котлів у добу, ч, $\tau_{дк} = 15$ та $\tau_{ук} = 15$; $D_{дк}$ та $D_{ук}$ – продуктивність котлів приймаємо з урахуванням їх роботи на ходовому та стоянковому режимах, $D_{дк} = 75 \frac{т}{добу}$ та $D_{ук} = 45 \frac{т}{добу}$.

$$D^{0у} = 1,25 \cdot 2 \cdot (16 \cdot 0,28 + 0,1 \cdot (15 \cdot 75 + 15 \cdot 45)) = 104,12 \text{ т/добу}$$

Приймаємо, що в опріснювальній установці забортна вода випаровується при 60°C , тоді визначення ентальпії киплячої забортної води та утвореної пари [38]:

$$h_{з.в.} = 251,15 \text{ кДж/кг}$$

$$h'' = 2608,84 \text{ кДж/кг}$$

Кількість теплоти, що необхідна для отримання пари:

$$Q_s^{0у} = \frac{D^{0у} \cdot 10^3 \cdot (h'' - h_{з.в.})}{24 \cdot 3600} = \frac{84,12 \cdot 10^3 \cdot (2608,84 - 251,15)}{24 \cdot 3600} = 708 \text{ кВт}$$

Коефіцієнт використання теплоти ВОУ:

$$\eta_{0у} = \frac{Q_s^{0у}}{2 \cdot Q_{п.в.}^{ГД}} \cdot 100\% = \frac{708}{380 \cdot 2} \cdot 100\% = 89,4\%$$

Акумуляторні батареї та паливні елементи:

Робота СЕУ в зонах ЕСА оцінюється в 3-4 доби. В цей проміжок акумулятори та паливні елементи повинні забезпечувати нестачі потужності у на валопроводі у 4200 кВт. Приймається, що акумулятори компенсують 1,2 МВт потужності та паливні елементи решту. Для

					КР.135.6211м	Аркуш
						101
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розрахунку перетворень енергії була накреслена розрахункова схема (рис. 3). Згідно з нею $N_{\Pi}^{PTI} = 4200$ кВт.

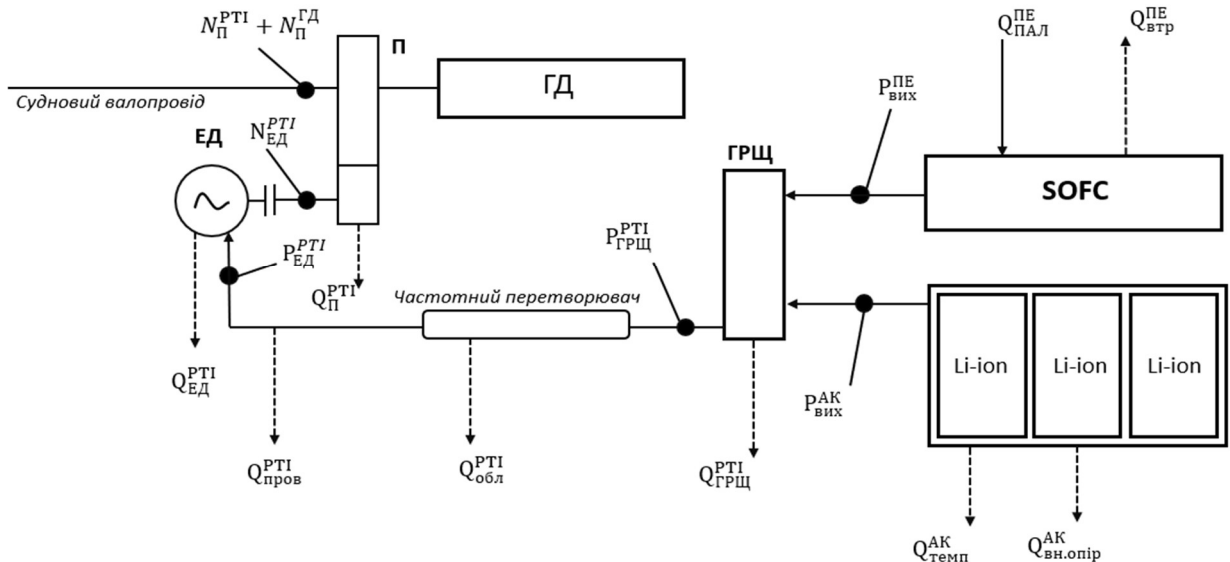


Рис. 3.50. Розрахункова схема перетворення енергії в акумуляторних батареях та паливних елементах

Для більш ґрунтового аналізу приймаються наступні коефіцієнти енергетичних втрат: [38]

$\eta_{\text{вн.опір}}$ – коефіцієнт енергетичних втрат у внутрішньому опорі акумулятора, приймається 0,98;

$\eta_{\text{темп}}$ – коефіцієнт енергетичних втрат при зміні температурного режиму роботи акумуляторів, приймається 0,96;

$\eta_{\text{втр}}$ – коефіцієнт загальних втрат перетворення енергії в паливних елементах, приймається 0,6;

$\eta_{\text{ГРЩ}}$ – коефіцієнт енергетичних втрат в головному розподільчому щиті, приймається 0,98;

$\eta_{\text{обл}}$ – коефіцієнт енергетичних втрат в частотному перетворювачі, приймається 0,98;

$\eta_{\text{пров}}$ – коефіцієнт енергетичних втрат в мережі електричних кабелів, приймається 0,99;

$\eta_{\text{ЕД}}$ – коефіцієнт енергетичних втрат в електродвигуні, приймається 0,96;
 $\eta_{\text{П}}$ – коефіцієнт енергетичних втрат в механічній передачі, приймається 0,98;
 $\eta_{\text{зап}}$ – коефіцієнт запасу, приймається 1,2.

Ефективна потужність електродвигуна:

$$N_{\text{ЕД}}^{\text{PTI}} = \frac{N_{\text{П}}^{\text{PTI}}}{\eta_{\text{П}}} = \frac{4200}{0,98} = 4285,7 \text{ кВт}$$

Електрична потужність перед електродвигуном:

$$P_{\text{ЕД}}^{\text{PTI}} = \frac{N_{\text{ЕД}}^{\text{PTI}}}{\eta_{\text{ЕД}}} = \frac{4285,7}{0,96} = 4464,3 \text{ кВт}$$

Електрична потужність після головного розподільного щита:

$$P_{\text{ГРЩ}}^{\text{PTI}} = \frac{P_{\text{ЕД}}^{\text{PTI}}}{\eta_{\text{пров}} \cdot \eta_{\text{обл}}} = \frac{4464,3}{0,99 \cdot 0,98} = 4601,7 \text{ кВт}$$

Електрична потужність, що підводиться до ГРЩ акумуляторами та паливними елементами:

$$P_{\text{ВИХ}}^{\text{ПЕ}} + P_{\text{ВИХ}}^{\text{АК}} = \frac{P_{\text{ГРЩ}}^{\text{PTI}}}{\eta_{\text{ГРЩ}}} = \frac{4601,7}{0,98} = 4695,3 \text{ кВт}$$

Приймаємо, що паливні елементи забезпечують $P_{\text{ВИХ}}^{\text{ПЕ}} = 3095,3 \text{ кВт}$ нестачі потужності на валопроводі.

За даними [19] ефективність паливних елементів лежить в межах 60%, тоді з урахуванням цього кількість енергії палива, що підводиться до паливного елемента:

$$Q_{\text{ПАЛ}}^{\text{ПЕ}} = \frac{P_{\text{ВИХ}}^{\text{ПЕ}}}{\eta_{\text{втр}}} = \frac{3095,3}{0,6} = 5158,8 \text{ кВт}$$

Початкова потужність акумуляторів:

$$P_{\text{ПОЧ}}^{\text{АК}} = \frac{P_{\text{ВИХ}}^{\text{АК}}}{\eta_{\text{темп}} \cdot \eta_{\text{вн.опір}}} = \frac{1600}{0,96 \cdot 0,98} = 1700,68 \text{ кВт}$$

					КР.135.6211м	Аркуш
						103
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Запас енергії, необхідної для ходового режиму в зоні ЕСА з вантажем при $t = 96$ год та врахування $\eta_{\text{зап}}$:

$$E^{\text{AK}} = P_{\text{поч}}^{\text{AK}} \cdot t \cdot \eta_{\text{зап}} = 1700,68 \cdot 96 \cdot 1,2 = 187\,682 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Об'єм, що займає розміщення акумуляторної системи при енергетичній щільності $i = 200 \text{ кВт} \cdot \text{год/л}$:

$$I = \frac{E}{i} = \frac{187\,682}{0,2 \cdot 1000} = 721,335 \text{ м}^3$$

Об'єм є значним, але цілком прийнятним для досягнення мети по зменшенню викидів в зонах ЕСА.

3.5. Визначення коефіцієнтів корисної дії та коефіцієнтів використання теплоти енергетичної установки

Ходовий режим з вантажем в зоні ЕСА:

Табл. 3.20. Робота елементів на ходовому режимі в зоні ЕСА

Елемент СЕУ	ОУ	УК	ЕД	SOFC	Li-ion	ГД	ВГ	ДГ	КК	АДГ
	+	+	+2	+	+	+2	-	+3	+	-

Буксирувальна потужність, що перетворюється на упор:

$$N_R = (N_{\text{П}}^{\text{PTI}} + N_{\text{е}}^{\text{ГД}} \cdot \eta_{\text{П}}) \cdot \eta_{\text{ВП}} \cdot \eta_{\text{Р}},$$

де $\eta_{\text{ВП}}$ – ККД валопроводу, $\eta_{\text{ВП}} = 0,99$; $\eta_{\text{Р}}$ – ККД пропульсивний, $\eta_{\text{ВП}} = 0,7$; $\eta_{\text{П}}$ – ККД механічної передачі, $\eta_{\text{П}} = 0,98$.

$$N_R = (4200 + 2 \cdot 8383 \cdot 0,98) \cdot 0,99 \cdot 0,7 = 15\,012,3 \text{ кВт}$$

Втрати енергії у валопроводі:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ВП}} &= (N_{\text{П}}^{\text{PTI}} + N_{\text{е}}^{\text{ГД}} \cdot \eta_{\text{П}}) \cdot (1 - \eta_{\text{ВП}}) = (4200 + 2 \cdot 8383 \cdot 0,98) \cdot (1 - 0,99) \\ &= 209,76 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Втрати енергії у рушії:

$$\begin{aligned} Q_{\text{Р}} &= (N_{\text{П}}^{\text{PTI}} + N_{\text{е}}^{\text{ГД}} \cdot \eta_{\text{П}} - Q_{\text{ВП}}) \cdot (1 - \eta_{\text{Р}}) \\ &= (4200 + 2 \cdot 8383 \cdot 0,98 - 209,76) \cdot (1 - 0,7) = 5\,752,3 \text{ кВт} \end{aligned}$$

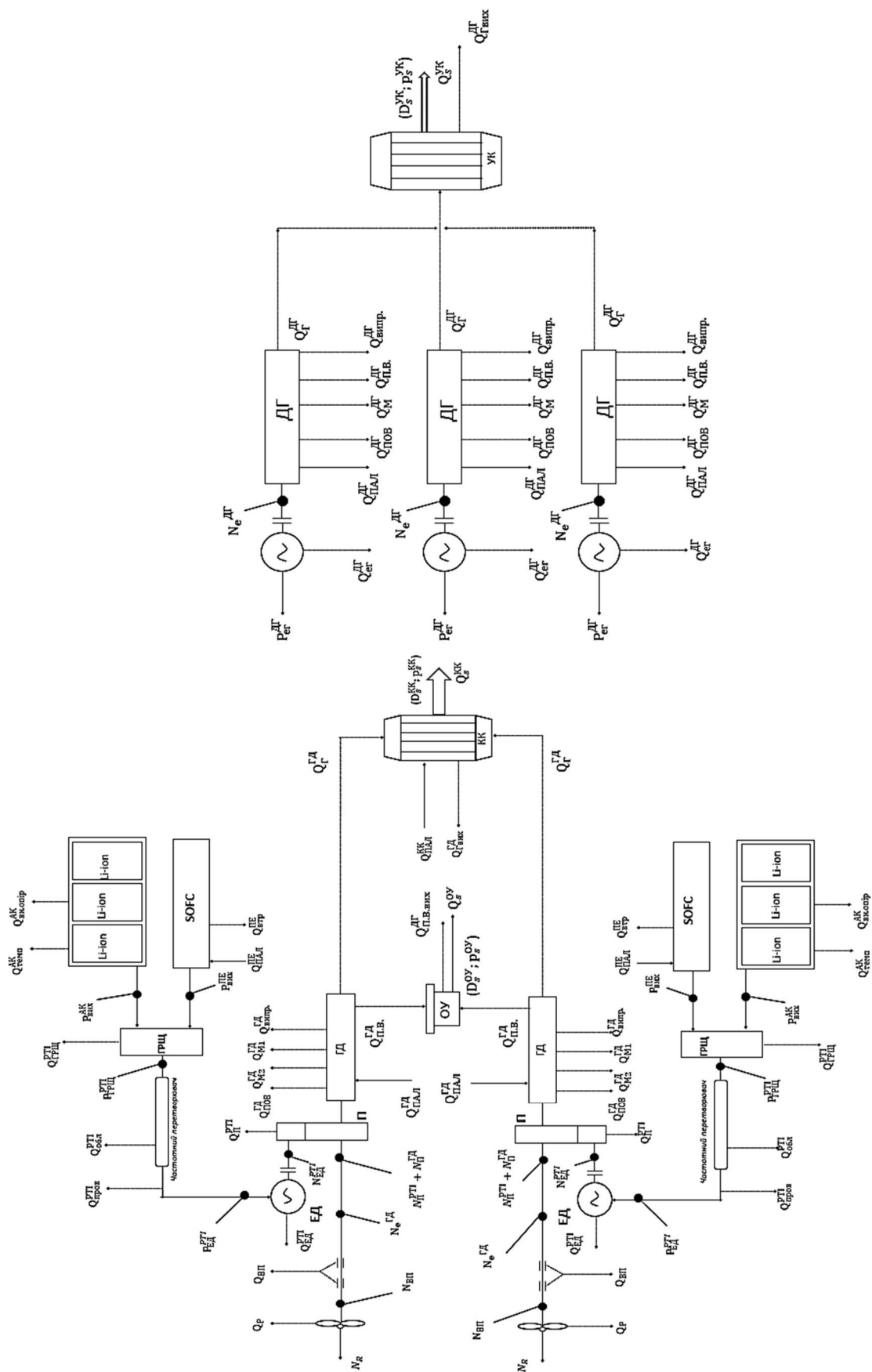


Рис. 3.51. Схема процесів перетворення енергії в елементах СЕУ на ходовому режимі з вантажем в зоні ЕСА

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КР.135.6211м

Аркуш

105

Коефіцієнт використання теплоти СЕУ на ходовому режимі з вантажем в зоні ЕСА:

$$\eta_{\text{BT x.p.ECA}}^{\text{CEY}} = \frac{N_R + 3 \cdot P_{\text{EG}}^{\text{ДГ}} + Q_s^{\text{КК}} + Q_s^{\text{КК ут}} + Q_s^{\text{ОУ}} + Q_s^{\text{УК}}}{2 \cdot Q_{\text{пал}}^{\text{ГД}} + 3 \cdot Q_{\text{пал}}^{\text{ДГ1}} + Q_{\text{пал}}^{\text{ПЕ}} + Q_{\text{пал}}^{\text{КК}}},$$

$$\eta_{\text{BT x.p.ECA}}^{\text{CEY}} = \frac{15012,3 + 3 \cdot 2880 + 3066,2 + 786 + 708 + 1756,4}{2 \cdot 17962 + 3 \cdot 6661,2 + 5158,8 + 3694,8} = 0,473$$

Коефіцієнт корисної дії СЕУ на стояночному режимі з рефрижерації:

$$\eta_{\text{e x.p.ECA}}^{\text{CEY}} = \frac{N_R + 3 \cdot P_{\text{EG}}^{\text{ДГ}}}{2 \cdot Q_{\text{пал}}^{\text{ГД}} + 3 \cdot Q_{\text{пал}}^{\text{ДГ1}} + Q_{\text{пал}}^{\text{ПЕ}} + Q_{\text{пал}}^{\text{КК}}},$$

$$\eta_{\text{BT x.p.ECA}}^{\text{CEY}} = \frac{15012,3 + 3 \cdot 2880}{2 \cdot 17962 + 3 \cdot 6661,2 + 5158,8 + 3694,8} = 0,365$$

Ходовий режим з вантажем поза зоною ЕСА:

Табл. 3.21. Робота елементів на ходовому режимі поза зоною ЕСА

Елемент СЕУ	ОУ	УК	ЕД	SOFC	Li-ion	ГД	ВГ	ДГ	КК	АДГ
	+	+	+2	+	-	+2	-	+3	+	-

Буксирувальна потужність, що перетворюється на упор:

$$N_R = (N_{\text{П}}^{\text{PTI}} + N_{\text{e}}^{\text{ГД}} \cdot \eta_{\text{П}}) \cdot \eta_{\text{ВП}} \cdot \eta_{\text{Р}},$$

де $\eta_{\text{ВП}}$ – ККД валопроводу, $\eta_{\text{ВП}} = 0,99$; $\eta_{\text{Р}}$ – ККД пропульсивний, $\eta_{\text{ВП}} = 0,7$;
 $\eta_{\text{П}}$ – ККД механічної передачі, $\eta_{\text{П}} = 0,98$; $N_{\text{П}}^{\text{PTI}}$ - на даному режимі визначається

$$N_{\text{П}}^{\text{PTI}} = P_{\text{ВИХ}}^{\text{ПЕ}} \cdot \eta_{\text{ГРЩ}} \cdot \eta_{\text{обл}} \cdot \eta_{\text{пров}} \cdot \eta_{\text{ЕД}} \cdot \eta_{\text{П}} = 2768,5$$

$$N_R = (2768,5 + 2 \cdot 9580 \cdot 0,98) \cdot 0,99 \cdot 0,7 = 14975,3 \text{ кВт}$$

Втрати енергії у валопроводі:

$$Q_{\text{ВП}} = (N_{\text{П}}^{\text{PTI}} + N_{\text{e}}^{\text{ГД}} \cdot \eta_{\text{П}}) \cdot (1 - \eta_{\text{ВП}}) = (2768,5 + 2 \cdot 9580 \cdot 0,98) \cdot (1 - 0,99) = 222,55 \text{ кВт}$$

Втрати енергії у рушії:

$$Q_{\text{Р}} = (N_{\text{П}}^{\text{PTI}} + N_{\text{e}}^{\text{ГД}} \cdot \eta_{\text{П}} - Q_{\text{ВП}}) \cdot (1 - \eta_{\text{Р}}) = (2768,5 + 2 \cdot 9580 \cdot 0,98 - 222,55) \cdot (1 - 0,7) = 6494,5 \text{ кВт}$$

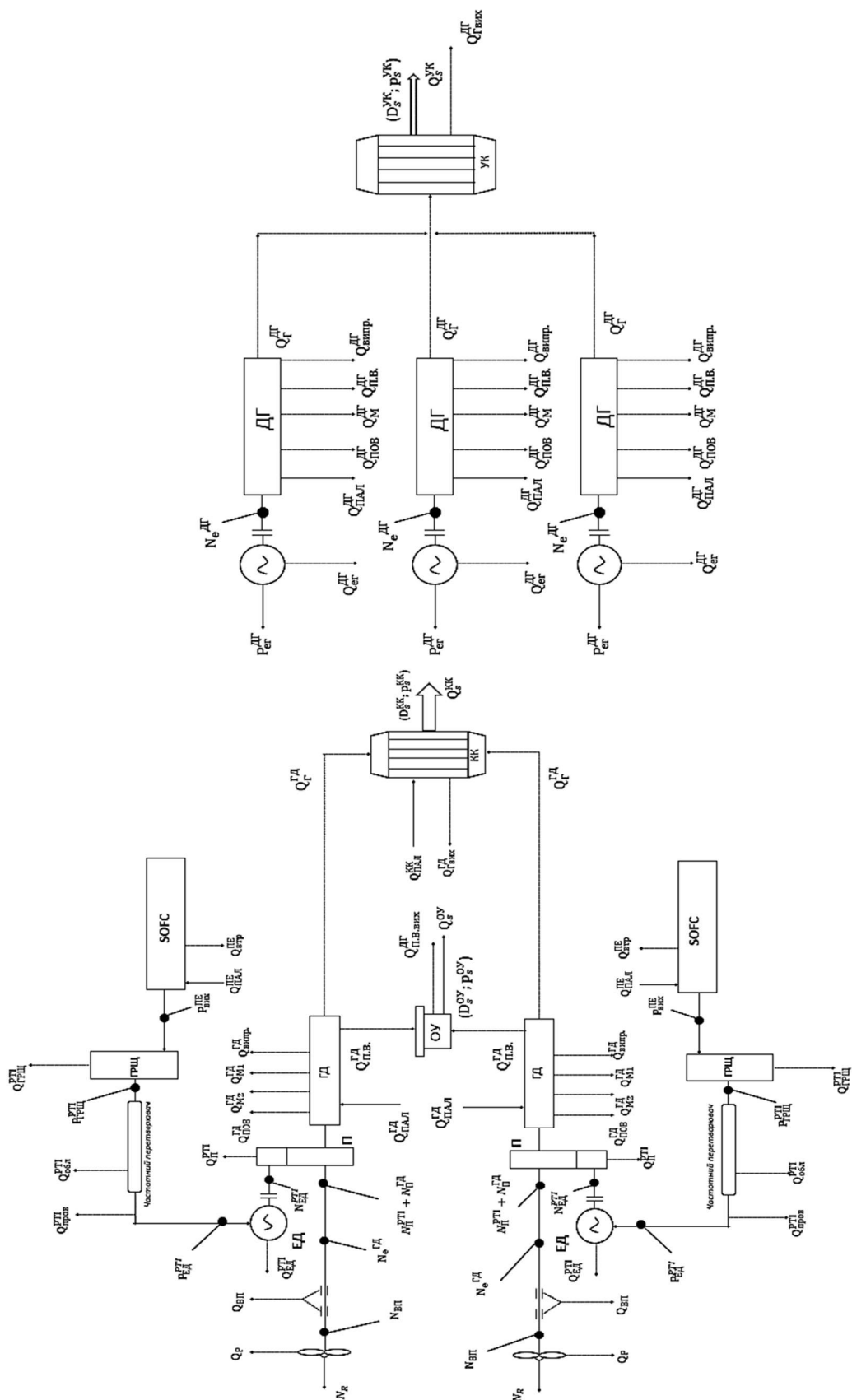


Рис. 3.52. Схема процесів перетворення енергії в елементах СЕУ на ходовому режимі з вантажем поза зоною ЕСА

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КР.135.6211М

Аркуш

107

Коефіцієнт використання теплоти СЕУ на ходовому режимі з вантажем поза зоною ЕСА:

$$\eta_{\text{BT x.p.}}^{\text{CEY}} = \frac{N_R + 3 \cdot P_{\text{EG}}^{\text{ДГ}} + Q_s^{\text{КК}} + Q_s^{\text{КК ут}} + Q_s^{\text{ОУ}} + Q_s^{\text{УК}}}{2 \cdot Q_{\text{пал}}^{\text{ГД}} + 3 \cdot Q_{\text{пал}}^{\text{ДГ}} + Q_{\text{пал}}^{\text{ПЕ}} + Q_{\text{пал}}^{\text{КК}}},$$

$$\eta_{\text{BT x.p.}}^{\text{CEY}} = \frac{14975,3 + 3 \cdot 2880 + 2860 + 1215 + 708 + 1756,4}{2 \cdot 20364 + 3 \cdot 6661,2 + 5158,8 + 3446} = 0,441$$

Коефіцієнт корисної дії СЕУ на ходовому режимі з вантажем поза зоною ЕСА:

$$\eta_{\text{е x.p.}}^{\text{CEY}} = \frac{N_R + 3 \cdot P_{\text{EG}}^{\text{ДГ}}}{2 \cdot Q_{\text{пал}}^{\text{ГД}} + 3 \cdot Q_{\text{пал}}^{\text{ДГ}} + Q_{\text{пал}}^{\text{ПЕ}} + Q_{\text{пал}}^{\text{КК}}},$$

$$\eta_{\text{BT x.p.}}^{\text{CEY}} = \frac{14975,3 + 3 \cdot 2880}{2 \cdot 20364 + 3 \cdot 6661,2 + 5158,8 + 3446} = 0,349$$

Стоянковий режим з вантажними операціями:

Табл. 3.22. Робота елементів на стояночному режимі з вантажними операціями

Елемент СЕУ	ОУ	УК	ЕД	SOFC	Li-ion	ГД	ВГ	ДГ	КК	АДГ
	-	+	-	+	-	-	-	+2	+	-

Розділ 4 Розрахунок показників індексу EEDI суднової установки газовозу з впровадженням гібридних технологій

4.1 Загальні поняття

Одним із ключових заходів з контролю та підвищення енергоефективності судноплавства є впровадження Індексу енергоефективності проекту EEDI (Energy Efficiency Design Index). Цей індекс розроблено Міжнародною морською організацією як стандарт для оцінювання екологічної ефективності нових суден. Він є обов'язковим для суден, побудованих після 2013 року, відповідно до положень MARPOL, додаток VI.

EEDI дозволяє кількісно оцінити викиди CO₂ на тонно-милю транспортної роботи судна. Він показує наскільки ефективно були використані енергоефективні технології, гібридні системи та альтернативні види палива щодо зменшення впливу на довкілля.

У цьому розділі буде розраховано EEDI для CEY газовозу за наступною формулою: [25]

$$EEDI = \frac{(\prod_{i=1}^M f_j) \cdot (\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)}) + (P_{AE(i)} \cdot C_{FAE(i)} \cdot SFC_{AE(i)})}{f_i \cdot f_w \cdot f_l \cdot f_c \cdot Capacity \cdot V_{ref}} + \frac{((\prod_{i=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{ne} f_{eff(j)} \cdot P_{AEff(i)}) \cdot C_{AE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot f_w \cdot f_l \cdot f_c \cdot Capacity \cdot V_{ref}} - \frac{(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(j)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME})}{f_i \cdot f_w \cdot f_l \cdot f_c \cdot Capacity \cdot V_{ref}}$$

де SFC – питома ефективна витрата палива головних (індекс ME) і допоміжних двигунів (індекс AE), г/(кВт · год);

Capacity для газовозів – 70 % від дедвейту;

C_F – безрозмірний коефіцієнт кореляції між витратою палива і кількістю CO₂, що утворюється при його спалюванні в дизельному двигуні, величина якого прямо залежить від вмісту вуглецю;

V_{ref} – швидкість судна на глибокій воді при максимально допустимій потужності двигунів, вузлів;

$P_{ME(i)}$ приймається рівною 75% від номінальної встановленої потужності кожного головного двигуна (і-го) після вирахування потужності, що підводиться до валогенераторів ($P_{PTO(i)}$), кВт;

$P_{PTO(i)}$ приймається рівною 75% від потужності кожного валогенератора (і-го), поділеної на його ККД, кВт;

$P_{PTI(i)}$ визначається лише у разі наявності пристроїв підведення додаткової потужності до валопроводів (окрім головних двигунів) у складі пропульсивного комплексу, кВт;

$P_{eff(i)}$ складає 75% потужності, що виробляється з використанням інноваційних технологій вироблення енергії (без використання палив), та передається на пропульсивний комплекс, кВт;

$P_{AEff(i)}$ складає 75% від зниження потужності допоміжних двигунів в результаті використання інноваційних технологій для зменшення електричних втрат, кВт;

$P_{AE(i)}$ – сумарна потужність допоміжних двигунів, необхідна для забезпечення всіх споживачів електричною енергією на ходовому режимі, кВт;

f_j – поправочний коефіцієнт, що враховує специфічні конструктивні елементи судна, приймається 1;

f_w – безрозмірний коефіцієнт, що враховує зниження швидкості судна при зміні метеорологічних умов, приймається 1;

$f_{eff(i)}$ – коефіцієнт, що враховує використання на судні інноваційних технологій підвищення енергоефективності, приймається 1;

f_i – коефіцієнт, що враховує технічну або законодавчу необхідність обмеження дедвейту судна (розраховується за спеціальними формулами для суден льодового класу), приймається 1;

f_c – коефіцієнт, що враховує повноту валового обсягу вантажних приміщень, приймається 1;

f_l – коефіцієнт, який використовується для універсальних вантажних суден, обладнаних кранами для компенсації втрат дедвейту, приймається 1.

4.2. Визначення EEDI до впровадження гібридних технологій в склад СЕУ:

Табл 4.1. Вхідні дані для розрахунку EEDI: [7, 25]

Величина	Значення
Дедвейт	84 187 т
Потужність головного двигуна	10778 кВт
Швидкість	19,5 вузл
Кількість головних двигунів	2
Тип палива для головного двигуна	Зріджений природний газ
Коефіцієнт кореляції між витратою палива і CO ₂ для ГД	2,750 т CO ₂ /т палива
Питома ефективна витрата палива на ГД	134,2 г/(кВт · год)
Тип палива для дизель-генераторів	Зріджений природний газ
Коефіцієнт кореляції між витратою палива і CO ₂ для ДГ	2,750 т CO ₂ /т палива
Питома ефективна витрата палива на ДГ	145 г/(кВт · год)
Потужність валогенераторів	0 кВт
Потужність приводних електричних двигунів, що працюють на пропульсивний комплекс	0 кВт

Величина $P_{ME(i)}$ визначається як: [25]

$$\sum_{i=2}^{nME} P_{ME(i)} = 0,75 \cdot \left(\sum MCR_{ME(i)} - \sum P_{PTO(i)} \right) = 0,75 \cdot 2 \cdot (10778 - 0) = 16\,167 \text{ кВт}$$

Величина $P_{AE(i)}$ у випадку $MCR_{ME} \geq 10\,000$ кВт визначається як: [25]

$$\begin{aligned} \sum_{i=2}^{nME} P_{AE(i)} &= \left(0,025 \cdot \left(\sum_{i=2}^{nME} MCR_{ME(i)} + \frac{\sum_{i=2}^{nPTI} P_{PTI(i)}}{0,75} \right) \right) + 250 = \\ &= \left(0,025 \cdot \left(10778 \cdot 2 + \frac{0}{0,75} \right) \right) + 250 = 788,9 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Розраховуємо EEDI:

$$EEDI = \frac{(P_{ME} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot f_w \cdot f_l \cdot f_c \cdot Capacity \cdot V_{ref}}$$

$$EEDI = 5,46 \text{ г CO}_2/(\text{т} \cdot \text{миля})$$

					КР.135.6211М	Аркуш
						112
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для кожного типу суден, на які поширюється дія індексу енергетичної ефективності, введені обмежувальні криві на викиди діоксиду вуглецю, що розраховуються за формулою: [25]

$$EEDI = a \cdot b^{-c},$$

де b – це дедвейт, a та c – коефіцієнти, значення яких для газовозів становить 11200 та 0,456 відповідно. Тоді:

$$EEDI = 11200 \cdot 84\,187^{-0,456} = 6,35 \text{ г CO}_2/(\text{т} \cdot \text{миля})$$

Нормативні вимоги щодо емісії CO₂ були запроваджені з 2013, посилюючись на кожному новому етапі.

Таблиця 4.2. Нормативні вимоги щодо емісії CO₂ на різних етапах для суден газовозів [25]

Тип судна	Дедвейт, т	Етап 0 1/01/2013– 31/12/2014, %	Етап 1 1/01/2015– 31/12/2019, %	Етап 2 1/01/2020– 31/12/2024, %	Етап 3 з 1/01/2025, %
Газовоз	>10000	0	10	20	30
	2000...10000	-	0-10	0-20	0-30

Нормативні значення EEDI для газовозу на Етапах 2 та 3:

$$EEDI_{\text{ет2}} = EEDI \cdot 0,8 = 6,35 \cdot 0,8 = 5,08 \text{ г CO}_2/(\text{т} \cdot \text{миля})$$

$$EEDI_{\text{ет3}} = EEDI \cdot 0,7 = 6,35 \cdot 0,7 = 4,45 \text{ г CO}_2/(\text{т} \cdot \text{миля})$$

Для відповідності до вимог Етапу 3, що починається з 01.01.2025 року необхідно знизити значення EEDI на 1,01 г CO₂/(т · миля). Щоб вирішити цю проблему були провадженні відповідні зміни у склад СЕУ.

4.3 Визначення EEDI після впровадження гібридних технологій в склад СЕУ:

Табл 4.3. вхідні дані для розрахунку EEDI: [7, 25]

Величина	Значення
Дедвейт	84 187 т
Потужність головного двигуна	8383 кВт
Швидкість	19,5 вузл
Кількість головних двигунів	2
Тип палива для головного двигуна	Зріджений природний газ
Коефіцієнт кореляції між витратою палива і CO ₂ для ГД	2,750 т CO ₂ /т палива
Питома ефективна витрата палива на ГД	132,3 г/(кВт · год)
Тип палива для дизель-генераторів	Зріджений природний газ
Коефіцієнт кореляції між витратою палива і CO ₂ для ДГ	2,750 т CO ₂ /т палива
Питома ефективна витрата палива на ДГ	145 г/(кВт · год)
Потужність SOFC	3095 кВт
Тип палива для SOFC	Зріджений природний газ
Коефіцієнт кореляції між витратою палива і CO ₂ для SOFC	2,750 т CO ₂ /т палива
Питома ефективна витрата палива в SOFC	100 г/(кВт · год)
Потужність приводних електричних двигунів, що працюють на пропульсивний комплекс	4200 кВт

Величина $P_{ME(i)}$ визначається як: [25]

$$\sum_{i=2}^{nME} P_{ME(i)} = 0,75 \cdot \left(\sum MCR_{ME(i)} - \sum P_{PTO(i)} \right) = 0,75 \cdot 2 \cdot (8383 - 0) = 12574,2 \text{ кВт}$$

Величина $P_{AE(i)}$ у випадку $MCR_{ME} \geq 10\,000$ кВт визначається як: [25]

$$\begin{aligned} \sum_{i=2}^{nME} P_{AE(i)} &= \left(0,025 \cdot \left(\sum_{i=2}^{nME} MCR_{ME(i)} + \frac{\sum_{i=2}^{nPTI} P_{PTI(i)}}{0,75} \right) \right) + 250 = \\ &= \left(0,025 \cdot \left(8383 \cdot 2 + \frac{0}{0,75} \right) \right) + 250 = 669,15 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Розраховуємо EEDI:

$$EEDI = \frac{(P_{ME} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}) + (P_{FC} \cdot C_{FFC} \cdot SFC_{FC}) - (P_{PTI} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME})}{f_i \cdot f_w \cdot f_l \cdot f_c \cdot Capacity \cdot V_{ref}}$$

$$EEDI = 3,62 \text{ г CO}_2/(\text{т} \cdot \text{миля})$$

Як можна побачити завдяки використанню гібридних технологій в складі СЕУ судна вдалося знизити значення EEDI на 1,84 г CO₂ /(т · миля).

Поточне значення нове EEDI повністю відповідає новим вимогам щодо обмеження емісії CO₂, що почнуть працювати з 2025 року.

Висновок

Після впровадження гібридних технологій перетворення енергії до складу СЕУ пропульсивного комплексу газозову був доповнений новими елементами: акумуляторними батареями та паливними елементами з метою зниження рівню шкідливих викидів в довкілля у зонах жорсткого контролю до емісії з судна.

Був проведений розрахунок буксирувальної потужності та опору судна. Спираючись на це було запропоновано зниження рівню навантаження головних двигунів та компенсація нестачі енергії використанням гібридних технологій.

Було прийнято нову схему СЕУ та створено 3D-модель елментів пропульсивного комплексу.

Окрім було розраховано теплові потоки в СЕУ на основних режимах роботи судна, та на їх основі побудовано діаграми.

Було оцінено ефективність впровадженням модифікацій розрахунком EEDI до та після застосування гібридних технологій. В результаті EEDI був зменшений на 1,84 г CO_2 /(т · миля).

					КР.135.6211м	Аркуш
						115
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаної літератури

1. United Nations Conference on Trade and Development. Merchant fleet – UNCTAD Handbook of Statistics 2023. United Nations, 2023. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://unctad.org/system/files/official-document/tdstat48_en.pdf, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.
2. World LNG Report 2023. Міжнародна газова асоціація, 2023. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2023/08/IGU-World-LNG-Report-2023_.pdf, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.
3. IGU 2024 LNG Report. Міжнародна газова асоціація, 2024. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2023/08/IGU-World-LNG-Report-2023_.pdf, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.
4. LNG sector – World report 2022. Міжнародна газова асоціація, 2022. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.maritimecyprus.com>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.
5. International Gas Union (IGU). IGU World LNG Report 2021. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.igu.org/resources/world-lng-report-2021/>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.
6. International Gas Union (IGU). 2020 World LNG Report. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.igu.org/resources/2020-world-lng-report/>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.
7. The Royal Institution of Naval Architects (RINA). *Significant Ships of 2018*. – Дата звернення: 18.11.2024.
8. DNV. *General Regulations: Class Notations*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://civamblog.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/11/ts102.pdf>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.
9. MarineTraffic. *MarineTraffic: Ship Tracking and Maritime Traffic*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.marinetraffic.com>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.
10. International Maritime Organization (IMO). *IMO's work to cut GHG emissions from ships*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

					КР.135.6211м	Аркуш
						116
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

<https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Cutting-GHG-emissions.aspx>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.

11. International Maritime Organization (IMO). *IMO's work to cut GHG emissions from ships*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Historic-Background.aspx>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.

12. International Maritime Organization (IMO). *MEPC 80-17-Add.1 – Report of the Marine Environment Protection Committee on Its Eightieth Session*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/annex/MEPC%2080/Annex%2015.pdf>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.

13. International Maritime Organization (IMO). *ECA (Emission Control Area) – Sustainable Ships*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sustainable-ships.org/rules-regulations/eca>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.

14. The Maritime Executive. *World's largest plug-in hybrid vessel delivered*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.maritime-executive.com/article/world-s-largest-plug-in-hybrid-vessel-delivered>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.

15. World Maritime News. *Deal signed for construction of world's largest hybrid ferry*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.worldmaritimeneews.com/article/317429/deal-signed-for-construction-of-worlds-largest-hybrid-ferry/>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.

16. Maersk. *Maersk to pilot a battery system to improve power production*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.maersk.com/news/articles/2024/11/maersk-to-pilot-a-battery-system-to-improve-power-production>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.

17. Mohammad Hossein Arabnejad, Fabian Thies, Hua-Dong Yao, Jonas W. Ringsberg. *Zero-emission propulsion system featuring Flettner rotors, batteries and fuel cells, for a merchant ship*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919315370>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.

					КР.135.6211м	Аркуш
						117
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

18. Daud, W.R.W.; Rosli, R.E.; Majlan, E.H.; Hamid, S.A.A.; Mohamed, R.; Husaini, T. *PEM fuel cell system control: A review. Renewable Energy*. 2017, 113, 620–638. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116302536>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.

19. Zhe Wang, Bo Dong, Yifu Wang, Mingyu Li, Han Liu, Fenghui Han. *Analysis and evaluation of fuel cell technologies for sustainable ship power: Energy efficiency and environmental impact*. [Електронний ресурс]. *ScienceDirect*. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919317370>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.

20. Diesveld, B.; De Maeyer, E.; Visser, K.; Baldi, F.; van Biert, L. *Maritime fuel cell applications: A tool for conceptual decision making*. 2020. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978920300709>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.

21. E. Gadducci, T. Lamberti, M. Rivarolo, L. Magistri «*Experimental campaign and assessment of a complete 240-kW Proton Exchange Membrane Fuel Cell power system for maritime applications*. [Електронний ресурс]. *ScienceDirect*. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235197892030091X>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.

22. MAN Energy Solutions. *Basic principles of ship propulsion. Optimisation of hull, propeller, and engine interactions for maximum efficiency*. 2023. [Електронний ресурс]. – 78 с. – Режим доступу: <https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync/basic-principles-of-ship-propulsion-eng.pdf>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.

23. Шостак В. П. Опір докільця руху транспортного судна : навчальний наочний посібник / В. П. Шостак, А. Ю. Манзюк. - Миколаїв : Видавництво НУК, 2012. – 184 с.

24. Web-application Earth: a global map of wind, weather, and ocean conditions. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://earth.nullschool.net/#current/ocean/primary/waves/overlay=none/orthograp>

[hic=-10.76,24.71,435/loc=-94.948,26.502](#) , вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.

25. Горбов В. М. Основи суднової енергетики : збірник практичних завдань / В. М. Горбов, І. П. Єсін, В. С. Мітенкова. – Миколаїв : НУК, 2018. – 244 с.

26. ABB. *Detailed Description _ PTOPTI*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

https://library.e.abb.com/public/6e3c955f85914f999774a6177734a62d/Detailed%20Description%20_%20PTOPTI.pdf, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.

27. INGEDRIVE. *PTI/PTO Hybrid Electrical Drives*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

https://www.ingetteam.com/Portals/0/Catalogo/Sector/Documento/SSE_2655_Archivo_pc06ippt01-.pdf, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.

28. WinGD. *Instruction Manual X72DF*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.wingd.com/WinGD.com/files/17/170fb25a-0bd7-43e4-a0fb-7f4c27460fe1.pdf>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.

29. WinGD. *iCER INSTALLATION GUIDELINE for WinGD dual-fuel engines*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://www.wingd.com/WinGD.com/files/31/31a47781-5233-44ac-b868-7e3279552334.pdf>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.

30. Wärtsilä. *Wärtsilä 34DF Manual*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/dual-fuel-engines/wartsila-34df>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.

31. ABB. *Variable speed shaft generator (PTO/PTI)*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://new.abb.com/marine/systems-and-solutions/electric-solutions/variable-speed-shaft-generator>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.

32. ABB DRIVES. *Hybrid vessel – Shaft generator drive. Application guide*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

https://library.e.abb.com/public/3c3cf4082d9045d797ae1fc08a274e59/EN_ACS880_MD_Hybrid_vessel_SGD_AG.pdf?x-sign=wMwOQ3qVBVL4D78KOdgPZekLeLGZFMrfC0txCu3uaXVXoQdTDM7LQo4cCinhwxD, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.

					КР.135.6211м	Аркуш
						119
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

33. Aalborg. *Technical Bulletin for Exhaust Gas Boilers*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.alfalaval.ua/products/heat-exchanger/boilers/oil-gas-fired-composite-steam-boiler/aalborg-oc-tci/>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.
34. Єпіфанов О. А. Конструкції суднових котлів : навчальний посібник / О.А. Єпіфанов. – Миколаїв : НУК, 2016. – 198 с
35. Alfa Laval. *Desalt DPU-2-36-C Series Technical Manual*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/products/process-solutions/fresh-water-solutions/two-stage-fresh-water-generator/desalt-dpu-2-36-c-series-2-stage.pdf>, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.
36. Kangrim. *KFB-110S Incinerator*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.maritimeinformed.com/datasheets/kangrim-kfb-110s-incinerator-co-1654699924-ga/kangrim-marine-boiler_1654784604.pdf, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.
37. Calculator of thermodynamic properties of water, overheated steam and saturated steam. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.peacesoftware.de/einigewerte/wasser_dampf_e.html, вільний. – Дата звернення: 18.11.2024.
38. Артемов Г.А., Горбов В.М. Суднові Енергетичні установки: Навчальний посібник. - Миколаїв: УДМТУ, 2002. - 356 с.
39. Артёмов Г.А. Системы судовых энергетических установок: учебное пособие [Текст] /Г.А. Артёмов, В.П. Волошин, А.Я. Шквар, В.П. Шостак. - Л.: Судостроение, 1990. – 376 с.