

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Машинобудівний навчально-науковий інститут

*Кафедра експлуатації
суднових енергетичних установок
та теплоенергетики*

„Допущено до захисту”

Завідувач кафедри ЕСЕУ та ТЕ


Б.М. Личко
«16» грудня 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»
ОП 135 «Суднові енергетичні установки та устаткування»

Модернізація пропульсивного комплексу газовоза Flex Aurora

Modernization of the ship propulsion complex of the
gas carrier Flex Aurora

Розрахунково-пояснювальна записка

Виконав:
Студент групи 6211М



Детюков В.О.

Керівник роботи:
доктор техн. наук, проф.

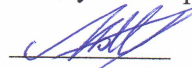


Коробко В.В.

Миколаїв – 2025 р.

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Машинобудівний навчально-науковий інститут
кафедра Експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСЕУ та ТЕ,
 доцент Б.М. Личко

“06” 10 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

Тема: Модернізація пропульсивного комплексу газозова FLEX Aurora.

ЗМІСТ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Анотація – надається (державною та англійською мовами).

Вступ.

Розділ 1. Загальні відомості про судно та склад енергетичної установки.

1.1 Аналіз характеристик базового судна та його енергетичної установки.

1.2 Розробка заходів з модернізації пропульсивного комплексу судна.

Розділ 2. Модернізація пропульсивного комплексу судна.

2.1. Розробка заходів з модернізації пропульсивного комплексу судна.

2.2. Вибір та обґрунтування типу ГД, розгляд альтернативних варіантів комплектації.

2.3. Вибір типу та схеми передачі потужності, вибір елементів суднової передачі, розрахунок елементів суднового валопроводу.

Розділ 3. Проектування допоміжної ЕУ.

3.1. Аналіз головних споживачів теплової та електричної енергії на судні. Вибір схем вироблення електричної та теплової енергії.

3.2. Розроблення та розрахунок теплової схеми та схеми утилізації скидної теплоти.

3.3. Розробка заходів з обмеження емісії GHG.

3.4. Проектування енергетичних комплексів. Визначення їх складу та підбор устаткування.

Розділ 4. Проектування систем СЕУ.

4.1. Паливна система. Опис системи подачі палива до суднового дизельного двигуна.

4.2. Розробка принципової схеми системи роторних вітрил.

4.3. Модальний аналіз роторних вітрил.

Розділ 5. Заходи по забезпечення надійної експлуатації обладнання СЕУ.

5.1. Вимоги до розміщення обладнання в МКВ судна.

5.2 Розробка компоновки обладнання СЕУ в МКВ.

Розділ 6. Розробка розташування обладнання СЕУ в МКВ

6.1 Загальні принципи компоновання

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						2
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6.2. Розробка заходів з моніторингу стану корпусу судна.

Розділ 7. Техніко-економічне обґрунтування прийнятих рішень

7.1. Оцінка ефективності впровадження ESD заходів за критерієм EEDI

7.2. Рекомендацій з впровадження результатів роботи

Висновки.

Список використаних джерел інформації.

Додатки.

Обсяг розрахунково-пояснювальної записки (РПЗ) : 90 - 120, формат аркушів А4.

До РПЗ додаються один або більше примірників презентації доповіді, формат аркушів А4 або А3 (графічний матеріал форматується при друкуванні).

Доповідь здійснюється у вигляді слайд - презентації.

Презентація доповіді, містить титульний лист з підписами, анотацію, графічні матеріали з підписами, висновки.

За рішенням керівника допускається доповідь з використанням креслень (плакатів), формат аркушів А1.

Перелік графічного матеріалу

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (на розсуд керівника КР)	Аркуші, формат А1 ***.pdf
1	Характеристики судна, вибір та обґрунтування проектних рішень (креслення поздовжнього перерізу)	1-2
2	Теплова схема СЕУ (принципова схема)	1
3	Системи СЕУ	1-2
4	Розташування обладнання у МКВ, 2-3 види (креслення)	2-3
5	Технологічна розробка – монтаж/ремонт.	1-2
6	Плакати додаються в разі необхідності (кольорові або ч/б)	1-4

Тема КР затверджені наказом НУК

№ 1226-ч від "15" 10 2025 року.

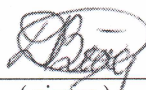
Завдання видано

"06" 10 2025 р.

Дата подання КР на кафедру

"01" грудня 2025 р.

Завдання прийняв до виконання студент


(підпис)

Детюков В.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи


(підпис)

Коробко В.В.
(прізвище та ініціали)

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

Зміст

Анотація.....	6
Прийняті скорочення.....	8
Вступ.....	9
Розділ 1. Загальні відомості про судно та склад енергетичної установки.....	10
1.1 Аналіз характеристик базового судна та його енергетичної установки.....	10
1.2 Розробка заходів з модернізації пропульсивного комплексу судна.....	25
Розділ 2. Модернізація пропульсивного комплексу судна.....	31
2.1. Розробка заходів з модернізації пропульсивного комплексу судна.....	31
2.2. Вибір та обґрунтування типу ГД, розгляд альтернативних варіантів комплектації.....	35
2.3. Вибір типу та схеми передачі потужності, вибір елементів суднової передачі, розрахунок елементів суднового валопроводу.....	38
Розділ 3. Проектування допоміжної ЕУ.....	46
3.1. Аналіз головних споживачів теплової та електричної енергії на судні. Вибір схем вироблення електричної та теплової енергії.....	46
3.2. Розроблення та розрахунок теплової схеми та схеми утилізації скидної теплоти.....	49
3.3. Розробка заходів з обмеження емісії GHG.....	52
3.4. Проектування енергетичних комплексів. Визначення їх складу та підбір устаткування.....	55
Розділ 4. Проектування систем СЕУ.....	59
4.1. Паливна система. Опис системи подачі палива до суднового дизельного двигуна.....	59
4.2. Розробка принципової схеми системи роторних вітрил.....	68
4.3. Модальний аналіз роторних вітрил.....	71

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 5. Заходи по забезпечення надійної експлуатації обладнання

СЕУ.....76

5.1. Вимоги до розміщення обладнання в МКВ судна.....76

5.2 Розробка компоновки обладнання СЕУ в МКВ (Significant Ship).....79

Розділ 6. Розміщення енергетичного обладнання в МВ.....82

6.1 Вимоги до розміщення обладнання в МКВ судна.....82

6.2 Розробка заходів з моніторингу стану корпусу судна.....85

Розділ 7. Техніко-економічне обґрунтування прийнятих рішень.....87

7.1 Оцінка ефективності впровадження ESD заходів за критерієм EEDI.....87

7.2 Рекомендацій з впровадження результатів роботи.....88

Висновок.....90

Використана література.....91

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Анотація

У кваліфікаційній роботі розглянуто техніко-економічне обґрунтування модернізації енергетичної установки газовоза *Flex Aurora* з урахуванням сучасних екологічних вимог та тенденцій розвитку суднової енергетики. Проведено аналіз існуючого обладнання та обґрунтовано вибір нових технічних рішень для систем електропостачання (СЕУ), опріснення, інсинерації, очищення баластної води.

Окрема увага приділена головному двигуну WinGD W5X72DF та його допоміжним системам, з урахуванням їх енергоефективності та екологічності.

У роботі розглянуто доцільність використання гібридних енергетичних рішень, зокрема утилізаційних котлів, батарейних систем, паливних елементів, а також альтернативних джерел енергії, таких як роторні вітрила.

Додатково проаналізовано ефективність використання Wake Equalizing Duct (WED) для зниження гідродинамічного опору та покращення ККД гребного гвинта.

Запропоновані заходи дозволяють зменшити споживання палива, рівень шкідливих викидів (GHG, NO_x, SO_x), підвищити загальну ефективність роботи суднової енергетичної установки, що є актуальним завданням в умовах глобальної екологічної політики ІМО.

Ключові слова: газовоз, енергетична установка, пропульсивний комплекс, енергозберігаючі пристрої гребного гвинта, вітрові системи підтримки руху (wind-assisted propulsion), двопаливні (dual-fuel) двигуни, ІМО MARPOL, альтернативні джерела енергії, скорочення викидів CO₂.

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

Annotation

The qualification work examines the technical and economic justification for the modernization of the power plant of the LNG carrier Flex Aurora, taking into account current environmental requirements and trends in marine energy development. The analysis of the existing equipment has been carried out, and the selection of new technical solutions for the ship's electrical power system (EPS), desalination system, incineration system, and ballast water treatment system has been substantiated. Special attention is given to the main engine WinGD W5X72DF and its auxiliary systems, considering their energy efficiency and environmental performance.

The study evaluates the feasibility of implementing hybrid energy solutions, including waste heat recovery boilers, battery systems, fuel cells, as well as alternative energy sources such as rotor sails. Additionally, the effectiveness of using a Wake Equalizing Duct (WED) to reduce hydrodynamic resistance and improve the propeller's efficiency has been analyzed.

The proposed measures contribute to reducing fuel consumption and harmful emissions (GHG, NO_x, SO_x), as well as improving the overall efficiency of the ship's power plant, which is a relevant task in the context of the IMO's global environmental policy.

Keywords: gas carrier, power plant, propulsion system, propeller energy-saving devices, wind-assisted propulsion systems, dual-fuel engines, IMO MARPOL, alternative energy sources, CO₂ emission reduction.

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Прийняті скорочення

СЕУ — Суднова енергетична установка

СЕС — Суднова електростанція

ДКУ — Дизель-генераторна установка

ДГ — Допоміжний генератор (дизель-генератор)

ГД — Головний двигун

PMS — Power Management System (Система енергетичного менеджменту)

GHG — Greenhouse Gases (Парникові гази)

SO_x — Оксиди сірки

NO_x — Оксиди азоту

IMO — International Maritime Organization (Міжнародна морська організація)

WHRS — Waste Heat Recovery System (Система утилізації теплоти відпрацьованих газів)

WED — Wake Equalizing Duct (Канал вирівнювання потоку)

HT — High Temperature Circuit (Високотемпературний контур охолодження)

LT — Low Temperature Circuit (Низькотемпературний контур охолодження)

SW — Sea Water Circuit (Забортний водяний контур)

FC — Fuel Cell (Паливний елемент)

LNG — Liquefied Natural Gas (Зріджений природний газ)

DF — Dual Fuel (Двигун подвійного палива)

EEDI — Energy Efficiency Design Index (Індекс енергоефективності проєктування)

SCR — Selective Catalytic Reduction (Селективне каталізаторне відновлення — система очищення NO_x)

EGCS — Exhaust Gas Cleaning System (Система очищення вихлопних газів, скруббер)

BWTS — Ballast Water Treatment System (Система очищення баластної води)

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

Вступ

Основною метою данної кваліфікаційної роботи є модернізація суднової енергетичної установки існуючого судна з урахуванням сучасних стандартів і технологій. У роботі передбачено проведення глибокого аналізу існуючого стану енергетичної установки, визначення споживачів електричної та теплової енергії, розробку теплової схеми з урахуванням усіх режимів експлуатації судна, а також вибір оптимального обладнання та систем, здатних забезпечити ефективну та екологічно безпечну роботу судна.

Під час розробки проєкту особлива увага приділяється питанням зменшення шкідливих викидів, підвищення паливної економічності та впровадженню сучасних технологій очищення. Це вимагає глибокого аналізу новітніх розробок у галузі морської енергетики, досвіду провідних суднобудівних компаній, а також постійного моніторингу рішень, які вже успішно застосовуються в міжнародній практиці. Отримані дані дозволяють впроваджувати інноваційні рішення до структури СЕУ модернізованого судна.

Важливим елементом усього комплексу є й вплив зовнішніх чинників на ефективність енергетичної установки. Зокрема, під час експлуатації судна зростає опір руху через корозію та обростання підводної частини корпусу. Також суттєве значення мають гідрометеорологічні умови — хвилювання, напрям та сила вітру, течії, які впливають на навантаження головного двигуна та витрати палива. Ці чинники призводять до зниження ефективності пропульсивної установки, що вимагає постійного контролю технічного стану корпусу судна.

З огляду на це, в межах кваліфікаційної роботи також запропоновано систему моніторингу стану підводної частини корпусу. Така система дозволить своєчасно виявляти погіршення гідродинамічних властивостей судна, забезпечити ефективне технічне обслуговування, зменшити витрати на ремонт і покращити загальні експлуатаційні показники.

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. Загальні відомості про судно та склад енергетичної установки.

1.1 Аналіз характеристик базового судна та його енергетичної установки.

Поставлений у липні 2020 року як перший із чотирьох LNG Carriers 5-го покоління, Flex Aurora був побудований Hyundai Samho Heavy Industries. Він належить компанії Flex LNG Джона Фредріксена, яка, як кажуть, має найбільший флот авіаносців 5-го покоління з 13 суднами, що знаходяться в експлуатації або на замовлення, рис. 1.1.



Рис.1.1 Загальний вигляд танкера - FLEX AURORA

Ці судна мають місткість близько 174 000 м³, використовують мембранну систему стримування GTT Mark III і характеризуються вибором низькошвидкісних, високоефективних двотактних двигунів і низькою швидкістю википання вантажу.

Судно того ж класу що й Flex Aurora – Flex Amber – було доставлено в жовтні 2020 року, а решта два судна, які вже називаються Flex Volunteer і Flex Vigilant, були виготовлені на початку 2021 року. Цей клас судна має 297,09 м у довжину та 46,4 м у ширину, з невелика осадка 12,5м.

Ефективність судна демонструє його значення EEDI, яке становить 4,52, що становить майже половину від необхідного рейтингу 8,92 для судна такого типу та

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розміру. Це сталося завдяки поєднанню його подвійного скегового корпусу та суднової енергетичної установки.

На відміну від усіх інших суден у флоті власника, які використовують двигуни MAN B&W ME-GI, Flex Aurora та його серійні моделі мають встановлені 5-циліндрові двигуни WinGD X72DF. Кожне судно має пару цих агрегатів потужністю 12 259 кВт, кожен з яких працює зі швидкістю 69,5 обертів на хвилину та підключений до власного гвинта з фіксованим кроком діаметром 8,7 м.

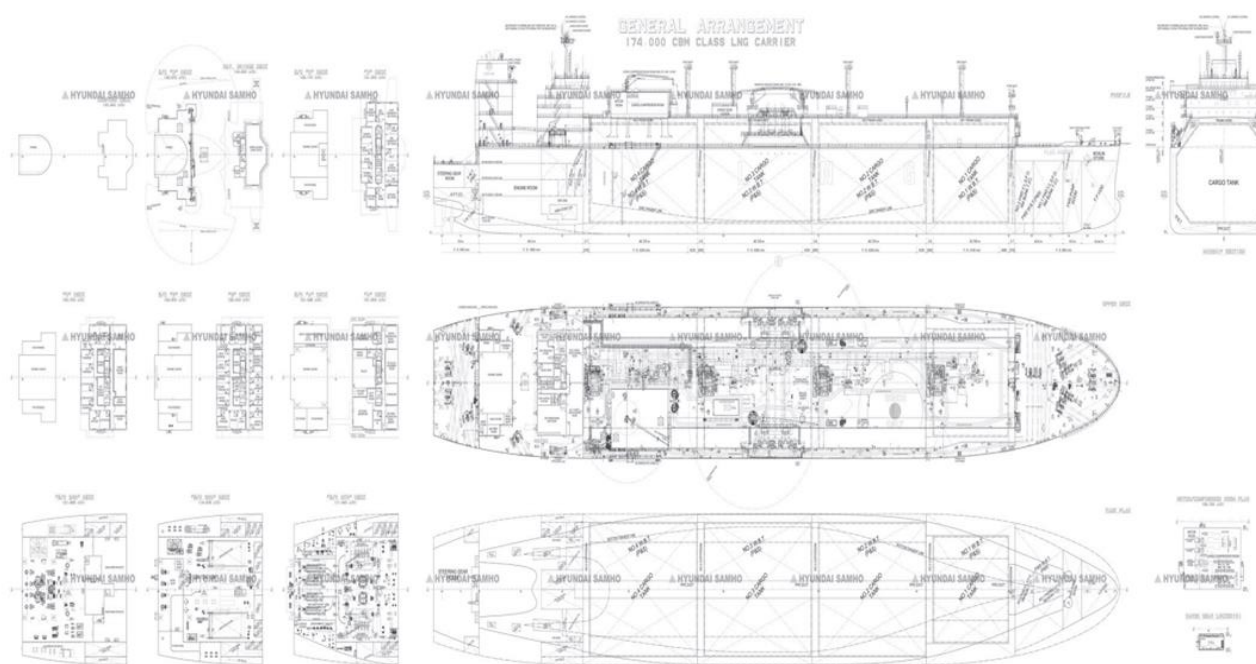


Рис.1.2 Поздовжній та поперечні перетини танкера

Гвинти оснащені ковпачком Hyundai Hi-FIN, який покращує ефективність, генеруючи протидіючі завихрення, які компенсують ті, що генеруються гвинтом.

Повідомляється, що судна мали бути обладнані скруберами, але це не було зроблено, і замість цього вони можуть відповідати нормам SOx 2020, працюючи на СПГ або сумісному паливі. Вони також оснащені системами SCR для відповідності NOx Tier III.

Район експлуатації

Судно FLEX AURORA призначене для міжнародних океанських перевезень скрапленого природного газу (LNG). Воно відноситься до

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

категорії морських суден необмеженого району плавання, що дозволяє здійснювати комерційну діяльність у будь-яких районах Світового океану, включаючи тропічні, помірні та арктичні широти (за умови відповідного льодового класу).

Завдяки великій автономності, надійній конструкції корпусу (подвійний корпус з мембранними танками типу GTT Mark III Flex) і високій енергоефективності, FLEX AURORA може використовуватись на ключових маршрутах транспортування LNG, таких як:

- Катар – Азія (Японія, Китай, Південна Корея),
- США – Європа,
- Австралія – Індія.

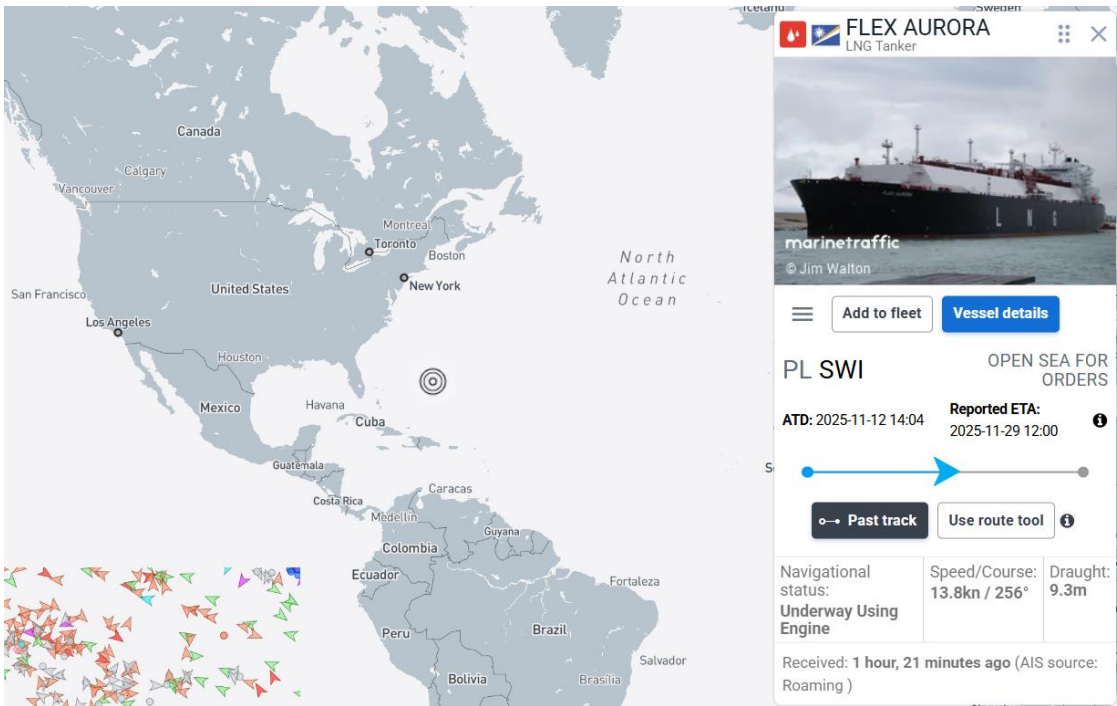


Рис.1.3 Фактичне знаходження судна Flex Aurora

Також судно має баластні системи з очищенням (BWTS) та відповідає вимогам Міжнародного кодексу IGF, що забезпечує безпечну експлуатацію в зонах з підвищеними екологічними стандартами (наприклад, ECAs — Emission Control Areas).

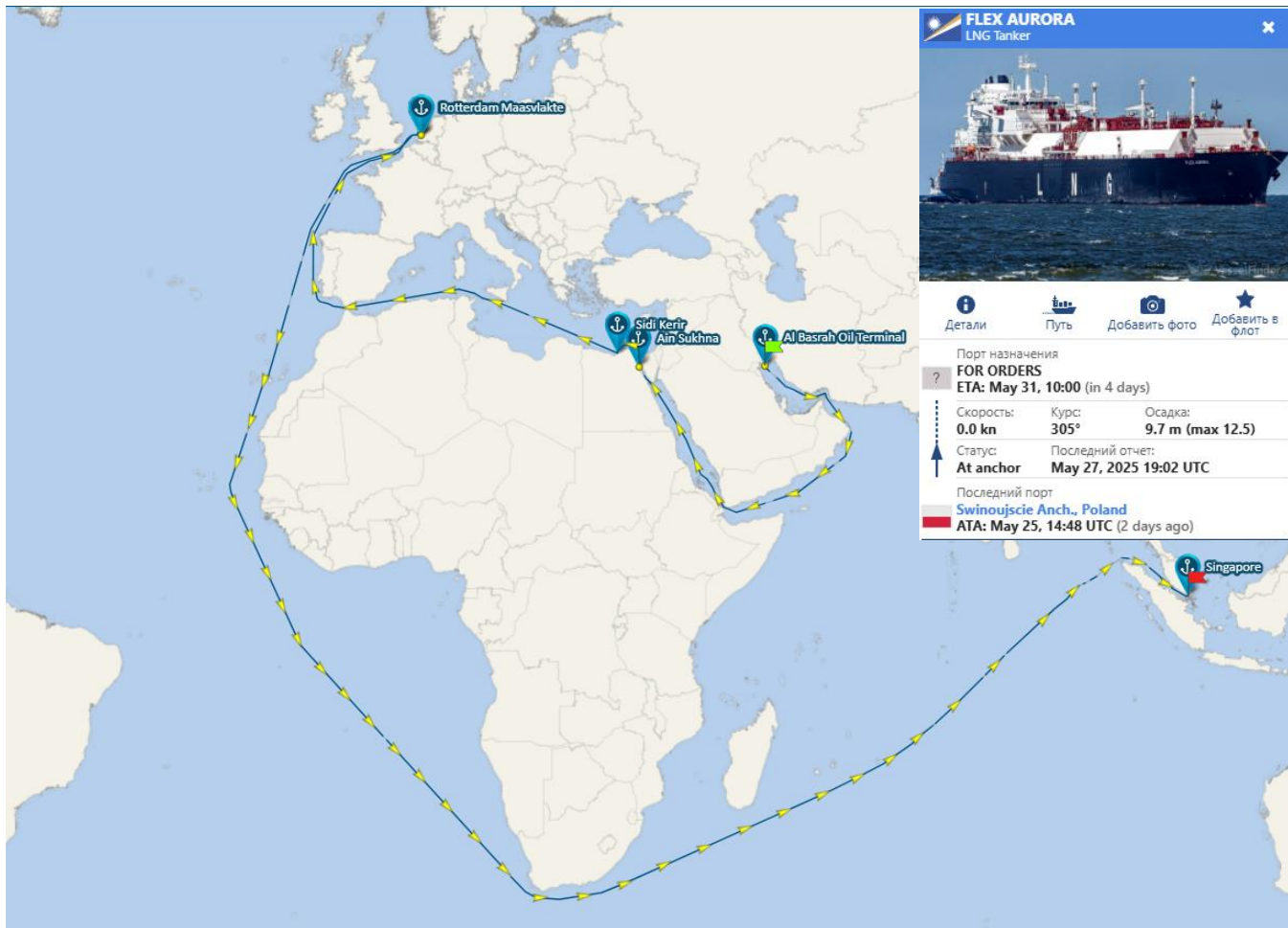


Рис.1.4 Район експлуатації судна Flex Aurora

ІМО номер: 9857365

ММСІ: 538008316

Прапор: Marshall Islands (Маршаллові Острови)

Основні характеристики

Таблиця 1.1 Основні характеристики судна:

Назва характеристики	Значення, примітки
Повна довжина, м	297,09
Довжина між перпендикулярами, м	291
Максимальна ширина судна, м	46,40
Висота судна:	
до головної палуби, м	26,50
Осадка:	
конструктивна, м	12,50
Дедвейт:	

водотонажність, gt	116430
рухливий вантаж, т	128206
легкий вантаж, т	34431
дедвейт проектний, м ³	93775
Об'єм вантажних цистерн, м ³	174001
Об'єм паливних цистерн:	
Важка нафта м ³	5220
дизельне паливо, м ³	550
Об'єм водяного баласту, м ³	64560
Швидкість руху v, вуз	19,5
Вантажні насоси:	
кількість	8
виробник	Shinco
тип	Вертикальний відцентровий, занурений
продуктивність, м3 /год	1850
Команда, чол	40
Вантажні крани/вантажний механізм	
кількість	2
виробник	Oriental
тип	Електрогідравлічний
Продуктивність, т	10
Швартовне обладнання:	
кількість	10
виробник	Flutex
тип	Електричний
Спеціальні рятувальні засоби:	
Кількість кожного та місткість	2 набори на 34 персоні
виробник	Norsafe
тип	Рятувальний пліт

Швартовний пристрій утримує судно під час стоянки біля причалу, борту іншого судна або іншої плавучої споруди.

Якірний пристрій забезпечує надійне утримання судна у певному положенні відносно хвиль, вітру та течій при стоянці у морі, на рейді та в інших віддалених

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

від берега місцях шляхом закріпленні його за ґрунт за допомогою якорю та якірного ланцюга.

На судні передбачено наступні суднові системи: осушувальна, баластна, система виявлення пожежі та система пожежогасіння система, очисне обладнання: установка очищення стічних вод, інсенератори.

Осушувальна система призначена осушувальна для видалення води у вантажних трюмах, машинному відділенні, цехних ящиках і інших відсіках, в яких може накопичуватися вода. Також застосоване магістральне розміщенні осушувальної системи. Баластна система призначена для покращення необхідних морехідних і експлуатаційних якостей зміною осадки, крену і диференту. Прийом баласту призводить до збільшення осадки, що в свою чергу підвищує остійність судна і знижує вітрове навантаження, поліпшуючи керованість.

На судні застосовано систему пожежної сигналізації, призначення якої своєчасно повідомляти про виникнення пожежі на судні. Сигнал, поданий автоматичною або ручною пожежною сигналізацією, надходить на спеціальний щит, змонтований на відповідному посту, і фіксується на ньому.

Морехідні якості судна

Автономність судна становить 96 діб, дальність плавання – 24278 миль, експлуатаційна швидкість – 19,5 вузлів [1]. Автономність та дальність плавання розраховано за запасами палива на судні.

Загальна характеристика суднової енергетичної установки (СЕУ)

Суднова енергетична установка (СЕУ) судна Flex Aurora представляє собою комплекс технічних засобів, що забезпечують енергетичну автономність судна, необхідну для виконання його функцій під час плавання та стоянки. До складу СЕУ судна Flex Aurora входять наступні основні компоненти:

Головний двигун:

Судно Flex Aurora належить до категорії сучасних LNG-танкерів, що відповідають найвищим стандартам міжнародного судноплавства та екологічної безпеки. Його енергетична установка є комбінованою системою з можливістю використання двох типів палива, що дозволяє забезпечити

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гнучкість експлуатації залежно від регіону плавання та вимог до викидів. У якості головного двигуна на судні встановлено W5X72DF – малообертовий двигун фірми Winterthur Gas & Diesel Ltd. Це п'ятициліндровий, рядний, двотактний, нереверсивний двигун з турбонаддувом, проміжним охолодженням, здатний працювати як на дизельному, так і на газоподібному паливі. Діаметр циліндра становить 720 мм, а хід поршня – 3086 мм, що забезпечує високу потужність і ефективність при знижених обертах.

Двигун використовує паливо різних марок HFO, ULSFO, MGO, GAS (LNG)

- кількість	$i = 2$
- марка	W5X72DF
- ефективна потужність ГД	$N_e = 12259 \text{ кВт}$
- частота обертів	$n = 69,5 \text{ об/хв}$
- питома витрата пального	$g_e = 0,1776 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ год)}$
- степінь підвищення тиску повітря в компресорі надувного агрегату ДВЗ	$\pi_k = 3,755$
- коефіцієнт корисної дії надувного компресору	$\eta_k = 0,85$
- сумарний коефіцієнт надлишку повітря	$\alpha_\Sigma = 3,16$
- температура відпрацьованих газів	$T_r = 508 \text{ К}$
- температура повітря на вході в надувний компресор	$T_b = 298 \text{ К}$
- нижча теплота згоряння палива,	$Q_i^r = 42700 \text{ кДж/кг}$
- коефіцієнт корисної дії валопроводу	$\eta_{вп} = 0,99$
- пропульсивний коефіцієнт	$\eta = 0,7$

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

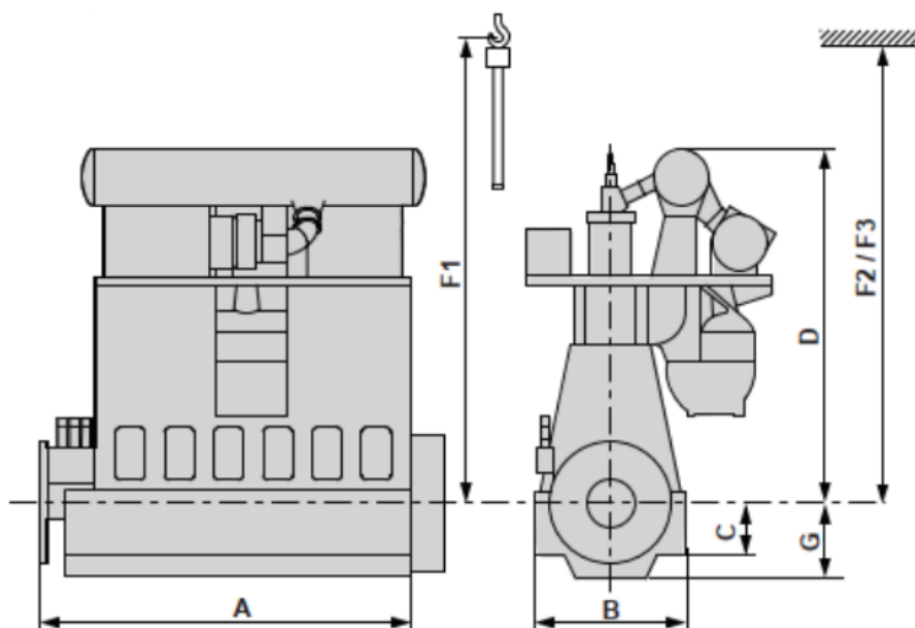


Рис. 1.5 Схема з нанесеними габаритами W5X72DF.

ІМО або Міжнародна морська організація — це спеціалізований орган Організації Об'єднаних Націй, який відповідає за безпеку судноплавства та запобігання забрудненню з суден. З огляду на те, що понад 80% світових товарів транспортується морем, регулювання викидів у цьому секторі є критично важливим. З цією метою ІМО встановила низку екологічних вимог, які охоплюють близько 99% світового тоннажу. Основні правила сформульовано у Конвенції МАРПОЛ 73/78, зокрема в Додатку VI, який присвячено запобіганню забрудненню повітря з суден.

Цей додаток, який набув чинності у 2005 році, фокусується на регулюванні викидів оксидів азоту (NO_x), оксидів сірки (SO_x), летких органічних сполук (ЛОС) та озоноруйнівних речовин. Для суден валовою місткістю понад 400 тонн, а також для офшорних платформ та бурових установок, встановлюється обов'язкова система сертифікації та періодичних перевірок. Одночасно визначаються спеціальні контрольні зони — ЕСА (Emission Control Areas), у яких діють більш жорсткі екологічні норми.

Для зниження рівня шкідливих викидів ІМО передбачає застосування таких технологій, як селективне каталітичне відновлення (SCR) для NO_x , скрубери для SO_x , водне впорскування у камеру згоряння, а також

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

використання нових видів палива, включаючи біопаливо та LNG. Всі ці технології мають бути інтегровані або вже інтегровані в конструкцію сучасних суден, включаючи Flex Aurora.

Крім безпосереднього контролю викидів, ІМО також розробила інструменти для підвищення енергоефективності суден, зокрема EEDI та SEEMP. Індекс енергоефективності проєктування (EEDI) — це технічний показник, що визначає обсяг викидів CO₂ на тонно-милю перевезеного вантажу, і який з часом поступово знижують, змушуючи виробників використовувати більш ефективні рішення. EEDI є обов'язковим для новозбудованих суден і прямо впливає на їхній проєкт. Відповідно, при модернізації наявного судна також слід орієнтуватися на ці стандарти.

Другий ключовий механізм — SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan) — передбачає операційне управління ефективністю судна. У його межах судновласник зобов'язаний впровадити план моніторингу, аналізу і поступового зниження енерговитрат, використовуючи інструменти на кшталт EEOI (Operational Energy Efficiency Index). Для Flex Aurora наявність SEEMP дозволяє проводити ефективне планування маршрутів, враховуючи гідрометеорологічні умови, навантаження і режим експлуатації.

Норми викидів складають основу вищезгаданих обмежень. Вони виникають через те, що судноплавство генерує майже 3% світових викидів CO₂ (слід зазначити, що щорічно викидається близько мільярда тонн цієї речовини, і ця цифра зростає), а також значну частину оксидів сірки та азоту, серед інших елементів.

Що стосується оксидів азоту або NO_x, які може викидати судно, то ІМО встановлює класифікацію суден та їхніх двигунів за трьома категоріями або «рівнями»: I, II і III, причому останній застосовується лише в зонах ЕКА, оскільки за межами цих зон ці судна можуть працювати відповідно до стандартів рівня II. Ці класифікації можна побачити на рис. 1.6 та 1.7 нижче.

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

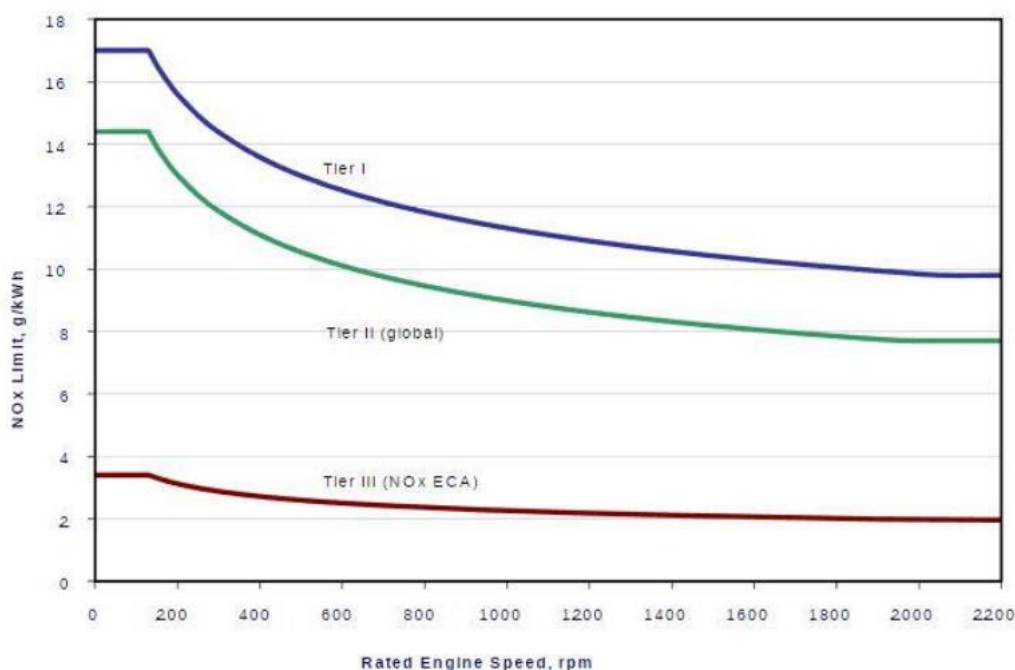


Рис. 1.6 Обмеження викидів NO_x, встановлені Додатком VI (DieselNet, 2022)

Для оксидів сірки встановлені різні ліміти викидів та майбутні цілі, починаючи зі скорочення викидів на 0,5% SO_x до 2025 року та на 0% у вищезазначених ЄКА.

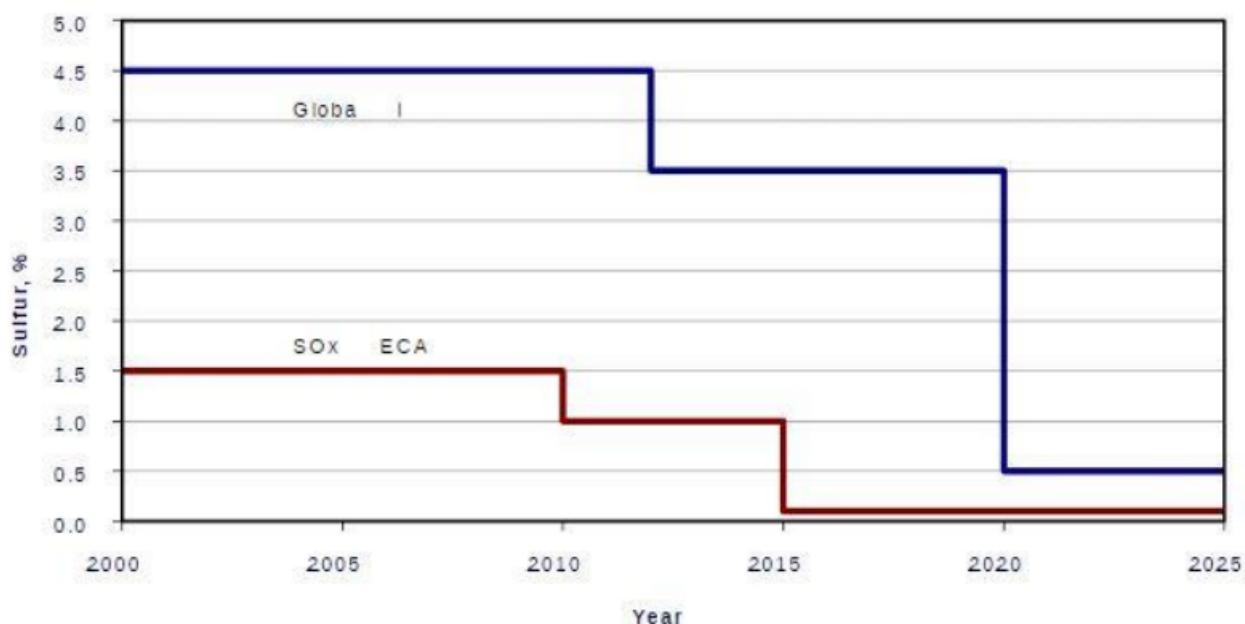


Рис 1.7 Обмеження викидів SO_x, встановлені Додатком VI (DieselNet, 2022)

Вимоги класифікаційних товариств, що об'єднані в IACS, накладають додаткові технічні стандарти на склад та компоновку енергетичних установок.

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

До них входять вимоги до вібраційної безпеки, стійкості до перенавантажень, рівня автоматизації, аварійної готовності та електричної сумісності всіх підсистем. Особлива увага приділяється пожежній безпеці, розміщенню обладнання у відповідності до схеми зонування машинного відділення, а також вимогам до охолодження, вентиляції та контролю витоків.

З урахуванням вищезазначеного, аналіз параметрів базової енергетичної установки показує, що хоча загальна компоновка і потужність обладнання відповідає потребам судна, воно не повністю відповідає сучасним міжнародним екологічним стандартам. Наявна СЕУ характеризується обмеженою гнучкістю в частині зміни режимів, високими питомими витратами палива на часткових навантаженнях, а також відсутністю інтегрованих систем моніторингу та регулювання емісій.

Крім того, при аналізі роботи допоміжних систем було виявлено потенціал для вдосконалення використання тепла відпрацьованих газів, покращення ефективності систем опалення та забезпечення парою, а також модернізації систем автоматизації для переходу до частково автономної роботи СЕУ.

Таким чином, з технічної точки зору, існуюча енергетична установка базового судна є потенційно придатною до модернізації. З огляду на специфічні вимоги ІМО та ІАКС, а також сучасні тенденції в галузі морських перевезень, модернізація має бути зосереджена на інтеграції нових систем контролю викидів, оптимізації використання енергії, впровадженні цифрових засобів моніторингу та адаптації до експлуатації з використанням більш чистих видів пального. Ці заходи дадуть змогу не лише забезпечити відповідність міжнародним вимогам, а й покращити експлуатаційну економіку судна, зменшити технічні витрати і подовжити термін служби енергетичного комплексу.

Котельна установка: Вертикально-циліндричні газо-трубні парові котли Ольборг OS-ТСі фірми "Альфа Лаваль Ольборг Індастріз". Попередня назва

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

котлів MISSION™ OS-TCi. Допоміжна котельна установка складається з двох допоміжного парових котла .Aalborg паропроодуктивністю 7 т/год.

Призначений для отримання пари, рідкопаливний котел Aalborg OS-TCi є вертикальним, попередньо зібраним котлоагрегатом. У цьому надійному, високопродуктивному котлі використовуються спіральні труби та зручний в експлуатації вбудований топковий пристрій, керування та контроль яким здійснюються системою Aalborg Control Touch (колишня назва MISSION Control Touch).видах палива, забезпечуючи ефективність та надійність.

Судова електро станція: Електричну енергію на судні чотири дизель-генератори. Двигуни виготовлені фірмою Wartsila типу два 8L34DF та два 6L34DF потужністю 3840 кВт та 2880 кВт при частоті обертання 720 хв^{-1} . Двигуни використовують паливо як і головний двигун.

Потреби у прісній воді задовольняються двома опріснювальними установками, продуктивність якої буде визначена розрахунками. Ця опріснювальна установка використовує охолоджувальний контур головного двигуна.

Система управління енергетичною установкою: Це автоматизована система, яка координує роботу всіх компонентів СЕУ, забезпечуючи їх оптимальне функціонування та безперебійність енергопостачання судна.

Завдяки сучасним технологіям та високоефективним компонентам, СЕУ судна Flex Aurora забезпечує надійну та економічну експлуатацію судна, знижуючи екологічний вплив і підвищуючи його конкурентоспроможність на ринку морських перевезень.

1.6 Вимоги МАРПОЛ 73/78

Судно FLEX AURORA, як сучасне LNG-судно п'ятого покоління, відповідає ключовим вимогам Міжнародної конвенції з запобігання забрудненню з суден (МАРПОЛ 73/78), що регламентує запобігання забрудненню морського середовища з суден в п'яти основних розділах.

Розділ I – Забруднення нафтою

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Судно оснащено двокорпусною конструкцією, що знижує ризик витоку нафтопродуктів у випадку пошкодження.
- Встановлено маслосбиральне та роздільне обладнання (bilge water separator) відповідно до MARPOL.
- Паливні системи ізоляовані, розташовані поза межами танків вантажу.

Розділ II – Забруднення шкідливими речовинами в наливному стані

- Не застосовується напряму до LNG, однак судно відповідає конструктивним вимогам до небезпечних вантажів відповідно до IGF Code.

Розділ III – Забруднення стічними водами

- Встановлено санітарну систему очищення стоків, яка сертифікована відповідно до MARPOL і дозволяє зливання лише в дозволених районах.

Розділ IV – Забруднення сміттям

- Судно має систему збирання та обробки сміття, обладнану контейнерами для роздільного збору відходів.
- Має Garbage Management Plan та Garbage Record Book, згідно з вимогами MARPOL.

Розділ V – Запобігання забрудненню повітря

- Судно відповідає суворим нормам по викидах NO_x і SO_x:
- Використання двопаливного двигуна WinGD XDF дозволяє працювати на природному газі (зниження CO₂, NO_x, повна відсутність SO_x).
- Встановлено SCR-систему (Selective Catalytic Reduction) для досягнення Tier III по NO_x.
- Відповідає вимогам щодо обмеження викидів парникових газів, зокрема за рахунок EEDI, що нижчий за нормативний ($4.59 < 4.892$).

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Оснащене системою очистки баластних вод (BWTS) від компанії Emerson — відповідно до Ballast Water Management Convention, яка є частиною MARPOL VI.

Вимоги Солас 74

Конвенція SOLAS 74 (International Convention for the Safety of Life at Sea) є основним міжнародним документом, що встановлює мінімальні стандарти безпеки для проектування, обладнання та експлуатації морських суден. LNG-танкер FLEX AURORA повністю відповідає вимогам SOLAS із урахуванням всіх оновлень та доповнень, включаючи положення щодо суден, які перевозять зріджений газ.

Глава II-1 — Конструкція, підрозділність та непотоплюваність

- FLEX AURORA має двокорпусну конструкцію з подвійним дном, що відповідає вимогам стійкості та непотоплюваності.
- Встановлена система водонепроникних перебірок та автоматичних дренажних клапанів.
- Враховано вимоги до повітронепроникних та вибухозахищених приміщень у зонах розміщення вантажних танків LNG.
- Клас судна дозволяє аварійне утримання плавучості при пошкодженні декількох відсіків.

Глава II-2 — Протипожежний захист

- Відповідає вимогам до спеціалізованих газових танкерів, включаючи:
 - Газовідвідні системи з полум'ягасниками
 - Протипожежні бар'єри між машинним відділенням і вантажною зоною
 - Автоматичні системи пожежогасіння, зокрема:
 - CO₂-система для машинного відділення
 - Водяні спринклерні установки
 - Піна для газонебезпечних зон
 - Теплові та димові датчики з центральною системою оповіщення
- Протипожежне спорядження:

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 34 пожежних костюми, згідно з SOLAS II-2/10
- 2 аварійні протипожежні насоси з незалежним джерелом живлення

Глава III — Рятувальні засоби

- 2 рятувальні шлюпки (по одному з кожного борту) з власним двигуном, місткістю не менше 70 осіб.
- 34 рятувальні плоти, що перевищує вимоги щодо кількості місць для евакуації екіпажу (31 особа).
- Давитна система спуску типу *David Launch System*, сертифікована згідно з LSA Code.
- Сигнальні засоби — піротехніка, рятувальні буї з автоматичними світильниками.
- Система GMDSS — повністю відповідає зоні морського району А3.

Глава IV — Радіозв'язок

- Встановлено сучасну GMDSS-станцію з покриттям морського району А3:
 - 2 супутникові термінали Inmarsat
 - 2 комплекти радіостанцій (S-Band, X-Band)
 - EPIRB та SART — аварійні маяки відповідно до стандартів SOLAS
 - Інтегрована система оповіщення у випадку небезпеки

Глава V — Безпека навігації

- Оснащене сучасною навігаційною системою:
 - ECDIS, AIS, ARPA, GPS, Gyrocompass
 - X-band та S-band радары, зокрема JMR-9225-6N
 - Система управління курсом та автопілотом
- Судновий журнал, карти, мануали ведуться у цифровому та друкованому вигляді.
- Повна відповідність вимогам до Bridge Alert Management System.

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Глава VI — Перевезення вантажу

- Відповідає спеціальним положенням щодо LNG-танкерів:
 - Транспорт газу в спеціалізованих мембранних танках типу GTT Mark III Flex
 - Система інертизації танків для зменшення ризику вибуху
 - Детектори витоку газу у вантажному відсіку
 - Встановлено систему запобігання перенавантаженню танків
- Експлуатація вантажу ведеться відповідно до вимог IGF Code, що затверджений SOLAS.

Глава XI-1 і XI-2 — Спеціальні заходи безпеки

- Оснащене AIS-контролем, доступом за картками до вантажної зони.
- Має систему Ship Security Alert System (SSAS) згідно з ISPS Code.
- Судно пройшло обов'язкову сертифікацію за системою безпеки управління (ISM Code).

1.2. Розробка заходів з модернізації пропульсивного комплексу судна.

На основі впровадження всіх вищезгаданих обмежень ІМО доречно застосувати технічні заходи (Energy Saving Devices) для модернізації пропульсивного комплексу судна, які гарантовано забезпечать підвищення ефективності модернізації судна та будуть сприяти досягненню цільових показників індикатора інтенсивності вуглецю.

У процесі модернізації судна Flex Aurora одним із ефективних технічних заходів є встановлення пристрою Wake Equalizing Duct (WED), що дає змогу підвищити гідродинамічну ефективність кормової частини корпусу та зменшити витрату палива. Wake Equalizing Duct являє собою кільцеподібну нерухому конструкцію, яка встановлюється перед гребним гвинтом і дозволяє вирівнювати профіль швидкості потоку води, що підходить до гвинта. Це зменшує турбулентність і покращує умови роботи гвинта, що в свою чергу дозволяє підвищити ККД пропульсивної системи.

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а)



б)

Рис 1.8 Повітроводи для вирівнювання хвильподібних коливань
(а) Зрівняльний канал, встановлений на кормі судна, (б) Асиметричний канал.

На судні Flex Aurora, обладнаному двопаливним головним двигуном потужністю близько 12 259 кВт, встановлення WED дозволяє зменшити витрату палива приблизно на 5–8 відсотків. Це еквівалентно економії 1,5–2,5 тонн зрідженого природного газу на добу, що в масштабах року може забезпечити зниження витрат пального на 500–900 тонн. Водночас, завдяки меншому споживанню палива, суттєво зменшуються викиди вуглекислого газу — приблизно на 1 500–2 800 тонн щорічно.

Додатковою перевагою встановлення Wake Equalizing Duct є його проста конструкція без рухомих частин, що забезпечує високу надійність і не потребує складного технічного обслуговування. Пристрій може бути встановлений під час планового докування судна, без необхідності суттєвого втручання в інші елементи корпусу або пропульсивного комплексу. Окупність такого рішення, залежно від вартості палива, зазвичай становить близько двох-трьох років, після чого впровадження починає приносити економічний ефект. Усі ці фактори роблять встановлення Wake Equalizing Duct доцільним і виправданим кроком у рамках модернізації судна Flex Aurora, особливо з огляду на сучасні вимоги щодо підвищення енергоефективності та зменшення екологічного впливу.

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Роторні вітрила

Розмір та кількість встановлених роторних вітрил визначаються розміром судна, доступним простором на палубі та профілем експлуатації.

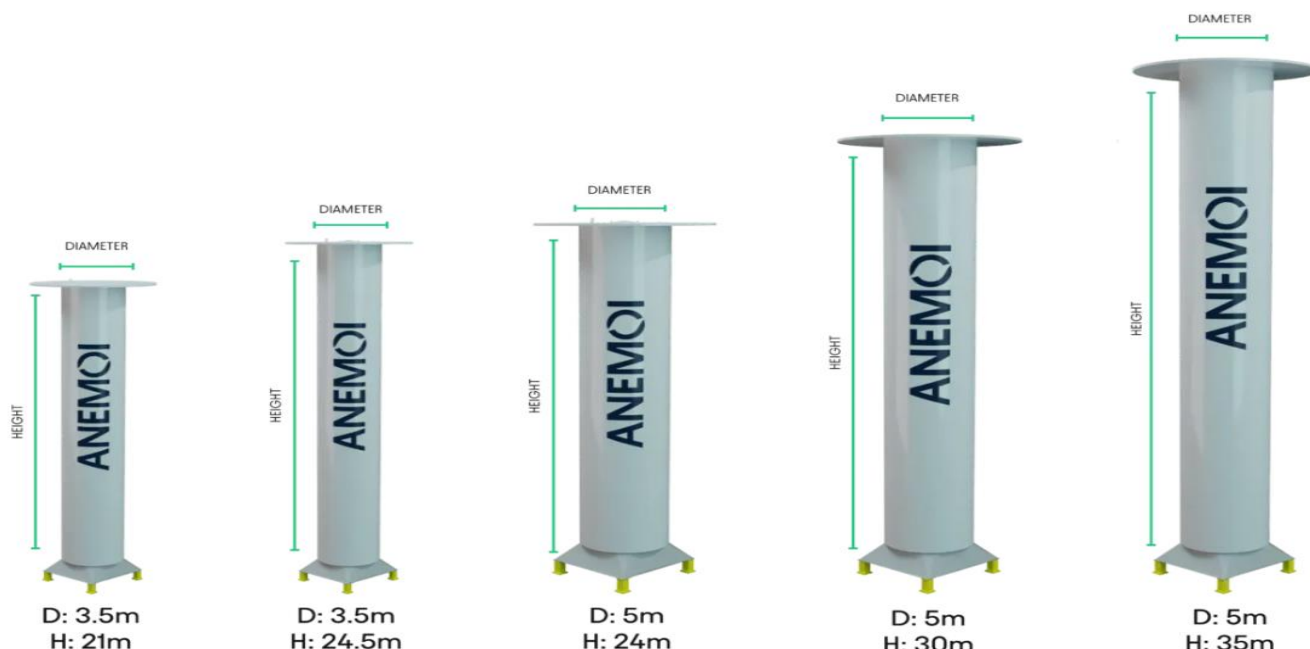


Рис 1.9 Розміри роторів

Системи розгортання

Компанія Anemoi розробила запатентовані системи, які дозволяють переміщувати або складати роторні вітрила на палубі. Можливість переміщувати або складати роторні вітрила на палубі за лічені хвилини усуває будь-який вплив на вантажні операції та зменшує занепокоєння щодо протягів повітря.

- Фіксована система

Стандартно, роторні вітрила встановлюються на фіксованій системі рис. 1.10(а). Це означає, що їхня основа закріплена на палубі, і роторні вітрила не можна легко перемістити. Система підходить для всіх типів суден, проте такий тип рекомендований для танкерів, поромів та ро-Ро, де технологія не заважатиме вантажним операціям, а осадка не враховується, або роторні вітрила розташовані нижче висоти існуючої осадки судна.

- Залізнична система

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для суден зі складнішими вантажними операціями, таких як балкери, рекомендована рейкова система. Як показано на рис. 1.10(б), ця система дозволяє переміщувати роторні вітрила вздовж (поздовж) або поперек (поперек) палуби, коли судно знаходиться в порту, гарантуючи, що операції завантаження та розвантаження вантажу не порушуються. Рейкова система легко керується двома членами екіпажу, і для зміни положення роторних вітрил потрібно лише 10 хвилин. Цю систему було успішно встановлено на двох суднах, включаючи переможця премії «Судно року» від Lloyd's List, т/х Afros.

- Система складання

Цей варіант рекомендується для суховантажів або будь-яких суден, що працюють на маршрутах з обмеженнями щодо осадки. Роторні вітрила рис 1.10(в) можна опускати з вертикального положення в горизонтальне за допомогою гідравлічної системи.



а)



б)



в)

Рис 1.10 Види роторних вітрил

а) - Фіксована система б) - Залізнична система в) - Система складання

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вона працює простим натисканням кнопки, і опускання або підняття займає менше 10 хвилин. Фірма Anemoi успішно встановила перше повномасштабне складне роторне вітрило на нашому випробувальному полігоні у Великій Британії у 2014 році.

Технічне обладнання та програмне забезпечення

Система роторного вітрила Anemoi складається з самого роторного вітрила, фундаменту, системи розгортання (за потреби), датчиків вітру та електричної та керуючої системи.

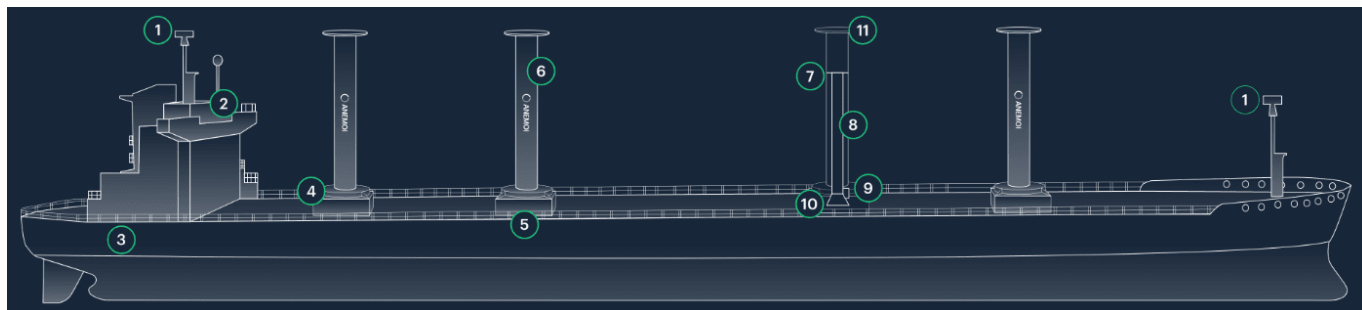


Рис 1.11 Розташування обладнання на схемі.

1. Датчик вітру 2. Система керування 3. Електронне обладнання 4. Система встановлення (на зображенні показано стаціонарну систему) 5. Фундаменти 6. Роторне вітрило 7. Верхній підшипник 8. Сталева вежа 9. Електропривід 10. Нижній підшипник 11. Композитний ротор

Матеріали

Як показано на схемі (рис. 1.11), основними компонентами роторних вітрил є «ротор» (циліндрична обертова частина), вежа, верхній та нижній підшипники, а також електричний привід. «Ротор» виготовлений з легкого композитного матеріалу, а вежа являє собою сталеву колонну конструкцію.

Ці матеріали використанні, щоб забезпечити максимальну продуктивність роторних вітрил та витримувати будь-які погодні умови. Вибір легких матеріалів також означає, що дедвейт наших систем зазвичай становить менше 0,1% від загальної ваги судна.

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

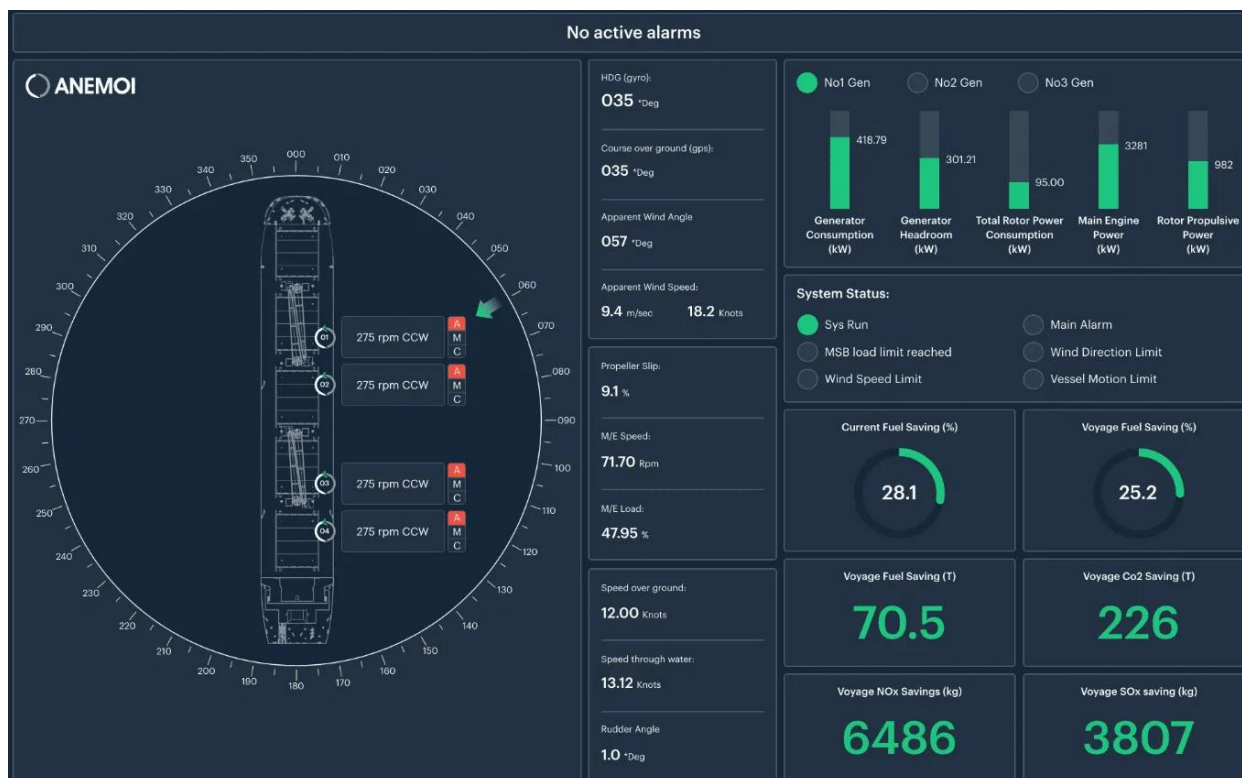


Рис 1.12 Електрична та система керування

Електрична та система керування

Роторні вітрила мають станцію керування, розташовану на містку. Вона автоматично контролює швидкість і напрямок руху роторних вітрил, а також контролює продуктивність і стан системи. Система керування розроблена для максимізації продуктивності та мінімізації втручання екіпажу завдяки автоматичному встановленню швидкості та напрямку, моніторингу обладнання та захисним вимиканням.

Потреба в електричній потужності роторних вітрил залежить від швидкості обертання ротора, яка залежить від швидкості вітру. Середня споживана потужність одного роторного вітрила зазвичай становить ~40% від номінальної потужності двигуна під час роботи. Наприклад, роторне вітрило з двигуном потужністю 75 кВт споживатиме в середньому 30 кВт.

Рекомендована конфігурація роторних вітрил для Flex Aurora:

Кількість роторів: 4

Розташування:

- 2 ротори перед надбудовою (по обидва боки судна)

									Арк.
									30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КР.ОП135.6211м.04.ПЗ				

- 2 ротори за надбудовою (ближче до середини судна), між вантажними танками

Розміри:

- **Діаметр:** ~5 м
- **Висота:** ~30 м

Привод: електродвигун 200–250 кВт на кожен ротор

Таким чином Flex Aurora матиме 4 великих роторних вітрил, що дозволяє досягти значної економії палива та зменшити викиди парникових газів до 15–18% у сприятливих умовах. Це особливо актуально при експлуатації судна в зонах з постійними вітрами (наприклад, Атлантика, Північне море). Така модернізація також відповідає вимогам MARPOL VI та стратегії ІМО щодо зменшення парникових викидів.

2. Модернізація пропульсивного комплексу судна.

2.1. Розробка заходів з модернізації пропульсивного комплексу судна.

Встановлення роторних вітрил (типу Flettner Rotor) та пристрою Wake Equalizing Duct (WED) дозволяє зменшити необхідну потужність головного двигуна, оскільки обидві системи знижують опір руху судна або частково забезпечують тягу (тягове зусилля).

Оцінка ефекту виглядає так:

Орієнтовне зниження потужності ГД для Flex Aurora:

1. Роторні вітрила (4 шт.)

При відповідних вітрових умовах (попутно-боковий вітер) можуть забезпечити до 10–12% тяги, що еквівалентно зниженню потужності двигуна на 8–10%.

Для двигуна 12 259 кВт це $\approx$ 980–1 225 кВт економії.

2. Wake Equalizing Duct (WED)

Зменшує гідродинамічний опір за рахунок вирівнювання потоку перед гвинтом.

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дає змогу знизити витрати потужності ще на 5–7%, тобто $\approx 610\text{--}860$ кВт.

Загальне потенційне зниження:

Комбінований ефект від обох систем може забезпечити зменшення необхідної потужності головного двигуна на 13–17%. У цифрах це:

$\approx 1\,590\text{--}2\,085$ кВт менше навантаження на ГД.

Нове ефективне навантаження на двигун: приблизно $10\,200\text{--}10\,700$ кВт.

Відповідно, знижується й витрата палива на таку саму пропорцію ($\approx 177,6$ г/кВт·год $\rightarrow$ зниження $\approx 280\text{--}370$ кг пального на годину).

Виходячи з вище проведених розрахунків, найбільш доцільних напрямів модернізації енергетичної установки концерну суден *Flex Aurora* — це встановлення валогенератора (shaft generator).

Такий підхід дозволяє досягти балансу між технічною доцільністю, економічною ефективністю, відповідністю міжнародним екологічним нормам та мінімізацією втручання в існуючу конструкцію судна.



Рис. 2.1 Загальний вигляд розташування валогенератора

Валогенератор — це пристрій, що дозволяє генерувати електроенергію за рахунок обертання головного двигуна та переданої енергії через головний вал. Таким чином, частина кінетичної енергії, яка і без того використовується для просування судна, перетворюється в електричну без необхідності запуску додаткових дизель-генераторів. У світлі впровадження на судно допоміжних енергоефективних систем, таких як роторні вітрила та пристрій Wake

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Equalizing Duct (WED), встановлення валогенератора надає широкі можливості для оптимізації загальної енергетичної структури судна.

Перш за все, варто розглянути загальний енергетичний баланс судна. Головний двигун типу W5X72DF, встановлений на базовому судні Flex Aurora, має потужність 12 259 кВт. У разі застосування роторних вітрил та системи WED фактична потреба в тяговій потужності може зменшитись на 15–20%. Це означає, що двигун буде мати певний надлишок потужності, який можна ефективно використати для генерації електроенергії. Такий підхід дозволяє оптимізувати споживання пального, оскільки замість запуску дизель-генераторів для живлення електроспоживачів судна, енергія буде надходити від валогенератора, що підвищить загальний ККД системи.

З економічної точки зору, валогенератор дозволяє значно зменшити експлуатаційні витрати. Основною статтею витрат сучасного судна є витрати на пальне. Допоміжні дизель-генератори споживають значну кількість пального, працюючи практично безперервно для забезпечення потреб у живленні систем життєзабезпечення, навігації, зв'язку, кондиціонування повітря, вантажно-розвантажувальних механізмів та інших критичних систем. Якщо електроенергію буде генерувати валогенератор, дизель-генератори зможуть працювати в оптимізованому режимі або навіть бути тимчасово виведеними з експлуатації під час морського переходу. Це не лише зменшує витрати на пальне, а й подовжує термін служби допоміжних двигунів, зменшує навантаження на системи охолодження та змащування, а також скорочує обсяги планового технічного обслуговування.

У контексті відповідності судна сучасним екологічним вимогам встановлення валогенератора дозволяє суттєво покращити екологічні характеристики без повної заміни головної енергетичної установки. На відміну від варіанту заміни головного двигуна на менш потужний, що вимагає значного втручання в конструкцію судна, переконструкції машинного відділення, фундаменту, узгодження з гребним валом та повторної сертифікації, встановлення валогенератора є порівняно маловитратним і

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

технічно простішим заходом. Він не потребує зміни центру ваги судна, не змінює потужність, що передається на гребний гвинт, і при цьому забезпечує необхідну енергію для всіх суднових систем.

Крім того, встановлення валогенератора є потужним аргументом для підвищення енергоефективності згідно з нормативами Міжнародної морської організації. Це сприяє досягненню цілей за EEDI та SEEMP. Системи контролю та управління енергоспоживанням, що входять до складу валогенераторної установки, дозволяють вести облік спожитої та зекономленої енергії в режимі реального часу. Це дає можливість судовласнику не лише виконувати екологічні зобов'язання, а й ефективно керувати ресурсами, адаптуючи енергетичну стратегію до поточних умов навігації, завантаження судна, погодних умов та швидкості.

У майбутньому наявність валогенератора створює основу для подальшої інтеграції з гібридними енергетичними системами. Наприклад, генерація електроенергії на ходу може поєднуватись із системами зберігання енергії — літій-іонними батареями або суперконденсаторами. У портових умовах або під час маневрування такі системи можуть забезпечувати електроживлення без запуску додаткових ДГ, зменшуючи шум, викиди та експлуатаційне навантаження. Така гнучкість — це ще один вагомий аргумент на користь впровадження валогенератора.

Таким чином, встановлення валогенератора на систершип судна Flex Aurora — це найоптимальніше технічне, економічне та екологічне рішення. Воно дозволяє ефективно використати надлишкову потужність головного двигуна, зменшити експлуатаційні витрати, покращити показники енергоефективності, підвищити рівень екологічної безпеки та створити основу для подальшої модернізації енергетичної системи судна. Це рішення забезпечує гнучкість в експлуатації, знижує залежність від традиційних джерел живлення і водночас не потребує радикального втручання в існуючу архітектуру судна.

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

2.2. Вибір та обґрунтування типу ГД, розгляд альтернативних варіантів комплектації.

У сучасному морському транспорті все більше уваги приділяється впровадженню енергоефективних та екологічно чистих технологій. Однією з найбільш перспективних інновацій у цій сфері є гібридна суднова енергетична установка (ГСЕУ), яка поєднує традиційні теплові двигуни з електричними джерелами живлення, акумуляторами, електрохімічними генераторами або відновлюваними джерелами енергії. Основна мета таких установок полягає в оптимізації споживання пального, зниженні експлуатаційних витрат і зменшенні шкідливих викидів в атмосферу.

Розробка та інтеграція гібридної енергетичної системи на прикладі систершипа судна Flex Auriga дозволяє на практиці реалізувати низку переваг, пов'язаних із новітніми технологіями перетворення та керування енергією.

З урахуванням потужності, структури та призначення судна Flex Auriga, одним із найоптимальніших рішень у контексті розробки гібридної ГСЕУ є впровадження валогенератора як основного елемента системи електропостачання.

Такий підхід дозволяє інтегрувати гібридні функції без кардинальної реконструкції суднової архітектури або заміни головної енергетичної установки. Головний двигун W5X72DF, встановлений на базовому судні, забезпечує потужність у 12 259 кВт, що дозволяє ефективно передавати надлишкову механічну енергію на генератор, особливо в умовах, коли судно обладнане допоміжними системами для зменшення опору — зокрема, роторними вітрилами та пристроєм Wake Equalizing Duct (WED).

Роль валогенератора у складі гібридної системи є визначальною, оскільки він забезпечує генерацію електроенергії прямо від головного двигуна в морському режимі ходу судна. Така електроенергія може повністю або частково замінити продукцію дизель-генераторів, особливо в періоди стабільного руху з постійною швидкістю. Це дозволяє зменшити витрати пального на допоміжні силові агрегати, підвищити загальний коефіцієнт

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

корисної дії установки та знизити кількість викидів CO₂, NO_x, SO_x та інших забруднювачів. Крім того, завдяки зменшенню годин напрацювання дизель-генераторів, скорочуються витрати на технічне обслуговування та ремонти, що в довготривалій перспективі дає вагомий економічний ефект.

З технічної точки зору впровадження валогенератора на судно має низку переваг. Він встановлюється на головному валу або через редуктор і забезпечує генерацію змінного струму з синхронізацією до частоти обертання головного двигуна. Через інвертор і стабілізатори електроенергія подається на головну електромережу судна. При потребі, з використанням накопичувачів енергії, система може накопичувати надлишки електроенергії та використовувати їх у пікові періоди, або ж у зонах обмежених викидів, де застосування ДГ є небажаним або забороненим.

Порівняно з альтернативним варіантом — встановленням менш потужного головного двигуна — інтеграція валогенератора не потребує зміни масо-габаритних характеристик основної енергетичної установки. Зменшення потужності ГД могло б вплинути на швидкісні характеристики судна, маневровість, або порушити баланс між енергопостачанням і навантаженням у разі зміни умов плавання. Крім того, будь-яка заміна головного двигуна потребує тривалих та затратних сертифікаційних процедур, тоді як встановлення валогенератора дозволяє досягти покращення енергоефективності при мінімальному технічному втручанні.

У перспективі, гібридна енергетична система на базі валогенератора може бути розширена шляхом інтеграції літій-іонних акумуляторних батарей, суперконденсаторів, а також берегової системи живлення. Це дозволяє реалізувати так звані режими «Cold Ironing» у порту — повне відключення судових дизельних двигунів і живлення систем від наземної мережі.

Акумуляторні батареї можуть заряджатися як від валогенератора, так і під час стоянки в порту, а потім використовуватися під час маневрування або в екологічно чутливих регіонах. У таких випадках судно може навіть перейти до режиму повністю безвикидної експлуатації на обмеженій ділянці

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

маршруту, що дозволяє відповідати найсуворішим вимогам MARPOL Розділ VI.

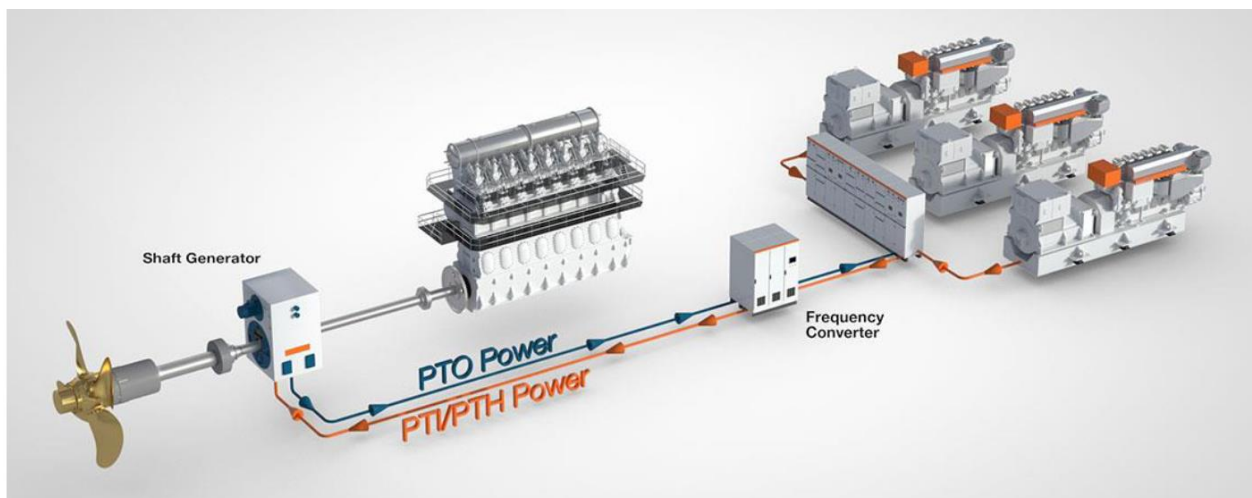


Рис. 2.2 Схема гібридної СЕУ з МОД

Таким чином, розробка гібридної енергетичної установки з використанням валогенератора є технічно виправданим і стратегічно вигідним кроком у напрямку декарбонізації морського транспорту. Такий підхід дозволяє досягти відчутного зниження експлуатаційних витрат без шкоди для продуктивності судна, адаптувати судно до новітніх екологічних регламентів та забезпечити гнучкість в енергетичному управлінні. При правильному проєктуванні та впровадженні така система може стати базою для майбутнього переходу на повністю електричне або водневе живлення, що відповідає глобальним тенденціям розвитку морських перевезень. У довгостроковій перспективі це рішення сприятиме як комерційному успіху судновласника, так і загальній трансформації морської галузі у напрямку сталого розвитку.

В оновленому проєкті судно оснащується гібридною енергетичною установкою, до складу якої входить головний двигун, валогенератор, батарейна секція, а також PMS (Power Management System), що автоматично розподіляє потужність між споживачами.

Основою схеми є гвинт фіксованого кроку, сумісний із валогенераторним живленням у крейсерському режимі

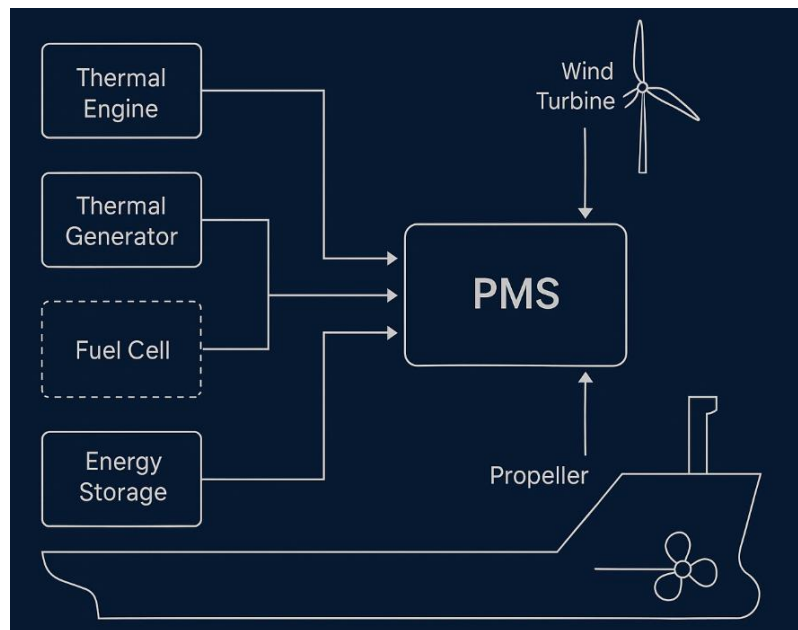


Рисунок 3.2 *Схема взаємодії елементів гібридної енергетичної установки з PMS.*

Обрана конфігурація дозволяє забезпечити ефективне використання стабільних обертів валу для генерації електроенергії з мінімальними втратами, зберігаючи при цьому простоту конструкції.

2.3. Вибір типу та схеми передачі потужності, вибір елементів суднової передачі, розрахунок елементів суднового валопроводу

Модернізація суднової енергетичної установки систершипа Flex Aurora, яка передбачає впровадження гібридної архітектури на основі валогенератора, зумовлює потребу у вдосконаленні елементів передачі потужності. Головною метою є оптимізація розподілу енергії між головним двигуном, рушієм та допоміжними системами електропостачання. В умовах класичної схеми потужність головного двигуна передається безпосередньо на гребний гвинт через традиційний валопровід. У випадку модернізації з установкою валогенератора, з'являється необхідність інтегрувати додатковий елемент у систему, який працює на тому ж валу, що і рушій, або через відбір потужності від валопроводу за допомогою редуктора.

Проектування схеми передачі потужності в такому випадку передбачає використання компоновки типу «main engine – shaft generator – propeller», де валогенератор може працювати як у генераторному, так і в моторному режимі при зворотному енергетичному потоці з акумуляторів. Таким чином, схема переходить із лінійної в гібридно-паралельну, забезпечуючи багатофункціональний енергетичний потік.

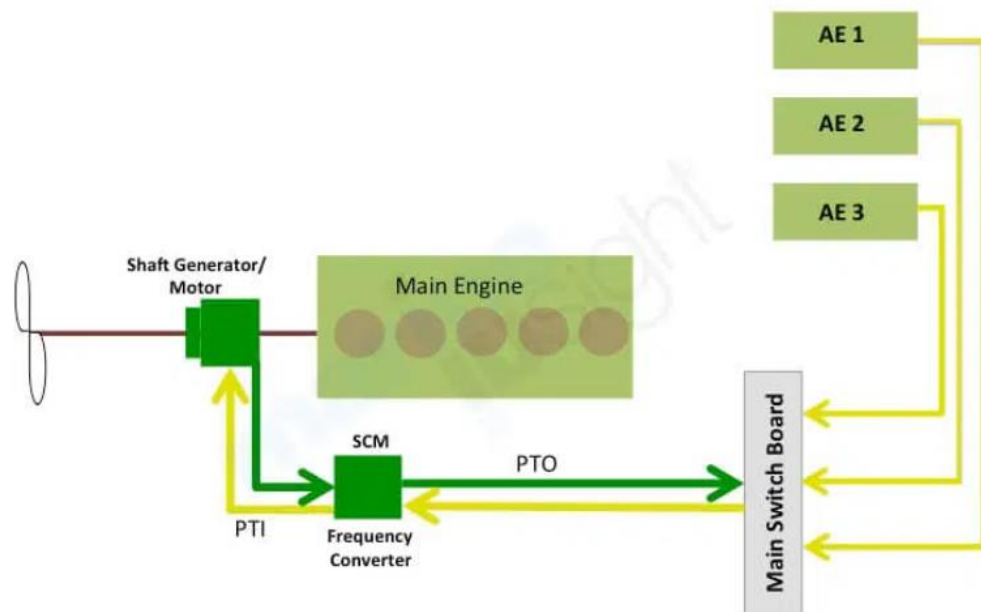


Рис. 2.3 Схема модернізованої передачі потужності із валогенератором

У загальному випадку, валогенератор встановлюється на проміжному валу між головним двигуном і гребним валом, або у зоні виходу редуктора, якщо використовується редукторна передача. Такий тип розміщення дозволяє уникнути втрат, пов'язаних із довжиною трансмісії та зменшує загальні механічні навантаження. У більшості випадків валогенератори типу РТО (Power Take-Off) комплектуються з перетворювачами частоти, які дозволяють стабілізувати частоту струму незалежно від режиму роботи головного двигуна. Це особливо важливо для змінних швидкостей обертання в морському режимі.

У разі використання гвинта фіксованого кроку (FPP), система залишається найбільш ефективною для контейнеровозів та газовозів типу Flex Auriga, де переважним режимом є тривале плавання з постійною швидкістю. У таких умовах валогенератор працює у найефективнішій зоні — постійний

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обертальний момент при відносно стабільних обертах валу. З іншого боку, при використанні гвинта змінного кроку (СРР), з'являється можливість більш гнучкого керування навантаженням, проте це ускладнює конструкцію редукторної частини. У рамках розглянутої модернізації доцільніше зберегти FPP, оскільки це відповідає простішій схемі передачі та меншому числу вузлів, що піддаються зносу.

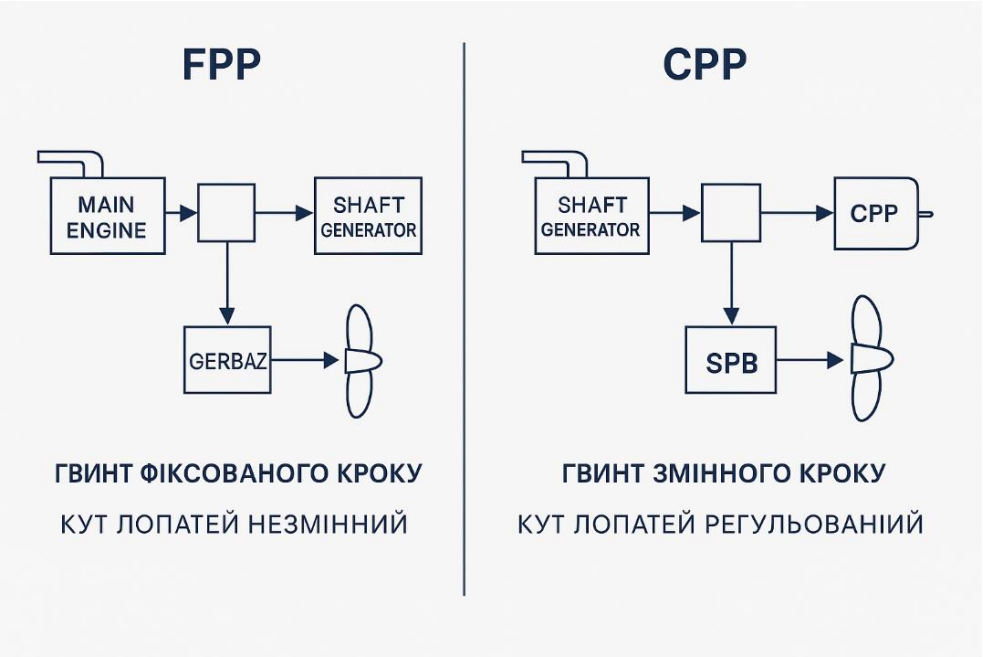


Рисунок 2.4 Порівняння схем FPP та CPP у контексті валогенераторного живлення

Конструкція валопроводу також потребує перегляду з урахуванням збільшення маси елементів та додаткових динамічних навантажень. Особливої уваги вимагає підбір проміжного вала, опорних підшипників та з'єднувальних муфт, які повинні витримувати нові моменти кручення, зумовлені роботою валогенератора. Розрахунок моменту кручення ведеться з урахуванням потужності генератора, яка, наприклад, може сягати 1–1,5 МВт — приблизно 10–12% від потужності ГД. Відповідно, діаметр проміжного вала має бути збільшено або обрано матеріали з більш високим модулем пружності та допустимим крутильним моментом

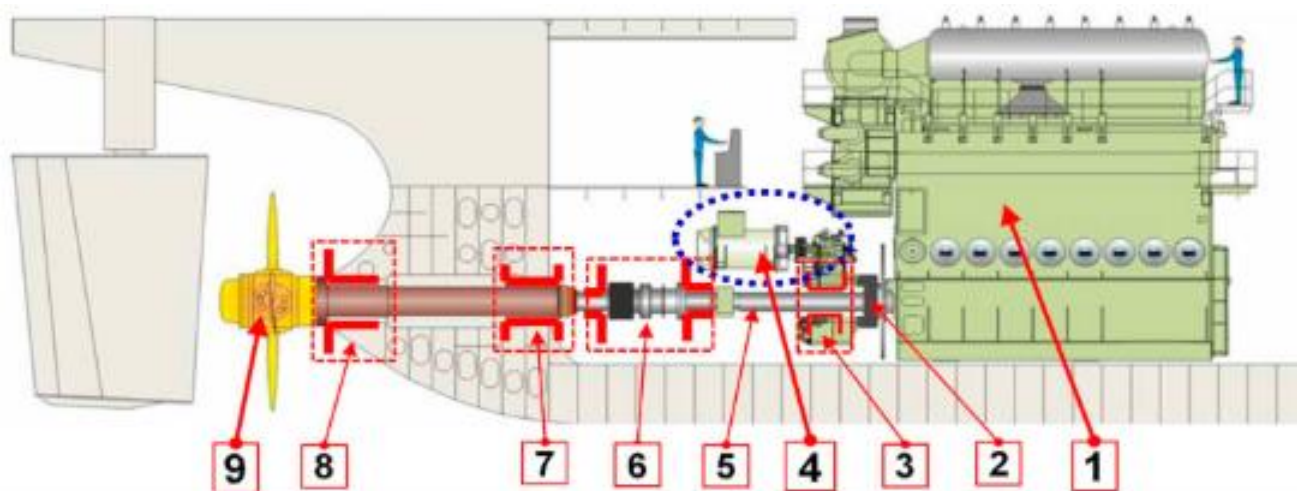


Рис 2.5 Приклад головної рушійної установки судна з валогенератором та системою ВОМ/ВВП: 1 — судновий тихохідний двотактний дизельний двигун — головний двигун (ГД); 2 — гідравлічна рознімна муфта; 3 — шестерня вал-генератора; 4 — вал-генератор (ВОМ/ВВП); 5 — проміжний вал; 6 — опорний підшипник проміжного валу; 7 — підшипник гвинтового вала; 8 — дейдвудна труба; 9 — гвинт фіксованого кроку

Окрему увагу слід приділити системі охолодження та вентиляції для валогенератора, адже під час роботи в режимі генерації або рекуперації тепловиділення є значним. У разі інтенсивної експлуатації система повинна мати або замкнутий контур охолодження з рідинним теплообмінником, або автономну морську систему з прямим відбором заборотної води.

Важливою умовою успішної інтеграції валогенератора в існуючу силову установку є синхронізація систем автоматичного керування, включно з PMS (Power Management System). Така система має забезпечувати плавне включення генератора у ланцюг електроживлення, відслідковувати навантаження та балансувати споживання між головним двигуном, допоміжними генераторами та акумуляторною батареєю. Наприклад, у разі короткочасного зростання навантаження, система автоматично може активувати дизель-генератор або перевести валогенератор у моторний режим, якщо це дозволяє рівень заряду батарей

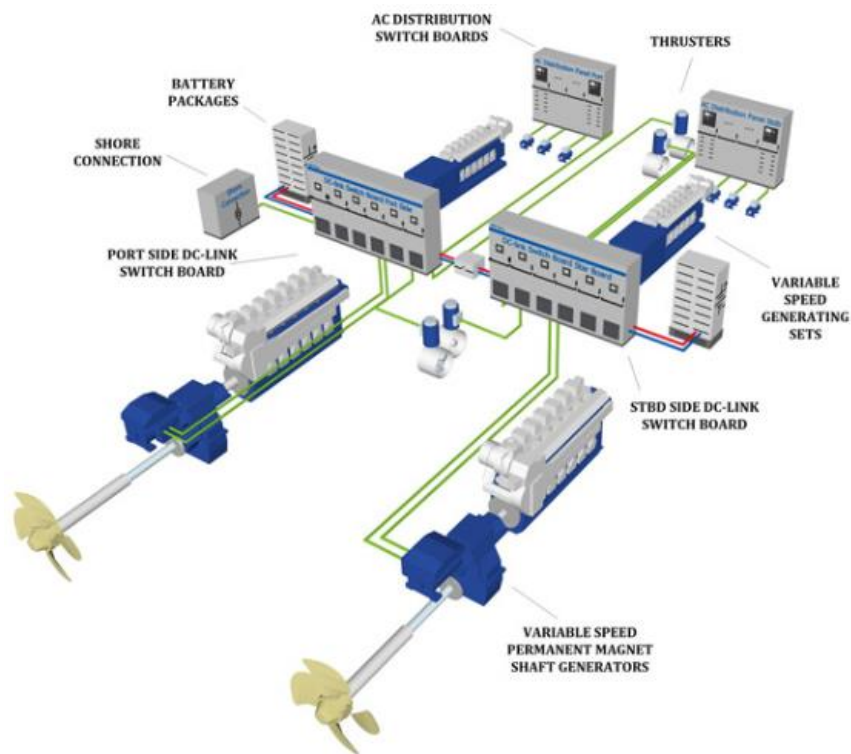


Рисунок 2.6 Схема взаємодії елементів гібридної енергетичної установки з PMS.

З огляду на перспективи використання вітроенергетичних систем (роторні вітрила) та пристроїв зниження гідродинамічного опору (WED), загальне навантаження на головну СЕУ може бути зменшене на 10–14%. Це створює додаткові резерви для встановлення валогенератора без перевантаження головного двигуна, адже частина потужності, яка раніше використовувалася для подолання опору води, тепер може бути перетворена у додаткову електроенергію або збережена в акумуляторній системі.

Порівняння з альтернативним варіантом — зменшенням потужності головного двигуна — свідчить, що зміна СЕУ призведе до необхідності заміни валопроводу, гвинта, балансу мас судна і глибоких структурних змін. Тоді як інтеграція валогенератора вимагає лише модифікації на рівні проміжного валу, підшипникових опор та енергосистеми.

Проектування елементів суднового валопроводу

Початковими даними для визначення діаметрів валів є:

- експлуатаційна потужність ГД, $P = N_e^{\text{ДЕМ}} = 12259 \text{ кВт}$;
- розрахункова частота обертання валів, $n = 69,5 \text{ хв}^{-1}$,

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Проміжний вал виготовлений з вуглецевої сталі, гребний вал – зі сталі категорії міцності КМ-25 ($\sigma_B = 480$ МПа), проміжний вал – КМ-23 ($\sigma_B = 440$ МПа). Найменший допустимий діаметр проміжного валу:

$$d_{\text{пр}} = F * \sqrt[3]{\frac{P}{n}} = 100 \sqrt[3]{\frac{12259}{69,5}} = 561 \text{ мм}$$

де F – коефіцієнт; для ДУ з прямою передачею потужності $F = 100$.

З урахуванням категорії льодового підсилення найменший допустимий діаметр проміжного валу:

$$d_{\text{пр}}^* = 1,08 * d_{\text{пр}} = 1,08 * 561 = 606 \text{ мм}$$

Мінімальний розрахунковий діаметр гребного валу:

$$d_{\text{гр}} = 100 * k * \sqrt[3]{\frac{P}{n}} = 100 * 1,22 * \sqrt[3]{\frac{12259}{69,5}} = 684 \text{ мм}$$

де $k = 1,22$ – коефіцієнт для безпечної роботи з гребним гвинтом.

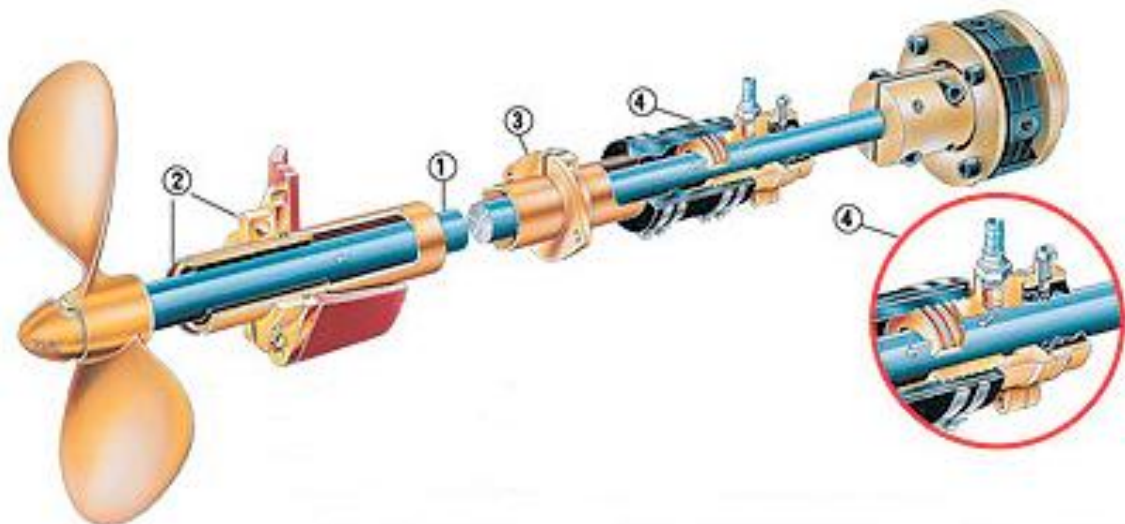
З урахуванням категорії льодового підсилення цей діаметр визначається як:

$$d_{\text{гр}}^* = 1,15 d_{\text{гр}} = 1,15 \cdot 684 = 787 \text{ мм.}$$

За результатами розрахунків прийняті такі значення діаметрів валів:

проміжних – 606 мм;

гребного – 787 мм.



Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КР.ОП135.6211м.04.ПЗ

Арк.

43

Рис.2.7 Судновий валопровід. 1 - дейдвудна труба; 2- зовнішній фланець; 3- внутрішній фланець; 4- внутрішній підшипник з подвійним сальником та подачею води.

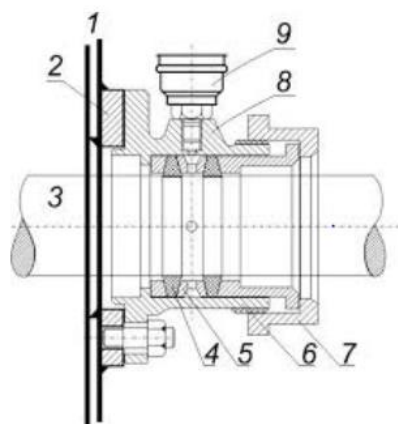


Рис.2.8 Перебірний сальник

1 - переборка; 2 - наварити; 3 - вал; 4 - сальникове набивання; 5 - бронзове кільце; 6 - натискна втулка; 7 - натискне кільце; 8 - корпус; 9 - маслянка.



Рис.2.9 Еластичні муфти

Муфта спеціально сконструйована для оптимального гасіння вібрації. Вібрація від крутильних коливань, що виникає через нерівномірність роботи двигуна, особливо на низьких обертах, усувається ефективно завдяки гнучкій гумовій вставці. Цей попередньо підібраний гумовий елемент гарантує низький шум, відсутність люфту та вібрації при передачі крутного моменту від двигуна гребному гвинту. Іншими словами – це відповідь на похибку комфортного перебування на борту судна.

Пряма передача:

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Даний тип передачі не забезпечує трансформацію крутного моменту і частоти обертання ГД, а також не дозволяє пристосувати ГЕУ до мінливих умов плавання (в разі застосування ВФШ). Ці особливості зумовлюють недоліки СДУ з прямою передачею:

- відхилення частоти обертання ГД від оптимальної для гвинта знижує пропульсивний ККД $\eta_{пр}$; так, на великотоннажних судах з прямою передачею частота обертання МОД може на 20 ... 30 хв-1 перевищувати оптимальне значення частоти обертання гвинта ($n_{гд} = 105 \dots 110$ при $n_{орт} = 80 \dots 85$ хв-1), що знижує $\eta_{пр}$ на 5 ... 8%;
- при використанні МОД ГЕУ з прямою передачею мають місце несприятливі малогабаритні показники;
- складність приводу допоміжних механізмів - валогенератора, насосів та ін. Від ГД.

Перевагою ГЕУ з прямою передачею є:

- конструктивна простота і висока надійність передачі;
- високий ККД передачі (0,98 ... 0,99), що частково компенсує можливе зниження пропульсивного ККД;
- можливість роботи ГД на високов'язких сортах палива;
- невелика витрата масла ГД;
- великий ресурс ГД.

До складу прямої передачі входять муфти, підшипники і валопровід. За конструктивним виконанням муфти можуть бути жорсткими і пружними. За призначенням розрізняють наступні муфти: з'єднувальні, сполучно-роз'єднувальні, вмикати і вимикати під час роботи і на стоянці; комбіновані, що мають пружні з'єднувальні елементи і сполучно-роз'єднувальний ланка.

Потужні крейцкопфні дизелі зазвичай з'єднуються з валопроводи за допомогою жорстких фланцевих муфт. Установка пружних муфт в прямих передачах визначається наступними причинами - це:

- з'єднання валопроводу з ГД, встановленим на амортизаторах;

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- зменшення навантажень на елементи валопроводу і колінчастий вал при деформаціях корпусу судна;
- полегшення центрівці двигуна і валопроводу;
- часткове демпфірування крутильних коливань.

Розділ 3. Проектування допоміжної ЕУ.

3.1. Аналіз головних споживачів теплової та електричної енергії на судні. Вибір схем вироблення електричної та теплової енергії.

У сучасних суднових енергетичних установках (СЕУ) питання ефективного використання відпрацьованої теплоти (скидної теплоти) є одним із ключових у контексті енергоощадності, зниження експлуатаційних витрат та екологічної безпеки. Особливо актуальним стає застосування систем утилізації теплоти (WHRS — Waste Heat Recovery Systems), які дозволяють перетворювати частину втрат енергії в корисну теплову або електричну енергію для покриття потреб судна.

Судно-прототип у базовій конфігурації обладнане дизельною головною установкою (ГД) із фіксованим гвинтом (FPP) та допоміжними дизель-генераторами. У системі передбачено утилізаційний котел на основі енергії вихлопних газів (Exhaust Gas Boiler), що забезпечує підігрів води та живлення парової системи.

Також у складі загальносуднових систем використано рекуперативні теплообмінники для підігріву палива і технічних рідин, а в системі опалення — термоолійний контур, що працює з негазоподібними теплоносіями. Завдяки цьому можливо скоротити довжину паропроводів і підвищити безпеку.

Зазвичай цей елемент WHR виконується у вигляді теплообмінника високого тиску для води/пари, розміщеного над холодильником наддувного повітря (scavenge air cooler), див. рис. 3.1.

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

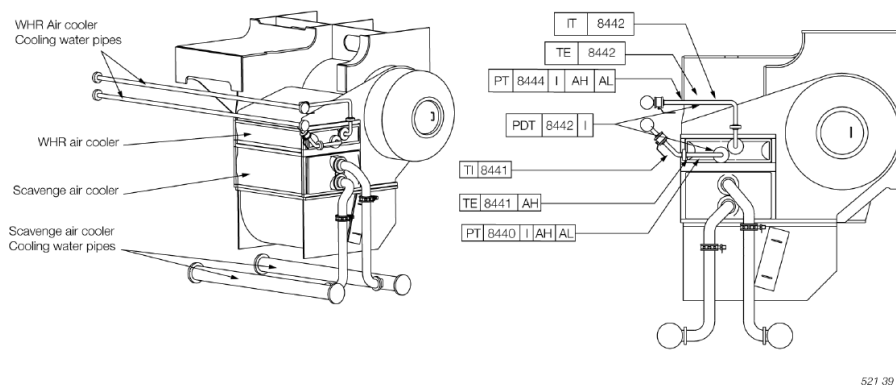


Рис. 3.1 WHR елемент на охолоджувачі повітря продувки

За роботи двигуна через елемент WHR має постійно проходити повний потік води. Це слід враховувати під час проєктування системи живильної води для пари (система, що подає теплоносій до елемента WHR).

Теплова енергія від головного двигуна, генераторів, паливних комірок та допоміжного обладнання може бути утилізована через систему WHRS. Для її реалізації оцінюється потенціал кожного джерела:

- Головний двигун (Дизель): вихлопні гази температурою $\sim 320\text{--}380\text{ }^{\circ}\text{C}$, витрата повітря — до 40 кг/с , високий потенціал для рекуперації.
- Допоміжні дизель-генератори: теплова енергія охолоджувальної рідини ($\sim 85\text{--}90\text{ }^{\circ}\text{C}$) та вихлопів.
- Паливні комірки (у проєктах з SOFC): викиди температурою $>600\text{ }^{\circ}\text{C}$ — дають змогу підігрівати технологічні теплоносії без використання додаткового палива.

Вплив модернізації на теплові викиди

Модернізація СЕУ впливає на якісні та кількісні параметри теплоти:

Параметр	До модернізації	Після модернізації
Температура вихлопів, $^{\circ}\text{C}$	$\sim 330\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\sim 380\text{ }^{\circ}\text{C}$ (через збільшення навантаження)
Об'єм викидів, $\text{м}^3/\text{год}$	~ 1400	~ 1800

Параметр	До модернізації	Після модернізації
Тиск у вихлопному тракті, бар	~0.4	~0.5
Наявність домішок	SO _x , NO _x , сажа	Зменшення при переході на паливні комірки чи LNG

Це дозволяє розширити можливості вторинного використання енергії через рекуперацію високотемпературного тепла для промислових або побутових систем.

Основні споживачі теплової енергії

На судні можна виділити вісім ключових груп споживачів теплової енергії, які використовують утилізоване або генероване тепло:

Таблиця 3.1.

№	Система	Темп., °C	Тиск, бар	Примітки
1	Опалення приміщень (Accommodation)	60–80	2–3	Теплоносій повинен бути чистим
2	Гаряче водопостачання (DHW)	50–60	2–3	Санітарні норми
3	Підігрів палива та мастил	90–120	3–6	Для НФО — висока в'язкість
4	Підігрів вантажу (Cargo Heating)	60–90	2–5	Залежить від вантажу
5	HVAC системи	40–60	2–3	Потребує рекуперації
6	Парові системи (Exhaust & Auxiliary Boilers)	100–160	4–7	Для живлення технологічних ліній
7	Підігрів охолоджувальних рідин	60–90	2–6	Перед запуском двигуна
8	Паливні комірки (SOFC/PEMFC)	80–600+	Змінний	Потенціал рекуперації високий

3.2. Розроблення та розрахунок теплової схеми та схеми утилізації скидної теплоти.

Розроблення та розрахунок теплової схеми та схеми утилізації скидної теплоти є ключовим етапом модернізації суднової енергетичної установки (СЕУ), особливо з урахуванням переходу до гібридних або комбінованих схем живлення. Враховуючи, що основна модернізація полягає в заміні головного двигуна (ГД), при цьому не очікується значного приросту електричних споживачів, структура споживання електричної енергії загалом залишається сталою. Водночас інтеграція нових технологій, таких як валогенератори, турбогенератори та системи утилізації теплової енергії, істотно змінює характер виробництва та розподілу енергії, що повинно бути відображено у відповідній тепловій схемі

У складі модернізованої СЕУ передбачається використання гібридної схеми, що включає головний двигун (наприкладі дизельного типу), з'єднаний з гребним валом через редуктор, до якого приєднано валогенератор. Це дозволяє ефективно використовувати надлишкову механічну енергію в умовах, коли основна пропульсивна потужність не вимагається на повну (наприклад, під час крейсерських режимів). Така конфігурація забезпечує одночасне виробництво електроенергії без увімкнення допоміжних дизель-генераторів, що сприяє скороченню витрат пального і зменшенню викидів CO₂.

Найбільший потенціал енергозбереження досягається при використанні тепла відпрацьованих газів ГД. Аналізуючи характеристики вихлопу, можна визначити, що при роботі дизельного двигуна з ККД близько 40–45%, понад 50% енергії втрачається з вихлопними газами і охолоджувальними рідинами. Система утилізації скидної теплоти (WHRS) включає в себе теплообмінники, рекуперативні котли (Exhaust Gas Boilers), утилізаційні парогенератори, а також, за необхідності, парову турбіну з електрогенератором. Це дозволяє виробляти додаткову електричну або теплову енергію без прямого споживання палива.

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

На базі отриманих даних було побудовано теплову схему СЕУ, що включає всі основні потоки енергії, перетворення та використання утилізованого тепла.

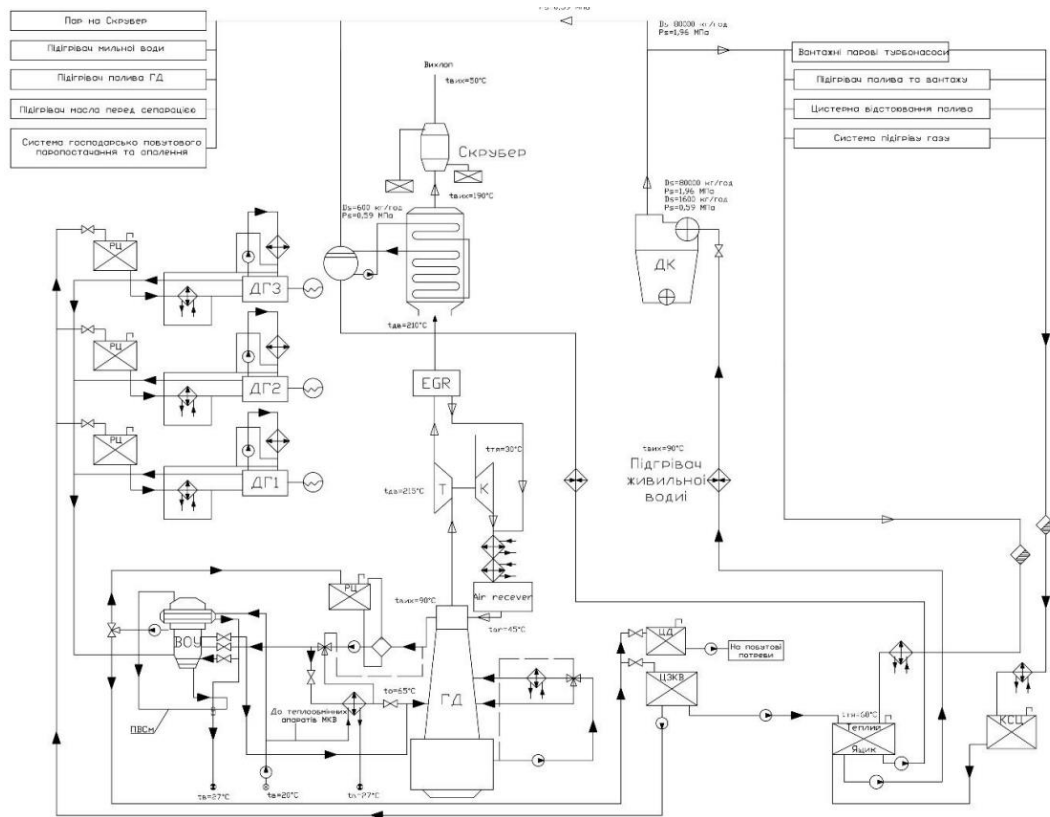


Рисунок 3.3 — Теплова схема СЕУ із WHRS.

У схемі чітко простежується перетік енергії від ГД через вихлопну систему в утилізаційний котел, де генерується пара для обслуговування допоміжних систем судна або для приводу паротурбінного генератора.

Кількісний аналіз теплових потоків дозволяє оцінити потенціал утилізації. Наприклад, для головного дизеля потужністю 10 МВт, при 40% ККД можна очікувати до 6 МВт теплових втрат, з яких орієнтовно 3,5–4 МВт — у вигляді енергії вихлопних газів з температурою близько 300–400 °С. У разі ефективного використання цього ресурсу можна згенерувати до 1,2–1,5 МВт електроенергії з використанням паротурбінного генератора або близько 2 МВт теплової енергії для потреб опалення, підігріву палива, гарячого водопостачання та інших споживачів.

Наведена нижче таблиця демонструє узагальнені показники споживання теплової енергії типових систем на борту судна:

Система споживання	Температура, °C	Тиск, бар	Середній витік, кВт
Опалення приміщень (Hotel Load)	60–80	2–3	150–300
Гаряче водопостачання (DHW)	50–60	2	100–200
Підігрів палива (HFO)	110–130	3–6	250–400
Вантажні системи (нафтопродукти)	70–90	4–7	200–350
Системи охолодження двигунів	60–90	2–6	150–250
Парогенерація (Exhaust Gas Boiler)	>100	4–7	500–800

Визначаючи доцільність використання теплової енергії в кожній із систем, враховуються не лише потреби в енергії, а й якість теплового носія, що утилізується. Наприклад, у системах рекуперації з використанням термоолії можна забезпечити циркуляцію без утворення пари, що зменшує навантаження на систему трубопроводів і дозволяє встановлювати теплообмінники ближче до споживачів. У той самий час, використання пари з котлів потребує ретельної фільтрації, сепарації вологи та контролю за якістю пари, особливо у випадку живлення технологічного обладнання або HVAC-систем.

В контексті гібридної установки також реалізується система з паливними комірками, які продукують не лише електричну, а й теплову енергію. Наприклад, PEM Fuel Cell при температурі 80 °C дозволяє напряму використовувати тепло у системах гарячого водопостачання або для попереднього підігріву паливних сумішей. У разі використання SOFC,

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

температура робочого середовища сягає понад 600 °С, що відкриває потенціал для високотемпературної утилізації, але потребує специфічних теплообмінників із корозійно-стійких сплавів.

Таким чином, сучасна теплова схема судна із гібридною CEY і WHRS дозволяє суттєво знизити питомі витрати палива, підвищити енергоефективність судна, забезпечити багаторівневу утилізацію тепла та адаптувати роботу під різні режими — від повного ходу до стоянки в порту. Правильний розрахунок теплового балансу, вибір ефективних теплообмінників і налаштування PMS (Power Management System) є запорукою ефективної та екологічно безпечної експлуатації такого судна у відповідності до сучасних вимог ІМО.

3.3. Розробка заходів з обмеження емісії GHG.

На газовозі Flex Aurora розробка заходів з обмеження емісії парникових газів (GHG), оксидів сірки (SO_x), азоту (NO_x) та інших забруднювальних речовин є ключовим елементом екологічної стратегії судна, оскільки відповідає вимогам MARPOL Додатком VI та прагненням до досягнення цілей ІМО щодо зниження викидів. Одним із головних технічних рішень на борту є використання двопаливного головного двигуна типу WinGD W5X72DF, який працює як на традиційному морському паливі, так і на зрідженому природному газі (LNG). Перехід на LNG дозволяє суттєво знизити викиди CO₂, практично повністю усунути SO_x, а також зменшити NO_x до рівнів, що відповідають стандарту Tier III.

Крім основного двигуна, Flex Aurora оснащена системою утилізації теплоти відпрацьованих газів (WHRS), що не тільки підвищує загальний ККД енергетичної установки, але й зменшує обсяги палива, необхідного для забезпечення допоміжних потреб судна, тим самим знижуючи сумарні викиди. Також на судні передбачено систему селективної каталітичної нейтралізації (SCR) див. рис. 3.4 для зниження NO_x у вихлопних газах допоміжних дизелів, що дозволяє судну входити до контрольованих зон викидів (ECA).

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Система каталітичного нейтралізатора каталітичної нейтралізації (SCR) відновлює молекули оксиду азоту (NO_x) до молекулярного азоту та водяної пари. Для запуску хімічної реакції в каталітичному нейтралізаторі використовується відновлювальний агент на основі азоту, такий як аміак, який перетворює забруднюючі речовини на нешкідливі гази.

Принцип роботи системи SCR

Система SCR використовує водний розчин аміаку для перетворення токсичних оксидів азоту на нешкідливий газоподібний азот та водяну пару.

Процес можна підсумувати наступним чином:

1. Розчин сечовини та води впорскується у вихлопний потік.
2. У міру випаровування води сечовина перетворюється на аміак.
3. Аміак зв'язується з діоксидами азоту у вихлопних газах.
4. Каталітичний нейтралізатор зменшує токсичні компоненти у вихлопних газах до інертного газоподібного азоту та нешкідливої водяної пари.
5. Азот та водяна пара безпечно викидаються в атмосферу.

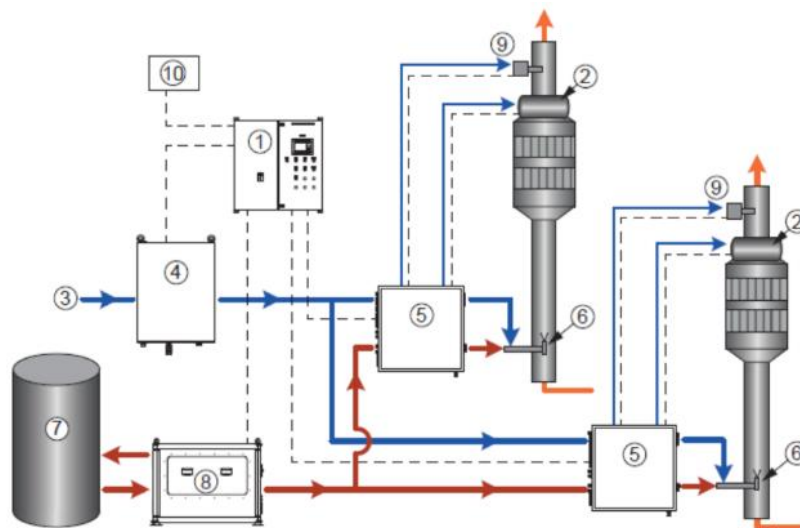


Рис 3.4 Система селективного каталітичного відновлення (SCR)

1 - Шафа керування; 2 - Продувка сажі; 3 - Подача стисненого повітря; 4 - Повітряний блок; 5 - Дозувальний блок; 6 – Інжектор; 7 - Резервуар для сечовини; 8 - Насосний блок; 9 - Датчик NO_x (опціонально); 10 - Датчик вологості.

Судно обладнане установкою очищення баластної води типу Alfa Laval PureBallast 3, що не тільки забезпечує біологічну безпеку при операціях з баластом, але й запобігає непрямому забрудненню довкілля. Для обробки сміття та осаду передбачено сучасний інсинератор, що працює відповідно до вимог ІМО і дозволяє спалювати відходи на борту без шкідливих викидів у повітря або воду.

PureBallast 3 очищує баластні води без використання хімікатів, поєднуючи високоефективну фільтрацію з покращеною УФ-обробкою. В УФ реакторі(ах) спеціально розроблені синтетичні кварцові лампи пропускають розширений спектр довжин хвиль, що забезпечує більше УФ-світла. Разом із внутрішньою конструкцією реактора це забезпечує оптимальне дозування УФ-випромінювання з дуже низьким споживанням енергії. Розширений діапазон розмірів реактора ще більше зменшує потреби в енергії в певних конфігураціях.



Рис 3.5 Система управління баластними водами Alfa Laval PureBallast 3

В якості допоміжного джерела енергії Flex Aurora також може використовувати акумуляторні батареї або берегове живлення в портах, що мінімізує шум і викиди під час стоянки. Враховуючи виклики майбутніх регуляторних змін, система управління енергетикою на судні включає Power Management System (PMS), яка оптимізує роботу генераторів і розподіл навантаження, забезпечуючи мінімальне споживання палива і відповідно мінімізацію викидів.

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, заходи з обмеження емісій на Flex Aurora реалізуються через поєднання технологій спалювання чистого палива, систем утилізації енергії, фільтрації та очищення, а також енергоефективного керування судновою енергетичною установкою, що відповідає сучасним екологічним стандартам і дозволяє зменшити вплив судна на навколишнє середовище.

3.4 Проектування енергетичних комплексів.

Проектування енергетичного комплексу (ЕК) судна типу LNG carrier, зокрема на прикладі *Flex Aurora*, є ключовим етапом у забезпеченні енергоефективності, надійності та екологічної безпеки всіх суднових систем. Енергетичний комплекс включає основні та допоміжні джерела енергії, системи розподілу електроенергії, утилізаційні установки, допоміжні агрегати, системи автоматизації та моніторингу.

Склад енергетичного комплексу судна

1. Головна енергетична установка (ГЕУ):
 - 2× WinGD W5X72DF двопаливні головні двигуни (СПГ/дизель).
 - Тип приводу: прямий до гребного вала.
 - Висока ефективність і відповідність екологічним стандартам (IMO Tier III).
2. Суднова електростанція (СЕС):
 - 4× дизель-генератори Wartsila: 2× 8L34DF 2× 6L34DF
3. Аварійний генератор: дизель-генератор типу Wärtsilä 6L34DF
4. Система утилізації тепла:
 - 2× котли на відпрацьованих газах (Exhaust Gas Boilers) Aalborg OS-TCI.
5. Допоміжне обладнання:
 - Опалювальні системи, насосні установки, компресори.
 - Опріснювальна установка — типу зворотного осмосу (Evac, Alfa Laval).

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

- Інсинератор відходів — TeamTec GAVE 600.
- Система очищення баластної води (BWTS) — Techcross Electro-Cleen або ECS-Nychlor.

6. Системи розподілу та керування:

- PMS (Power Management System) — централізоване управління енергопотоками.
- Автоматизована система керування двигунами і генераторами.
- Датчики моніторингу в реальному часі з інтерфейсами SCADA.

Допоміжний котел Aalborg OS-TCi

Вертикально-циліндричні газо-трубні парові котли Ольборг OS-TCi фірми "Альфа Лаваль Ольборг Індастріз". Попередня назва котлів MISSION™ OS-TCi.

Призначений для отримання пари, рідкопаливний котел Aalborg OS-TCi є вертикальним, попередньо зібраним котлоагрегатом. У цьому надійному, високопродуктивному котлі використовуються спіральні труби та зручний в експлуатації вбудований топковий пристрій, керування та контроль яким здійснюються системою Aalborg Control Touch (колишня назва MISSION Control Touch).

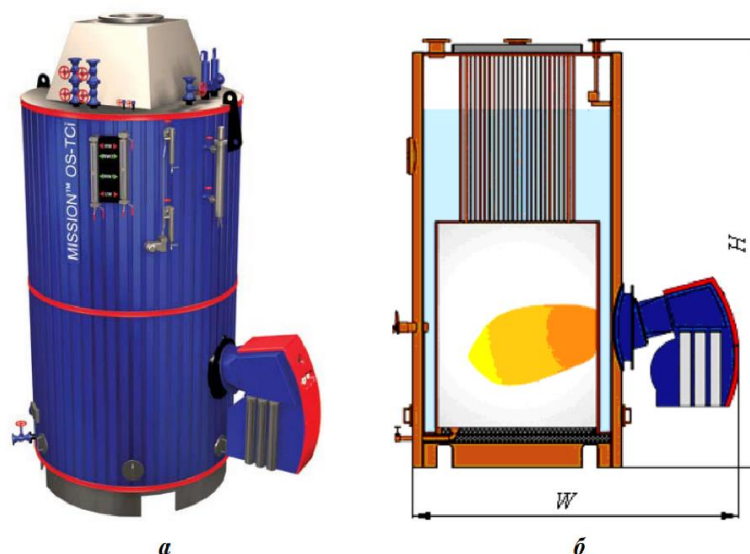


Рис. 3.6 Котел Ольборг OS-TCi:

а – загальний вигляд; б – вертикальний розріз

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливістю котлів Ольборг OS-TCi (O – oil fired, S – small steam capacity, TCi – turbo clean intelligent) є запровадження фірмою технології турбоочищення TCi, яка забезпечує ефективне самоочищення пучка труб від внутрішніх відкладень. Це дозволяє відмовитись від використання водообмивки для очищення КПП та зменшити витрати на обслуговування котлів. Також зменшується негативний вплив роботи котлів на оточуюче середовище, пов'язаний зі скиданням забрудненої обмивальної води до водного басейну.

Вибір теплової схеми котла Aalborg OS-TCi може бути обґрунтований наступним чином:

1. Гнучка паливна система: Котел Aalborg OS-TCi має гнучку конструкцію, яка дозволяє спалювати різні типи палива, включаючи вугілля, газ, нафту та біомасу. Це робить його варіантом з високою адаптивністю до різних ринкових умов та доступних джерел палива.

2. Висока ефективність: Котел Aalborg OS-TCi має ефективну теплову схему, яка забезпечує оптимальне використання теплової енергії та підвищує енергоефективність системи опалення. Це дозволяє зменшити енерговитрати та зберегти ресурси.

3. Висока надійність: Котел Aalborg OS-TCi виготовляється відповідно до високих стандартів якості і має довгий термін служби. Його теплова схема розроблена з урахуванням надійності та стійкості до зношування, що дозволяє забезпечити безперебійну роботу системи опалення.

4. Варіанти конфігурації: Котел Aalborg OS-TCi пропонує різні варіанти конфігурації теплової схеми, зокрема з одним або двома проходами, які можуть бути вибрані залежно від конкретних потреб та умов встановлення.

Теплова схема котла Aalborg OS-TCi забезпечує оптимальну теплообмінну поверхню, що забезпечує ефективне використання теплової енергії та забезпечує високий коефіцієнт корисної дії. Крім того, цей котел має низькі рівні емісії шкідливих речовин, що знижує вплив на навколишнє середовище.

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Опріснювальна установка Alfa Laval – JWP-26-C100

Принцип роботи: Комбінований ежектор розчину/повітря, що приводиться в дію ежекторним насосом, створює розрідження в системі, щоб знизити температуру випаровування живильної води. Живильна вода подається у випарну секцію через отвір і розподіляється в кожний другий канал пластини (канали випаровування).

Гаряча вода розподіляється по решті каналів, таким чином передаючи своє тепло живильній воді в каналах випаровування.

Досягнувши температури кипіння, яка є нижчою, ніж при атмосферному тиску, живильна вода частково випаровується, а суміш утвореної пари і розчинів потрапляє в посудину-сепаратор, де розчин відокремлюється від пари і виводиться за допомогою комбінованого повітряно-розчинного ежектора.

Пройшовши сепаратор, пара потрапляє в кожний другий пластинчастий канал конденсаторної секції.

Продуктивність ОУ визначимо в розрахунках виходячи з:

- Кількість команди 40
- Кількість прісної води на одного члена екіпажу 50 л/добу
- Сумарна необхідна мінімальна кількість води $40 \cdot 50 = 2\text{т/добу}$

Морська вода, що подається комбінованим водяним насосом охолодження/ежектора, розподіляється по решті каналів, поглинаючи таким чином тепло, що передається від конденсованої пари.

Вироблена прісна вода забирається насосом прісної води і подається в бак прісної води.



					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рис. 3.7 Загальний вигляд опріснювальної установки Alfa Laval – JWP-26-C100

Її основні завдання включають:

Забезпечення побутових потреб:

Прісна вода використовується для пиття, приготування їжі, миття посуду, прання, а також для умивальників і душових.

Поповнення технічних систем:

Опріснена вода використовується для поповнення втрат в замкнених системах охолодження двигунів, конденсато-живильних системах та системах продування парових котлів.

Забезпечення роботи спеціальних систем:

Вода використовується в системах сажобудування та інших технологічних і спеціальних системах, які потребують прісної води для нормального функціонування.

Зменшення залежності від запасів прісної води:

Опріснювальні установки дозволяють судну зменшити залежність від поповнення запасів прісної води в портах, що особливо важливо під час тривалих рейсів.

Покращення ефективності використання ресурсів:

Використання тепла охолоджувального контуру головного двигуна для роботи опріснювальної установки підвищує загальну енергоефективність судна, дозволяючи використовувати наявні ресурси більш раціонально.

Розділ 4. Проектування систем СЕУ.

4.1 Паливна система. Опис системи подачі палива до суднового дизельного двигуна

Паливна система двигуна призначена для надійного спалювання мазуту, а також дизельного палива. Слід, однак, промити дизельним паливом до обслуговування щоб уникнути утворення грудок в системі.

Паливна система складається з наступних частин:

					<i>КР.ОП135.6211м.04.ПЗ</i>	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Паливопроводи

Паливопроводи з'єднують елементи паливної системи. Всі паливопроводи мають систему підігріву, щоб підтримувати паливо теплим під час роботи та коротких зупинок двигуна. Паливопроводи високого тиску, які не входять до складу рейкового блоку, мають подвійну конструкцію стінок і точки контролю витоків.

- Клапан утримання тиску

Регульований клапан підтримки тиску (009) у зворотному трубопроводі підтримує тиск палива в трубопроводі подачі до паливних насосів на належному рівні.

- Блок подачі

Блок живлення (007) містить паливні насоси та пов'язані з ними елементи.

- Паливний насос

Паливні насоси (008) подають паливо на паливну рейку під тиском до 1000 бар.

- Паливна рейка

Паливна рейка (004) подає паливо до обмежувальних клапанів або блоків керування впорскуванням.

- Зворотний клапан

Зворотні клапани запобігають зворотному потоку палива від паливної магістралі до паливних насосів (наприклад, якщо паливний насос не подає паливо або паливопровід неспраний)

- Регулятор тиску

Регулятор тиску (001) має різні функції для керування потоком і тиском у паливній магістралі.

- Запобіжний клапан

Перепускний клапан (002) є запобіжним пристроєм. Якщо тиск палива підвищується більше, ніж встановлене значення, запобіжний клапан відкривається.

- Клапан обмеження потоку

Клапани обмеження потоку (003) (FLV, не для двигунів X82, X92, RT-flex та споріднених двигунів DF), встановлені на паливній рейці, подають паливо до відповідних клапанів впорскування з відрегульованою кількістю палива.

- Блок керування впорскуванням

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Блоки керування впорскуванням (003) (ICU, для двигунів X82, X92, RT-flex та споріднених двигунів DF), встановлені на паливній рейці, подають паливо до відповідних впорскувальних клапанів з відрегульованою кількістю палива.

- Клапан впорскування

Клапани впорскування (006) подають паливо в камеру згоряння у вигляді розпилювача.

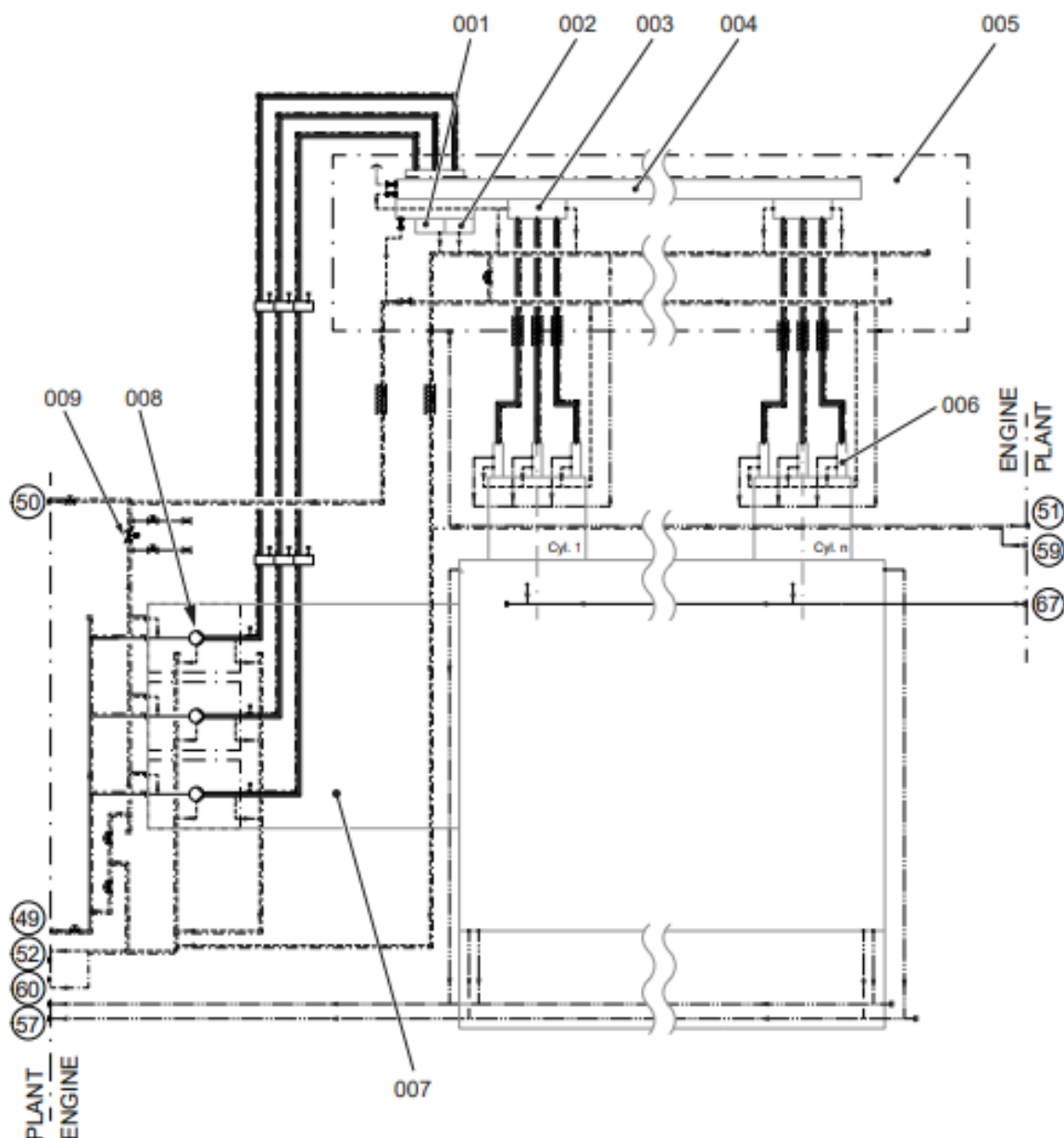


Рис. 4.1 Паливна система двигуна WinGD W5X72DF

Система охолодження двопаливного головного двигуна WinGD W5X72DF, встановленого на газовозі Flex Aurora, є багатоконтурною та забезпечує ефективне відведення теплоти від основних вузлів двигуна. Вона

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КР.ОП135.6211м.04.ПЗ

Арк.

61

поділяється на три основні контури — високотемпературний (НТ), низькотемпературний (LT) та забортний (SW) — які взаємодіють через теплообмінники різних типів для підтримання оптимального теплового режиму роботи двигуна в умовах змінного навантаження та змін температури навколишнього середовища.

Високотемпературний контур (НТ) забезпечує охолодження гільз циліндрів, головок блоків та сорочок охолодження. Температура води в цьому контурі підтримується на рівні приблизно 80–90 °С для забезпечення сприятливих умов згоряння та запобігання термічній деформації металевих компонентів. Циркуляція теплоносія здійснюється за допомогою потужного насоса, а тепло, що відводиться, передається у проміжний теплообмінник, де далі переноситься до забортної води або використовується для утилізації теплоти.

Низькотемпературний контур (LT) призначений для охолодження наддувного повітря після компресора турбонагнітача (інтеркулер), мастильного масла після змащення та деяких електронних систем управління двигуном. Температурний режим тут значно нижчий — близько 30–40 °С, що необхідно для забезпечення високої ефективності охолодження і зменшення ризику утворення відкладень у радіаторах та інтеркулерах. LT-контур також має власний циркуляційний насос, а охолоджуюча рідина виводить тепло через пластинчасті теплообмінники, які з'єднані з забортною водою.

Забортний водяний контур (SW) — це зовнішній контур охолодження, який використовує морську воду для відведення тепла з прісноводних контурів НТ і LT. Забортна вода надходить на судно через фільтри та надходить у пластинчасті або кожухотрубні теплообмінники, де приймає тепло від прісноводних контурів, після чого скидається за борт. Цей контур не циркулює всередині двигуна, а виконує функцію теплового «поглинача» через проміжні теплообмінники.

Важливу роль у системі відіграють теплообмінники, серед яких використовуються пластинчасті (через їхню високу ефективність,

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

компактність і зручність обслуговування) та кожухотрубні (які застосовуються для більш складних середовищ або в системах з високим тиском). Пластинчасті теплообмінники зазвичай застосовуються для передачі тепла від LT- та НТ-контурів до SW, тоді як кожухотрубні — у випадках, де потрібна більша надійність і стійкість до забруднення.

Уся система охолодження керується за допомогою автоматизованої системи контролю, яка підтримує стабільні параметри температур і тиску, здійснює моніторинг циркуляції охолоджувальних рідин та попереджає екіпаж у разі відхилень. Такий підхід забезпечує довговічну та ефективну роботу двигуна WinGD W5X72DF у складних морських умовах.

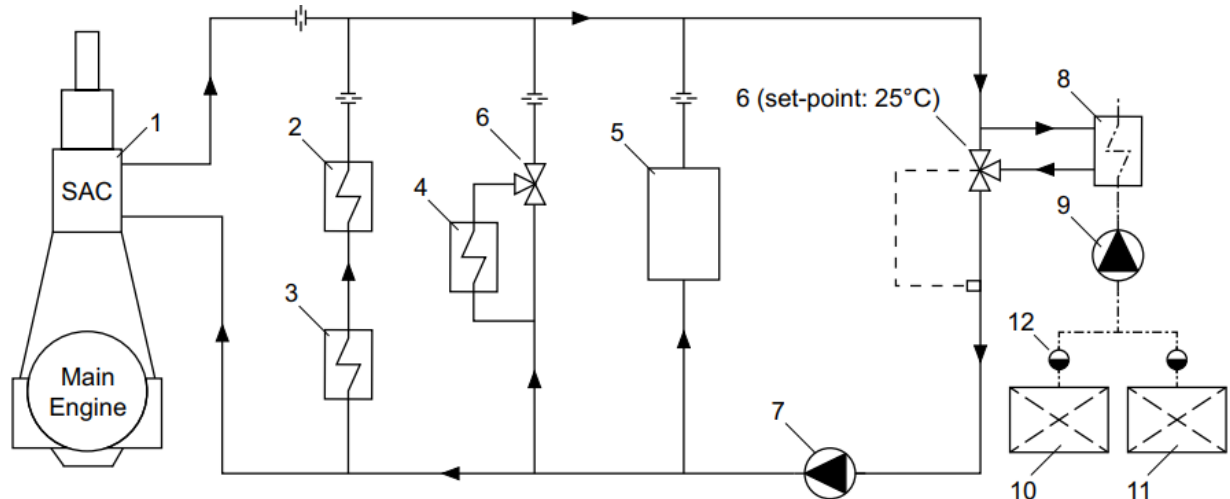


Рис. 4.1 Контур охолоджувальної води LT — Одне задане значення температури

1. Охолоджувач продувного повітря (SAC); 2. Охолоджувач охолоджувальної води НТ; 3. Охолоджувач мастильної оливи;
4. Охолоджувач MGO/MDO; 5. Допоміжні установки; 6. Автоматичний клапан регулювання температури; 7. Насос охолоджувальної води НТ;
8. Центральний охолоджувач морської води; 9. Циркуляційний насос морської води; 10. Резервуар для низької температури; 11. Резервуар для високої температури; 12. Фільтр морської води;

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КР.ОП135.6211м.04.ПЗ

Арк.

63

Система змащення

Система змащення виконує функцію зниження тертя між рухомими деталями, а також охолодження, очищення та збереження робочих характеристик мастильного матеріалу.

До складу системи входять:

- Головний масляний насос, який забезпечує циркуляцію масла в робочому режимі.
- Допоміжний насос, що використовується при запуску двигуна або як резервний в аварійних ситуаціях.
- Фільтри грубої та тонкої очистки, які забезпечують ефективне видалення механічних домішок.
- Маслоохолоджувачі, зазвичай пластинчастого типу, які знижують температуру масла до оптимального рівня.
- Сепаратори, що застосовуються для видалення води та мікрочастинок.
- Мастильні трубопроводи, які з'єднують усі елементи системи.
- Масляний резервуар (танк) і відстійник, де масло накопичується, охолоджується та очищується від шламових залишків.

Робочий тиск в системі змащення підтримується в межах 4–6 бар, температура подачі масла — близько 45–50°C. Для обслуговування встановлена автоматизована система контролю рівня та якості масла.

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

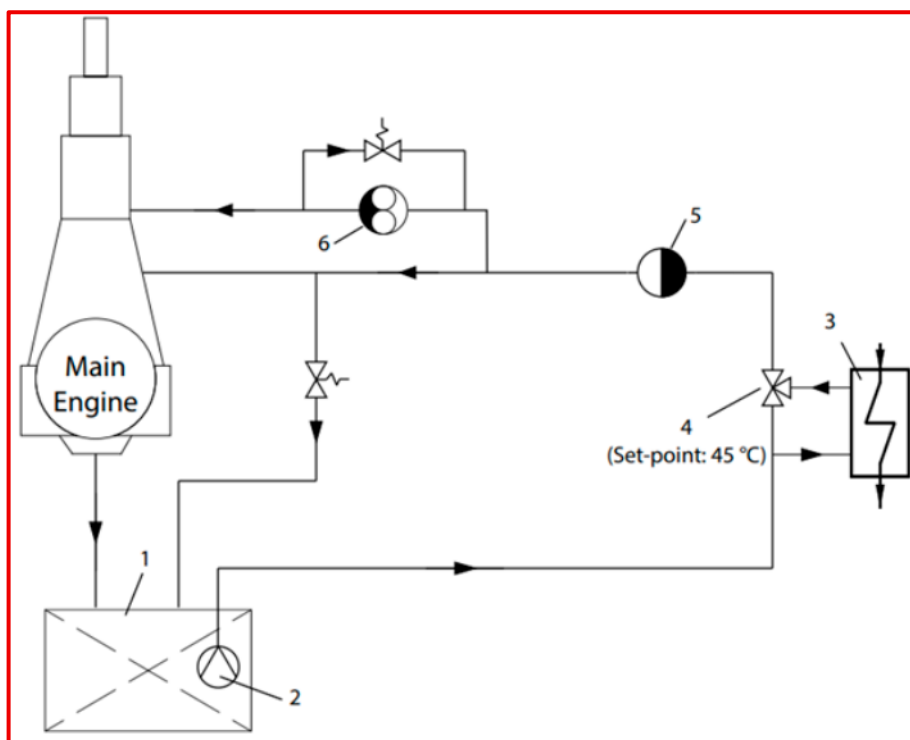


Рис. 4.2 Система змащення

1. Зливний бак для мастила; 2. Масляний насос; 3 Охолоджувач мастила;
4. Автоматичний клапан регулювання температури; 5. Автоматичний самоочисний фільтр із зворотною промивкою для очищення мастила;
6. Траверсний масляний насос.

Система подачі палива

Оскільки двигун W5X72DF є двопаливним, система подачі палива передбачає обробку як рідких, так і газових палив.

Для рідкого палива (наприклад, MGO/HFO) передбачено:

1. Робочі й запасні паливні баки, обладнані підігрівачами та індикаторами рівня.
2. Система очищення, що складається з фільтрів грубої очистки, сепараторів (центрифуг), гомогенізаторів і фільтрів тонкої очистки.
3. Паливні насоси високого тиску та підігрівачі, які забезпечують подачу палива до форсунок при потрібних параметрах (в'язкість 10–14 сСт при 50–150 °C).
4. Форсунки і паливопроводи високого тиску, які подають паливо до камери згоряння.

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

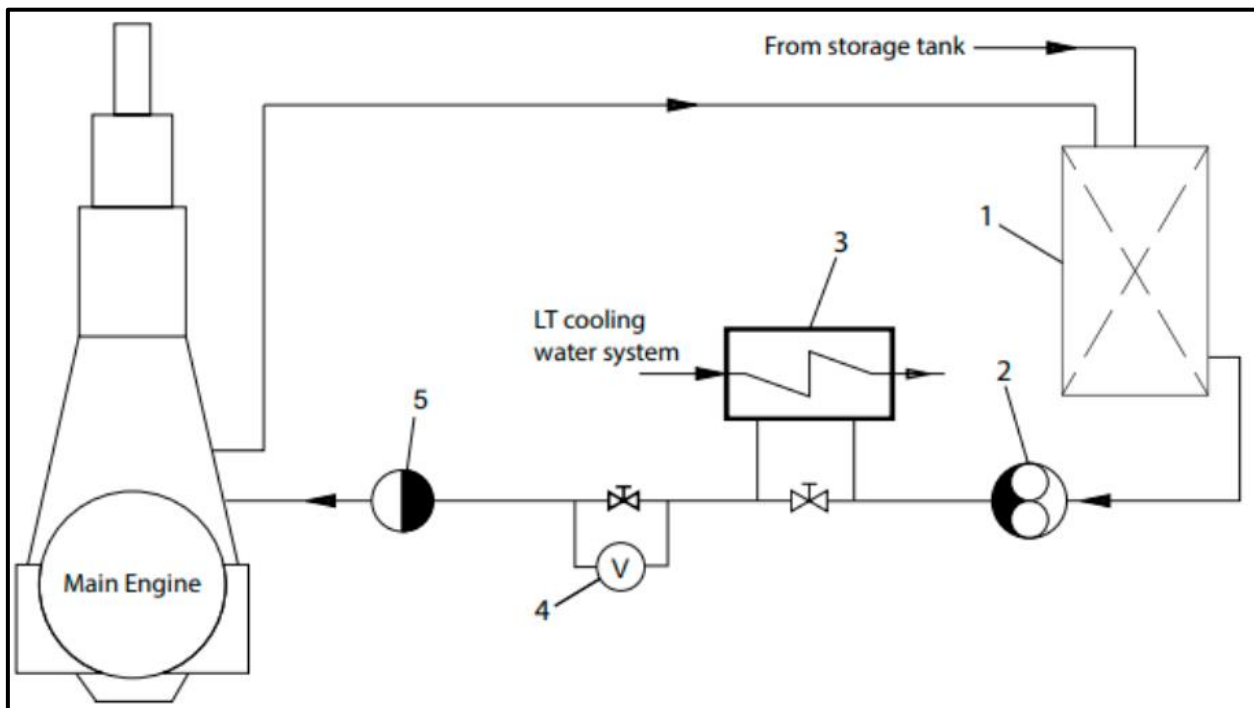


Рис. 4.3 Система подачі палива

1. Бак для обслуговування MGO; 2. Насос MGO; 3. Теплообмінник MGO;
4. Віскозиметр; 5. Фільтр мазуту.

Для газового палива (LNG):

Система подачі газу включає випарники, газові компресори, дегазифікаційні установки та газові інжектори, інтегровані з системою управління двигуном.

Система побудована відповідно до вимог IGF Code.

Система наддуву та випуску

Система наддуву двигуна забезпечує подачу стисненого повітря до камер згоряння:

1. Основний елемент — турбокомпресор ABB або MAN, який обертається енергією вихлопних газів і стискає свіже повітря.
2. Інтеркулер (охолоджувач наддувного повітря) знижує температуру стисненого повітря для підвищення щільності.
3. Відпрацьовані гази проходять через:

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

4. Випускний колектор, який збирає гази з усіх циліндрів.
5. Котел-утилізатор, де теплота газів використовується для утворення пари (температура до 400°C).
6. Глушник і димову трубу, що виводять очищені гази за межі судна.

Повітряна система

Для запуску головного двигуна необхідна потужна система стисненого повітря:

- Стартер-компресор подає повітря до циліндрів через пускові повітряні клапани, які відкриваються у визначені фази.
- Повітря зберігається у балонах стислого повітря (зазвичай тиском до 30 бар).
- Система дублюється і має аварійний запас тиску на кілька запусків.

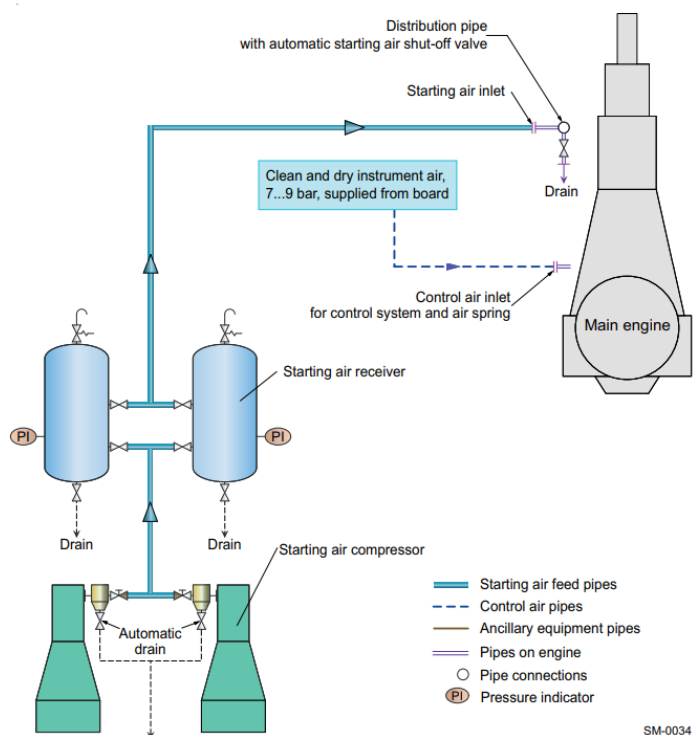


Рис. 4.3 Система подачі повітря

Система утилізації теплоти

Вихлопні гази після турбокомпресора подаються до котла-утилізатора, в якому теплота використовується для:

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

- виробництва пари для побутових потреб;
- забезпечення гарячого водопостачання;
- опалення систем та палив.

Система функціонує автоматично, з регуляцією температури пари й тиску.

Система технічного обслуговування і діагностики

На судні встановлено систему WinGD UNIC, яка контролює:

- температуру циліндрів;
- тиск масла;
- тиск наддуву;
- витрати палива;
- вібрації, знос деталей, несправності.

Ця система дозволяє проводити діагностику в реальному часі та забезпечує дистанційний зв'язок із береговими службами.

Система контролю екологічних параметрів

Враховуючи міжнародні вимоги (MARPOL Annex VI, EEDI, IMO Tier III), система екологічного контролю складається з:

- датчиків контролю NO_x, SO_x, CO₂ та CH₄;
- SCR-системи (Selective Catalytic Reduction) для зменшення викидів NO_x;
- газових скрубєрів, якщо двигун працює на HFO;
- метанових каталітичних окиснювачів, які знижують викиди незгорілого метану;
- системи моніторингу GHG, з інтеграцією в енергоменеджмент судна (SEEMP).

4.2 Розробка принципової схеми системи роторних вітрил.

Проектування системи роторних вітрил для суден є інноваційним напрямом, спрямованим на зниження споживання палива та зменшення

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шкідливих викидів у довкілля за рахунок використання сили вітру як допоміжного джерела тяги. На початковому етапі розробки необхідно визначити загальну архітектуру системи, встановити логічні зв'язки між її функціональними елементами та описати принцип її роботи у взаємодії з іншими судновими системами. В основі системи роторних вітрил лежить використання ефекту Магнуса — фізичного явища, що виникає при обертанні тіла в повітряному потоці, яке створює підйомну силу, здатну генерувати корисну тягу.

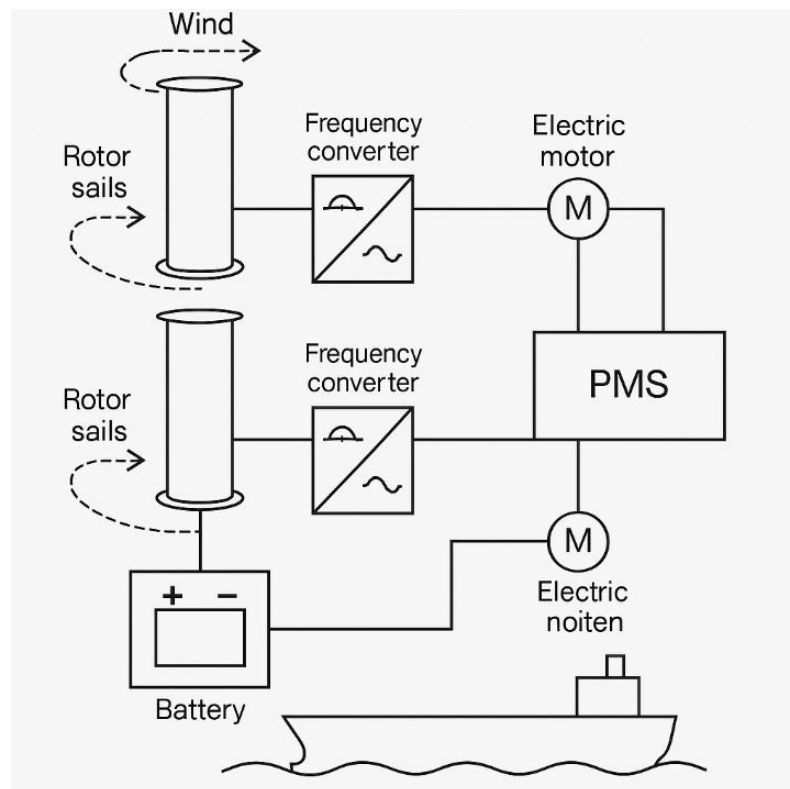


Рис. 4.4 Принципова схема системи роторних вітрил

Роторне вітрило, як головний елемент системи, являє собою вертикальний циліндр, що обертається навколо власної осі. Для забезпечення обертання використовується привід, зазвичай електричний, що дозволяє точно регулювати швидкість обертання в залежності від зовнішніх умов. Ефективність дії роторного вітрила значною мірою залежить від співвідношення між швидкістю обертання та швидкістю вітру, а також від кута атаки відносно курсу судна. У зв'язку з цим, система керування відіграє ключову роль у забезпеченні оптимального функціонування роторів. Вона

отримує дані від сенсорів, які фіксують напрямок і силу вітру, швидкість судна, крен, диферент, положення рулів та інші параметри, що впливають на аеродинаміку. Ці дані обробляються в реальному часі, після чого система керування формує сигнали для приводу ротора, автоматично змінюючи його швидкість обертання або, за необхідності, зупиняючи його.

Живлення всієї системи здійснюється від суднової електромережі, при цьому важливо враховувати енергоспоживання приводу та контролерів, а також забезпечити надійний захист від перенавантаження, короткого замикання та відмов систем автоматизації. В сучасних проєктах передбачають інтеграцію системи роторних вітрил у загальну систему енергоменеджменту судна, що дозволяє автоматично оптимізувати роботу головної енергетичної установки в залежності від вітрового навантаження. Крім того, конструкція роторного вітрила вимагає надійного механічного з'єднання з корпусом судна, для чого передбачаються спеціальні опорні елементи та підкріплювальні конструкції. Вони повинні витримувати як статичні навантаження від маси вітрила, так і динамічні зусилля від вітрового тиску, обертання ротора та хитавиці.

Важливим елементом є також система безпеки, яка повинна гарантувати стабільну роботу системи в нормальних умовах і забезпечувати швидке реагування в разі виникнення аварійної ситуації. Зокрема, передбачено аварійне відключення обертання ротора, його механічне гальмування, а також можливість повної зупинки і фіксації вітрила в безпечному положенні. У разі погіршення погодних умов або відмови окремих елементів система повинна автоматично переходити в безпечний режим роботи, попереджаючи потенційні пошкодження як самої установки, так і конструкцій судна.

Принципова схема системи роторних вітрил повинна відображати логіку взаємодії усіх перелічених елементів (див. рис. 4.4): від сенсорів і контролерів до приводів та конструктивних опор. У схемі також передбачаються вузли моніторингу технічного стану, що включають вібраційні датчики,

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температурні сенсори, лічильники обертів і модулі самодіагностики. Це дає можливість забезпечити не лише ефективну, а й довготривалу експлуатацію обладнання з мінімальними перервами на технічне обслуговування.

Таким чином, розробка принципової схеми системи роторних вітрил є важливим етапом, що об'єднує інженерно-конструкторські, аеродинамічні, електротехнічні та автоматизаційні аспекти. Вона створює основу для подальшого деталювання проєкту, розробки креслень, підбору конкретного обладнання, а також проведення розрахунків міцності, стійкості та економічної ефективності. У подальшому ця схема слугуватиме базою для інтеграції вітрильної установки в існуючу архітектуру судна з урахуванням його розмірів, типу, призначення та умов експлуатації.

4.3. Модальний аналіз роторних вітрил

Власні частоти

Щоб зрозуміти характеристики обертальних коливань крила ротора, необхідно дослідити власні значення системи, або власні частоти, у стані вільних коливань. Через гіроскопічний ефект власні частоти ротора змінюються зі швидкістю обертання. Тому для оцінки характеристик ротора можна використовувати діаграму Кемпбелла, яка відображає власні частоти відносно швидкості обертання. Для перевірки підходу спрощеної моделі з 4 ступенями свободи, було порівняно діаграми Кемпбелла моделі з 4 ступенями свободи та моделі скінченних елементів. На рисунку 4.5 показано результати модального аналізу з використанням моделі скінченних елементів. Основними модами обертальних коливань у крилі ротора є моди згину відносно точок опори, як це спостерігається на рисунку 4.5. У першій формі моди коливань результату аналізу скінченних елементів прогин в першу чергу спричинений горизонтальним зміщенням у верхній точці опори, а не згинанням самого циліндричного ротора. Ця форма моди відповідає власній частоті першої моди на діаграмі Кемпбелла.

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71



Рисунок 4.5 Результати модального аналізу методом скінченних елементів

Суцільні лінії та маркери, показані на рисунку 4.6, представляють власні частоти ротора, розраховані за допомогою моделі 4DOF при різних швидкостях обертання. Результати аналізу з використанням моделі 4DOF показують загалом чотири власні частоти, включаючи дві власні частоти прямого вихору (4DOF fn2, 4DOF fn4 на рисунку 4.6) та дві власні частоти зворотного вихору (4DOF fn1, 4DOF fn3 на рисунку 4.6). У динаміці ротора на власні частоти прямого та зворотного вихору впливає гіроскопічний ефект ротора, що викликає зміни відносно обертів ротора. Для прямого вихору власна частота збільшується зі збільшенням обертів, тоді як для зворотного вихору власна частота зменшується зі збільшенням обертів. Однак у випадку форми 1-го режиму (4DOF fn1 та fn2) на рисунку 4.6 ротор демонструє циліндричний рух, зосереджений навколо опор, і гіроскопічний ефект не впливає на зміну власної частоти. Однак, у другій формі моди (4DOF fn3 та fn4), яка демонструє конічну моду, зосереджену навколо опор, можна підтвердити, що існує різниця у власних частотах прямого та зворотного вихору через гіроскопічний ефект.

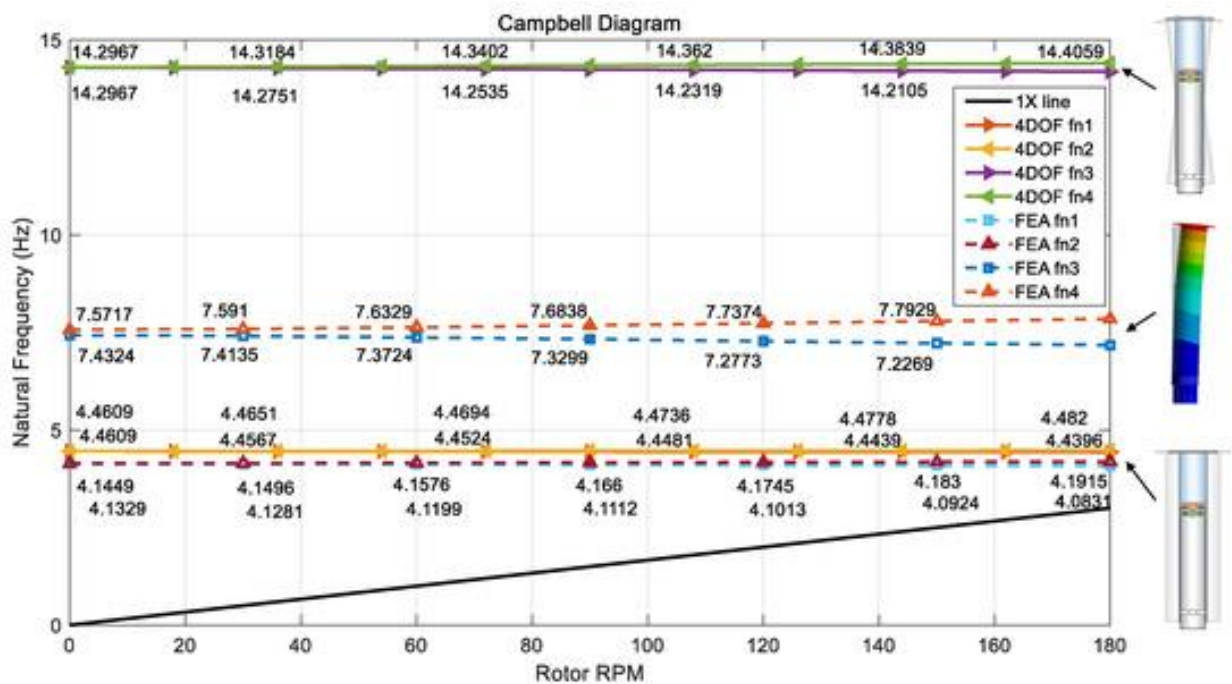


Рисунок 4.6 Діаграма Кемпбелла моделі ротор-вітрило

Пунктирні лінії та маркери на рисунку 4.6 представляють власні частоти, отримані з результатів аналізу скінченних елементів, які відображають лише чотири основні власні частоти, пов'язані з глобальними бічними коливальними модами ротора. При порівнянні результатів аналізу скінченних елементів з моделлю 4DOF, власні частоти нижчої моди, зокрема циліндричної моди, показують подібні значення близько 4 Гц. Оскільки циліндрична мода не залежить переважно від геометричного вигину ротора, вона суттєво не змінюється зі швидкістю обертання, що призводить до подібних результатів між моделлю 4DOF та моделлю скінченних елементів. Однак для 3-ї та 4-ї мод модель 4DOF більше не дає однакових результатів. Це можна пояснити власними частотами, пов'язаними зі згинанням самого ротора, які не враховуються в моделі 4DOF.

У цьому дослідженні власні частоти та форми мод роторного крила тісно пов'язані з жорсткістю підшипника, що підтримує роторне крило. Тому власні частоти неодноразово обчислювалися шляхом зміни жорсткості підшипника, який підтримує роторне крило. Зокрема, достовірність власних частот, отриманих з моделі 4DOF, прийнятої для роторного крила, оцінювалася

шляхом порівняння їх з власними частотами, отриманими за допомогою методу скінченних елементів. Жорсткість підшипника, застосована в аналізі, наведена в таблиці: .

Розрахункові випадки жорсткості (10 ⁻⁷ Н /м)					
Верхній роликовий підшипник	10	50	500	2500 (довідка)	3500
Верхній опорний підшипник	1	10	100	1000 (довідка)	1500
Нижній підшипник	0,05	0,1	0,5	2 (довідка)	3

Це включає один випадок твердої опори та три випадки м'якої опори. Тому аналіз було проведено для п'яти різних значень жорсткості для кожного з двох верхніх підшипників та п'яти значень жорсткості для нижнього підшипника. Отримані першу та другу власні частоти залежно від швидкості обертання можна спостерігати на рисунках 4.7 та 4.8.

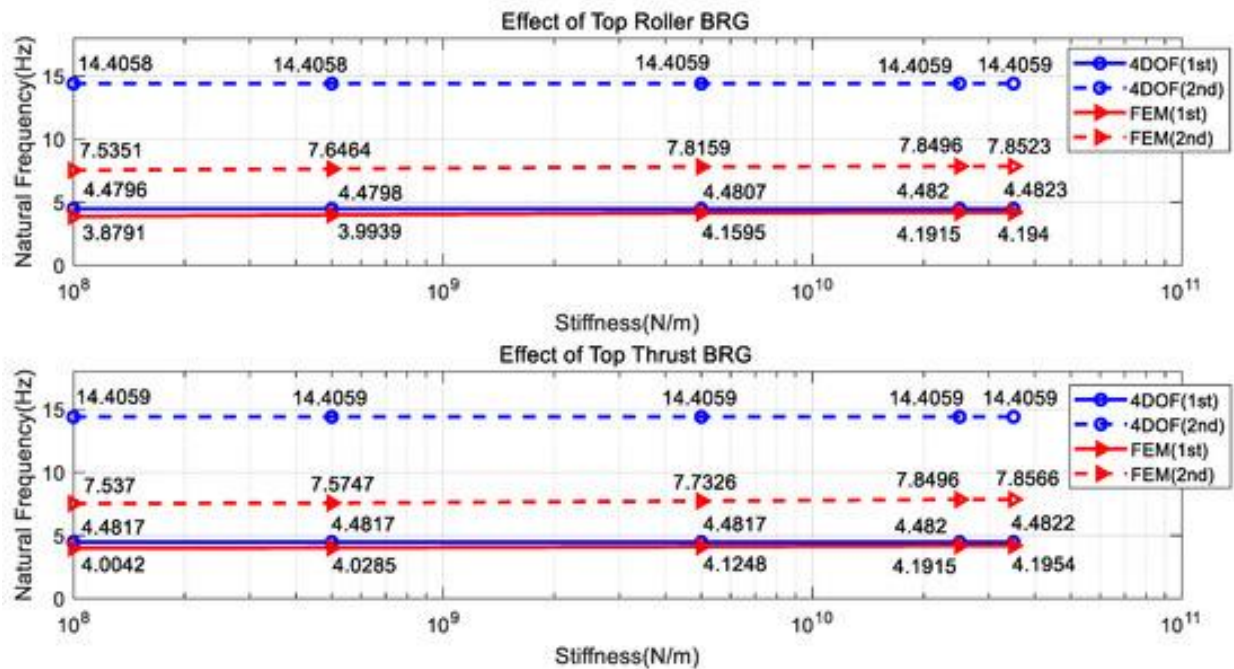


Рисунок 4.7 Власні частоти крила ротора залежно від жорсткості верхньої опори.

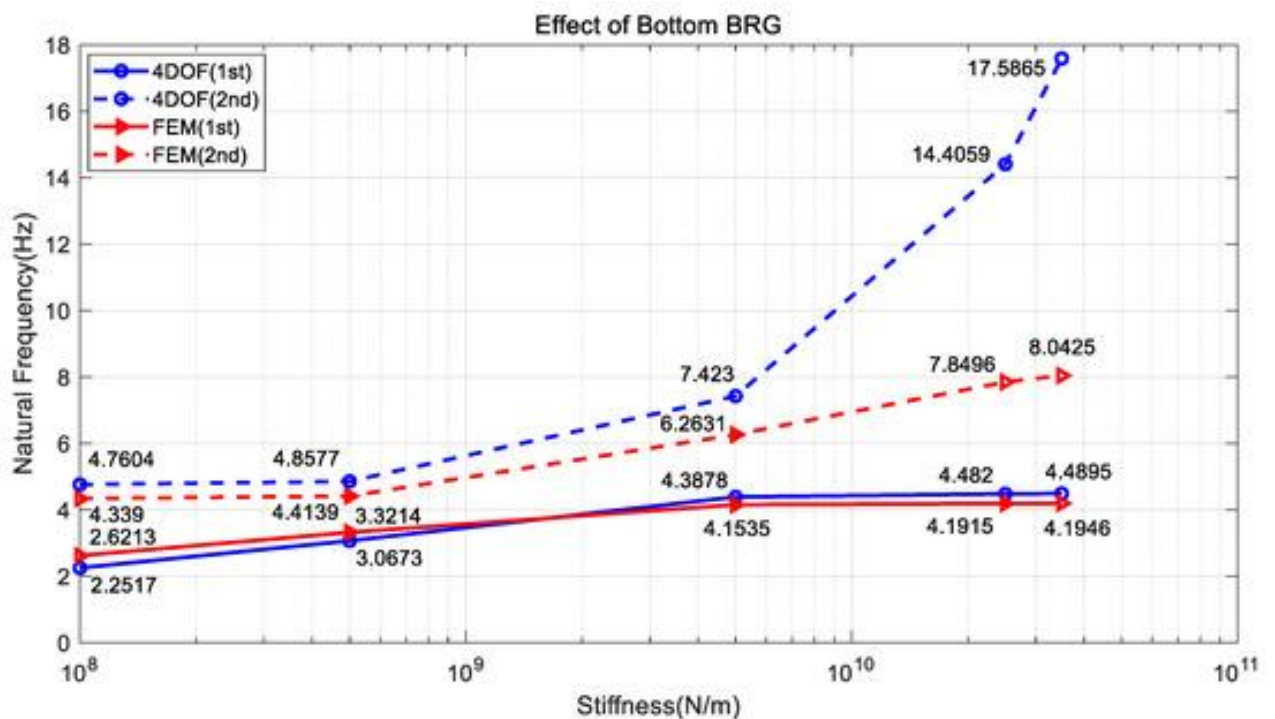


Рисунок 4.8 Власні частоти крила ротора залежно від жорсткості нижчої опори.

На рисунку 4.7 показано зміну власних частот зі зміною жорсткості верхніх підшипників. Можна спостерігати, що зміни жорсткості верхніх підшипників мало впливають на значення власної частоти. Цей результат узгоджується як для моделі з 4 ступенями свободи, так і для моделі скінченних елементів, що вказує на подібність тенденцій між двома моделями. Це можна пояснити тим, що жорсткість верхніх опорних підшипників суттєво не впливає на власні частоти, оскільки вона працює послідовно з жорсткістю на згин внутрішньої вежі, з'єднаної з нею. Отже, зміни жорсткості підшипників, які є відносно вищими порівняно з внутрішньою вежею, не мають суттєвого впливу на власні частоти.

На рисунку 4.8 показано зміни власних частот зі змінами жорсткості нижнього підшипника. Оскільки жорсткість нижнього підшипника поступово зменшується та стає м'якшим, результати аналізу моделі 4DOF та аналізу скінченних елементів стають більш схожими. Це відбувається, коли жорсткість нижнього підшипника падає нижче певного порогу, що призводить до домінування власних частот та форм мод, на які впливає жорсткість

підшипника, а не жорсткість на згин циліндричного ротора. У цьому випадку результати аналізу моделі 4DOF апроксимують припущення про жорсткий вал, що призводить до подібних власних частот між двома аналізами. Тому, щоб апроксимувати другу моду навіть за допомогою моделі 4DOF, жорсткість нижнього роликового підшипника необхідно встановити на значення менше 1/4 від еталонної жорсткості. Однак, враховуючи, що робочий діапазон крила ротора переважно знаходиться в межах робочого діапазону швидкостей, де не досягається власна частота першої моди (нижче 3 Гц), очікується, що моди з вищою частотою матимуть обмежений вплив на динамічну реакцію крила ротора.

Розділ 5. Заходи по забезпечення надійної експлуатації обладнання СЕУ

5.1. Вимоги до розміщення обладнання в МКВ судна.

Розміщення обладнання в машинно-котельному відділенні (МКВ) судна повинно відповідати низці технічних, експлуатаційних, ергономічних і безпекових вимог, встановлених класифікаційними товариствами, міжнародними морськими конвенціями та стандартами проєктування. Основна мета правильного розміщення обладнання полягає в забезпеченні ефективної, надійної та безпечної роботи суднової енергетичної установки (СЕУ) протягом усього періоду експлуатації судна.

Передусім, розміщення обладнання має гарантувати безперешкодний доступ до всіх основних і допоміжних механізмів, що входять до складу СЕУ. Це стосується головного двигуна, редукторів, генераторів, котлів, насосів, теплообмінників, системи вентиляції, паливної апаратури, а також автоматизованих систем керування. Обслуговування, ремонт і моніторинг стану цих агрегатів повинні здійснюватися без потреби демонтажу інших елементів або ускладнення доступу до важливих вузлів. З цією метою між обладнанням передбачаються проходи нормативної ширини, люки, оглядові

					<i>КР.ОП135.6211м.04.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

вікна, майданчики з перилами та інші засоби, що полегшують огляд і обслуговування.

Крім доступності, важливе значення має розподіл маси основного обладнання в межах корпусу судна. Воно повинно бути розміщене таким чином, щоб не порушувалася остійність судна, його центрування по відношенню до головної осі, а також щоб мінімізувалися навантаження на судновий корпус у зонах стику з фундаментами. Тяжке обладнання, зокрема головний двигун і редуктор, зазвичай розташовується на центральній осі судна, на низькому рівні, ближче до кілевої лінії, що дозволяє знизити загальний центр мас і забезпечити мінімальні згинальні моменти на корпус.

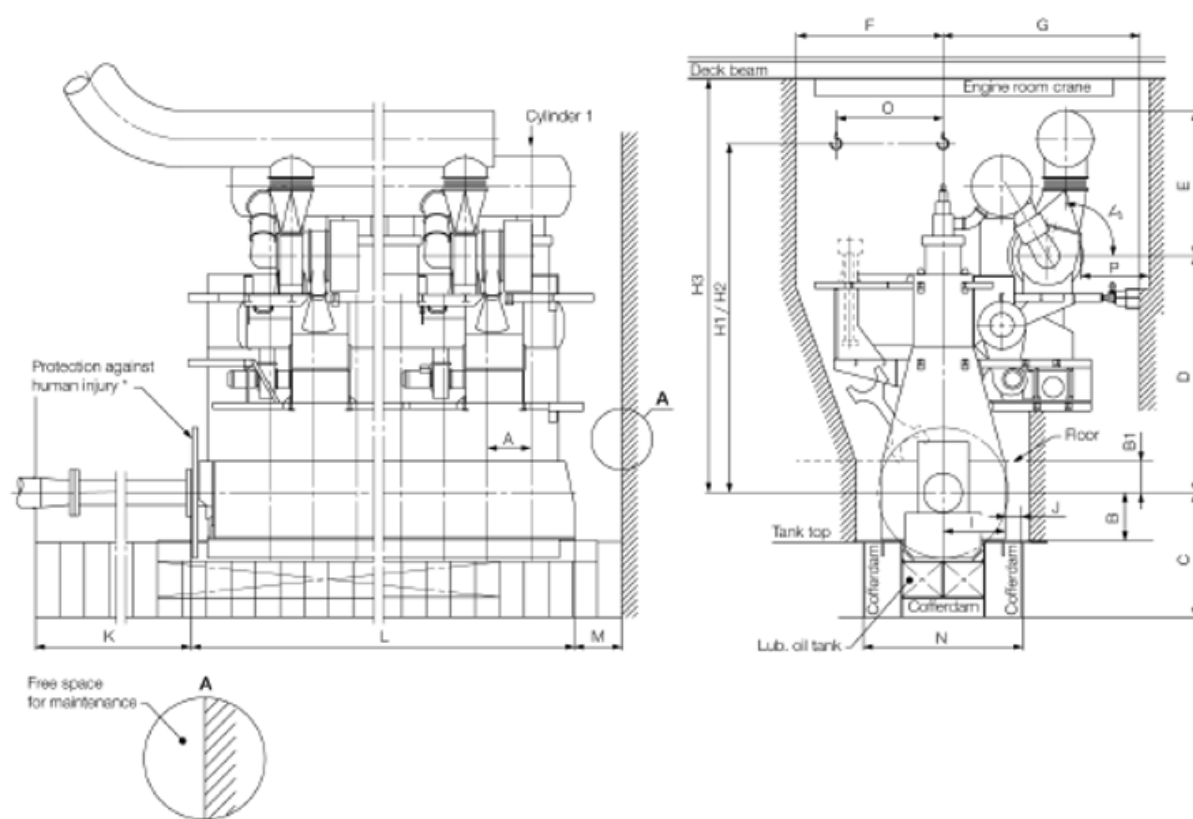


Рис 5.1 Необхідний простір для двигуна турбокомпресор(и), встановлений(і) з боку вихлопної системи

Також необхідно враховувати умови прокладання трубопроводів, кабельних трас, систем паливостачання, охолодження, змазування, відведення відпрацьованих газів, пожежогасіння, водопостачання та кондиціонування. Усі ці системи повинні бути логічно організовані, мати чітко визначені траси з урахуванням мінімальної довжини та зручності

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

обслуговування, а також відповідати вимогам щодо герметичності, ізоляції та вібронавантаження. При цьому важливо забезпечити сумісність між системами — наприклад, уникати перетину труб високого тиску з електрокабелями або розміщення гарячих поверхонь поблизу горючих матеріалів.

У конструкції машинного відділення обов'язково враховується наявність системи вентиляції та відведення тепла. Теплове навантаження, що генерується основними енергетичними агрегатами, повинно бути ефективно відведене за допомогою примусової вентиляції, яка забезпечує обмін повітря відповідно до встановлених норм. Необхідно також створити умови для контролю температурного режиму та уникнення зон перегріву або надмірної вологості, що може призвести до корозії чи збоїв в електронному обладнанні.

Важливим фактором є дотримання вимог пожежної безпеки. Усі елементи системи повинні розміщуватись таким чином, щоб забезпечити ізоляцію джерел займання від горючих матеріалів, можливість локалізації вогню, а також швидкий доступ до засобів пожежогасіння — спринклерів, вогнегасників, ручних клапанів, датчиків диму та температури. Між агрегатами повинні бути передбачені вогнезахисні бар'єри, екрани або прокладки.

Не менш важливою є вібро- та шумозахистна характеристика. Механізми, що створюють підвищений рівень шуму або вібрації, встановлюються на віброізолюючих опорах, спеціальних фундаментах або платформах. Внутрішні перегородки та обшивка машинного відділення можуть оснащуватися звукопоглинаючими матеріалами. Це дозволяє не лише підвищити комфорт роботи екіпажу, а й зменшити динамічні навантаження на корпус та інші компоненти судна.

Усі згадані вимоги також мають бути реалізовані з урахуванням ергономіки. Експлуатаційний персонал повинен мати змогу працювати в безпечних та зручних умовах, з урахуванням освітлення, вентиляції, рівня шуму, температурного режиму та можливості швидкої евакуації в разі

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аварійної ситуації. Тому ще на етапі проєктування машинно-котельного відділення розробляється тривимірна модель або макет для перевірки зон доступу, зон обслуговування, проходів та зон аварійного виходу.

У підсумку, правильне розміщення обладнання в МКВ є результатом комплексного підходу, який враховує технічні, технологічні, безпекові та експлуатаційні чинники. Від якості цього етапу проєктування залежить надійність роботи судна, зручність його обслуговування та безпека екіпажу під час плавання.

5.2 Розробка компоновки обладнання СЕУ в МКВ. (Significant Ship)

Розробка компоновки обладнання суднової енергетичної установки (СЕУ) в машинно-котельному відділенні (МКВ) є одним із найважливіших етапів у процесі проєктування судна. Від ефективності цієї компоновки залежить як загальна працездатність і надійність енергетичної системи судна, так і зручність її експлуатації, технічного обслуговування та модернізації в майбутньому. Компоновка повинна забезпечувати раціональне розміщення усіх основних і допоміжних агрегатів з урахуванням технологічного процесу виробництва, перетворення та розподілу енергії на борту, дотримання ергономічних, теплотехнічних, вібраційних, конструктивних та безпекових вимог.

Основою для розробки компоновки є затверджена схема енергетичної установки судна, яка визначає кількість і типи головних двигунів, допоміжних дизель-генераторів, котельного обладнання, насосних станцій, систем кондиціонування, охолодження та паливопостачання. Після узгодження основних параметрів починається процес просторового розміщення обладнання з урахуванням його габаритів, маси, конфігурації трубопроводів та електричних з'єднань. Найчастіше компоновка виконується за лінійною, блочною або змішаною схемою залежно від типу судна, обмежень машинного відділення та умов експлуатації.

					<i>КР.ОП135.6211м.04.ПЗ</i>	Арк.
						79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Головний двигун, як правило, встановлюється вздовж діаметральної площини судна на спеціальному фундаменті, привареному до кіля або жорстко з'єднаному з судновим набором. Це забезпечує рівномірний розподіл навантаження та зменшує деформації корпусу.

Розміщення допоміжних механізмів повинно забезпечувати найкоротші траси з'єднувальних трубопроводів, уникнення перехресть, а також створення логічної послідовності потоків енергоносіїв. Наприклад, система подачі палива розташовується так, щоб паливні баки, сепаратори, фільтри, насоси й інжекційне обладнання утворювали єдиний технологічний ланцюг із чіткою послідовністю. При цьому необхідно залишити вільний доступ до всіх вузлів, які вимагають періодичного технічного обслуговування, заміни фільтрів, прокладок або арматури.



Рис 5.2 Схема розташування обладнання СЕУ

З метою полегшення монтажу, демонтажу та транспортування важливих агрегатів, у компоновці передбачаються так звані монтажні проходи та зони демонтажу. Над головним двигуном і редуктором часто проектується відкритий простір до рівня палуби для можливості підйому агрегатів за допомогою суднового або портового крана. Також враховується розташування вантажних люків, направляючих для роликів платформ і балкових систем.

Особлива увага приділяється питанню розділення зон високої та низької температури. Котельне обладнання, теплообмінники та системи відведення відпрацьованих газів не повинні розміщуватись у безпосередній близькості до систем автоматики, електрообладнання чи блоків керування. Аналогічно, системи охолодження повинні бути винесені ближче до зовнішніх обшивок або ж розміщені в нижніх частинах відділення для оптимального теплообміну. Усі механізми з підвищеним рівнем вібрації розташовуються на віброізолюючих фундаментах або платформах, розділених з основною палубою деформаційними швами.

Інженерна модель компоновки також повинна враховувати пожежну безпеку, зокрема розташування систем виявлення та гасіння пожежі, датчиків температури, вогнезахисних клапанів і герметичних перегородок. Зони, які можуть стати джерелом загоряння, повинні бути ізольовані або відокремлені тепло- й вогнетривкими екранами.

Крім того, важливим критерієм у компоновці є дотримання нормативів шумового навантаження на екіпаж. Для цього обладнання розміщується з урахуванням рівнів шуму, які воно генерує. У деяких випадках насосні або генераторні агрегати встановлюються в окремих шумозахисних блоках або ж відділяються від житлових приміщень додатковими перегородками з поглинаючими матеріалами.

Завершальний етап розробки компоновки включає перевірку моделі на відповідність нормам доступу до евакуаційних шляхів, аварійного освітлення та вентиляції. У разі аварії персонал повинен мати можливість швидко

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

залишити машинне відділення, тому проєктом передбачаються аварійні трапи, люки, димозахисні шторки та системи звукового оповіщення.

Отже, компоновка обладнання СЕУ в МКВ — це складний багаторівневий процес, який поєднує інженерну логіку, вимоги безпеки, технічні обмеження й експлуатаційну зручність. Вона закладає основу для ефективної роботи всієї енергетичної системи судна, а також забезпечує її адаптивність до умов плавання, модернізацій та ремонту протягом усього життєвого циклу судна.

Розділ 6. Розробка розташування обладнання СЕУ в МКВ

6.1 Загальні принципи компоновання

Проектування розташування обладнання енергетичної установки на газовозі Flex Aurora здійснюється з урахуванням конструктивних особливостей судна, вимог безпеки, ергономіки та забезпечення ефективного технічного обслуговування. Основна мета — забезпечити оптимальну компоновку обладнання, що гарантує надійну роботу силової установки, мінімізацію енергетичних втрат і відповідність сучасним екологічним стандартам.

У процесі розробки розташування обладнання враховано такі вимоги:

- забезпечення вільного доступу до вузлів для ремонту та огляду;
- розмежування «гарячих» та «холодних» зон машинного відділення;
- мінімізація довжини трубопроводів і кабельних трас;
- відповідність вимогам SOLAS, MARPOL Annex VI, а також стандартам ІМО щодо контролю викидів;
- урахування вібраційних і шумових навантажень на конструкції корпусу.

Енергетична установка газовоза включає: головний двигун, турбонагнітачі, систему очищення вихлопних газів (SCR або EGR), компресорні установки,

					<i>КР.ОП135.6211м.04.ПЗ</i>	Арк.
						82
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

систему подачі палива, систему управління, допоміжні насоси, теплообмінники, а також обладнання для обробки сажі та контролю викидів.

Розміщення основного обладнання ЕУ

Головний двигун розташовано в центральній частині машинного відділення на фундаментній плиті, жорстко інтегрований у силовий набір корпусу. Такий вибір забезпечує оптимальний розподіл маси та зменшує згинальні моменти під час навантаження.

Система турбонаддуву та газоходи

Турбонагнітачі встановлено по обох боках двигуна з вільним доступом для очищення та профілактики. Газоходи спрямовані у верхню частину відсіку, де інтегрована модернізована система очищення відпрацьованих газів.

Розміщення обладнання системи очищення вихлопних газів

Відповідно до проведеного техніко-економічного обґрунтування, для модернізації Flex Aurora передбачено впровадження системи селективної каталітичної нейтралізації (SCR). Основні компоненти системи розміщені таким чином:

1. Control cabinet — встановлено у захищеній частині машинного відділення, віддалено від джерел тепла. Забезпечує доступ персоналу до системи автоматизації.
2. Soot blowing system — змонтована на газоходах перед каталітичним модулем, забезпечує очищення поверхонь від нагару.
3. Compressed air supply — компресорний модуль розташований на технічній платформі збоку від двигуна.
4. Air unit — встановлений поряд із дозувальним модулем для формування оптимального складу повітряної суміші.

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						83
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Dosing unit — розміщений поблизу інжектора, що мінімізує довжину трубопроводу з реагентом.
6. Injector — інтегрований у газохід перед каталізаторним модулем з урахуванням вимог до турбулізації потоку.
7. Urea tank — бак з реагентом (40% сечовина) встановлений у суміжному відсіку з системою контролю температури.
8. Pump unit — змонтований у нижній частині машинного приміщення для забезпечення подачі реагенту під необхідним тиском.
9. NOx sensor (optional) — датчики розташовані перед і після реактора SCR.
10. Humidity sensor — встановлений у зоні подачі повітря для забезпечення стабільних умов роботи каталізатора.

Таке компонування забезпечує стабільну роботу системи, мінімальні гідравлічні втрати та відповідність екологічним стандартам IMO Tier III.

Допоміжні системи та траси

Під час проектування маршрути прокладання трубопроводів та кабельних каналів сформовано таким чином, щоб:

- уникати перетину основних проходів обслуговування,
- зменшувати вплив вібрацій,
- забезпечувати легкість демонтажу елементів.

Лінії подачі палива та мастила винесені в окремі коридори з аварійним дренажем. Теплообмінне обладнання розміщено біля бортів судна для ефективного охолодження.

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

6.2. Розробка заходів з моніторингу стану корпусу судна.

Моніторинг стану корпусу судна є критично важливою складовою системи забезпечення безпеки мореплавання, надійності конструкцій та ефективного управління життєвим циклом судна. У зв’язку зі складними навантаженнями, які зазнає корпус під час експлуатації, включно з хвильовими, гідродинамічними, вібраційними та статичними силами, постійне спостереження за технічним станом конструкцій дозволяє своєчасно виявляти пошкодження, деформації та втомні процеси. Такий підхід значно знижує ризики аварій, подовжує термін служби корпусу та оптимізує витрати на обслуговування.

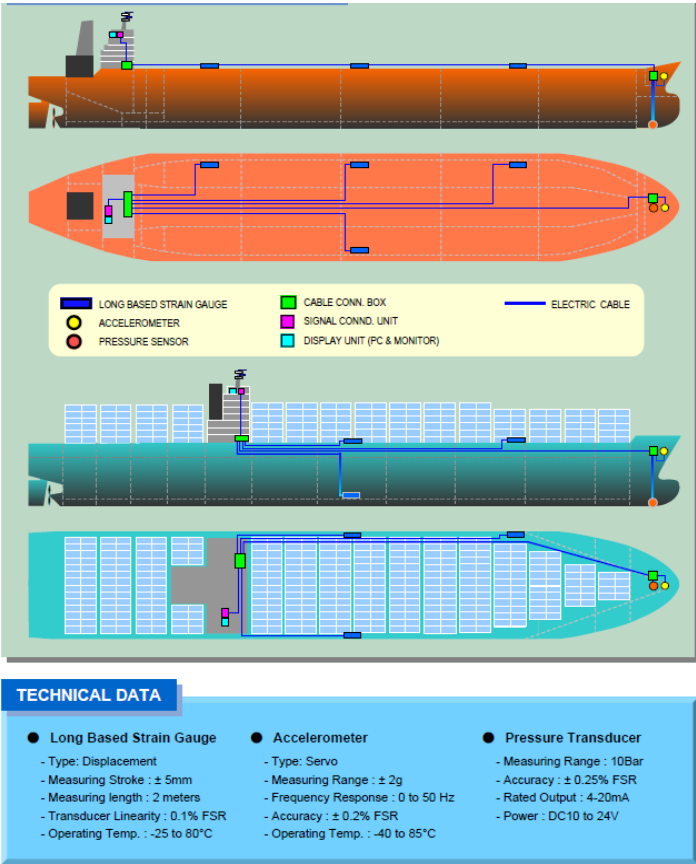


Рис. 5.1 Принципова схема системи моніторингу стану корпусу судна

Система моніторингу стану корпусу судна зазвичай складається з інтегрованого комплексу вимірювальних приладів, що встановлюються в характерних зонах корпусу — в носовій, центральній та кормовій частинах, а також у ділянках, які піддаються максимальним навантаженням. На схемі (рис. 5.1) показано приклад такої системи: датчики розтягування (Long Based Strain

Gauges), акселерометри, тискові датчики, з'єднувальні коробки, сигнальні блоки та пристрої візуалізації даних (РС-монітори), з'єднані між собою електричними кабелями. Додатково (рис. нижче) наведено спрощену схему розміщення сенсорів на корпусі з поясненнями.

Основну функцію виконують тензометричні датчики (stress sensors), які фіксують деформації, спричинені розтягом або стиском під дією зовнішніх навантажень. Ці датчики встановлюються вздовж ключових ділянок корпусу, особливо в центральній частині, де найчастіше виникає ефект «ламання» (hogging/sagging) під дією хвиль. Їхня чутливість дозволяє виявляти незначні зміни напруженого стану, які можуть бути першими ознаками пошкоджень.

Акселерометри, що встановлюються у носовій, центральній або кормовій частинах судна, забезпечують фіксацію прискорень, викликаних хвилювими ударами або вібраціями. Вони дозволяють оцінити динамічний стан корпусу, виявляти резонансні явища та спрогнозувати критичні ситуації. Типові характеристики акселерометрів включають діапазон вимірювання $\pm 2g$, частотну відповідь до 50 Гц і робочий температурний інтервал від -40 до $+85$ °C.

Датчики тиску встановлюються в зонах можливого контакту з водою або в палубних зонах для оцінки впливу хвилювого навантаження. Наприклад, хвилювий радар (Wave Gauge), змодельований на рисунку, допомагає визначати висоту хвиль і їх вплив на конструкцію в режимі реального часу.

Кабельні з'єднання, захищені від вологи, об'єднують усі вимірювальні прилади з сигнальними обробними блоками, які, у свою чергу, надсилають інформацію до центрального комп'ютера або монітора. Ця система візуалізації дозволяє оператору отримувати актуальну інформацію про навантаження, деформації та можливі відхилення в реальному часі. Аналіз отриманих даних може проводитися як автоматично, за допомогою встановленого ПЗ, так і вручну інженерним персоналом.

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						86
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Упровадження системи моніторингу стану корпусу дозволяє перейти від планового технічного обслуговування до обслуговування за фактичним станом, що значно підвищує ефективність технічної експлуатації судна. На основі результатів моніторингу можна своєчасно планувати ремонтні роботи, уникати аварійних зупинок та подовжувати міжремонтні інтервали.

Таким чином, сучасна система моніторингу корпусу судна — це не лише технічний інструмент, а й ключовий елемент концепції «розумного судна», що поєднує цифровізацію, автоматизацію і безпеку експлуатації в умовах морського середовища.

Розділ 7. Техніко-економічне обґрунтування прийнятих рішень

7.1. Оцінка ефективності впровадження ESD заходів за критерієм EEDI

Визначимо коефіцієнт EEDI до модернізації

$$\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)} = 0,75 \cdot (\sum MCR_{ME(i)} - \sum P_{PTO(i)})$$

$$P_{ME(i)} = 0,75 \cdot MCR_{ME} = 0,75 \cdot 2 \cdot 13470 = 20205 \text{ кВт};$$

$$P_{AE} = 0,025 \cdot \sum_{i=1}^{n_{ME}} MCR_{ME(i)} + 250 + COP_{comp} \cdot \sum_{i=1}^{n_{ME}} SFC_{ME(i), gas\ mod\ e} \cdot \frac{P_{ME(i)}}{1000} =$$

$$= 0,025 \cdot 2 \cdot 13470 + 250 + 0,33 \cdot 192 \cdot \frac{17900}{1000} = 2058 \text{ кВт}$$

$$EEDI = \frac{(P_{ME} \cdot (C_{F_{Pilotfuel}} \cdot SFC_{ME_{Pilotfuel}} + C_{F_{Gas}} \cdot SFC_{ME_{Gas}}))}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} +$$

$$+ \frac{(P_{AE} \cdot (C_{F_{Pilotfuel}} \cdot SFC_{AE_{Pilotfuel}} + C_{F_{Gas}} \cdot SFC_{AE_{Gas}}))}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} =$$

$$= \frac{(17900 \cdot (2,75 \cdot 165 + 3,3 \cdot 6,2)) + (1750 \cdot (2,75 \cdot 192 + 3,3 \cdot 6,2))}{1 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 85200 \cdot 19,2 \cdot 1}$$

$$EEDI = 3,85 \text{ г CO}_2/(\text{т} \cdot \text{милю})$$

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						87
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Знайдемо коефіцієнт EEDI після модернізації

$$\sum P_{PTO(i)} = 0,75 \sum_{n_{BF}}^{i=2} P_{BF(i)} = 0,75 \cdot 2 \cdot 1200 = 1800 \text{ кВт}$$

$$\sum_{n_{ME}}^{i=2} P_{ME(i)} = 0,75 \cdot (\sum MCR_{ME(i)} - \sum P_{PTO(i)})$$

$$P_{ME(i)} = 0,75 \cdot MCR_{ME} = 0,75 \cdot 2 \cdot 11850 - 1500 = 15975 \text{ кВт};$$

$$P_{AE} = 0,025 \times \sum_{i=1}^{n_{ME}} MCR_{ME(i)} + 250 + COP_{comp} \times \sum_{i=1}^{n_{ME}} SFC_{ME(i), gas\ mod\ e} \times \frac{P_{ME(i)}}{1000} =$$

$$= 0,025 \cdot 2 \cdot 11850 + 250 + 0,33 \cdot 192 \cdot \frac{16200}{1000} = 1867 \text{ кВт}$$

$$EEDI = \frac{(P_{ME} \times (C_{F_Pilotfuel} \times SFC_{ME_Pilotfuel} + C_{F_Gas} \times SFC_{ME_Gas}))}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} +$$

$$+ \frac{(P_{AE} \times (C_{F_Pilotfuel} \times SFC_{AE_Pilotfuel} + C_{F_Gas} \times SFC_{AE_Gas}))}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} =$$

$$= \frac{(16200 \cdot (2,75 \cdot 170 + 3,3 \cdot 6,2)) + (1672 \cdot (2,75 \cdot 192 + 3,3 \cdot 6,2))}{1 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 85200 \cdot 19,2 \cdot 1}$$

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

Судно прототип	Модернізоване судно
EEDI=3.85 г CO₂/(т·милю)	EEDI=3.62 г CO₂/(т·милю)

7.2. Рекомендацій з впровадження результатів роботи

Розглянуті в даному дипломному проекті модернізаційні заходи можуть бути запроваджені на багатьох типах сучасних суден торгового флоту. За останні два десятиліття у морському секторі спостерігається підвищений інтерес до технології паливних елементів. За цей період було виконано щонайменше 23 проекти. Більшість цих проектів використовують технологію PEMFC, тоді як деякі проекти використовують технології SOFC і MCFC, але в набагато меншому обсязі. Можна зробити висновок, що типи паливних елементів, які використовуються в морському секторі,

демонструють приблизно ту саму тенденцію, що й на світовому ринку паливних елементів.

Запропонована гібридна установка базується на використанні паливних елементів працюючих на водні і це має свої плюси. Зберігання водню в чистому вигляді не є дуже енергоємним рішенням щодо об'єму, навіть якщо воно зберігається при високому тиску або криогенній температурі. Вуглеводневе паливо забезпечує більш щільну альтернативу, яку можна використовувати як паливо або безпосередньо в деяких типах паливних елементів, або в більшості випадків шляхом впровадження процесу реформування палива перед паливним елементом для очищення палива до газу, багатого воднем. Можна використовувати різні палива, що містять водень, наприклад: метанол, етанол, DME, LNG і дизельне паливо.

Гібридна установка в купі із валогенератором дає дуже велику перевагу в плані відповідності екологічним нормам, особливо актуально це стає у портах де висувуються вищі вимоги по шкідливим викидам. На таких режимах роботи можна повністю вимикати головний двигун і використовувати гібридну установку яка передає енергію на валогенератор а далі гвинт і повністю виключити шкідливі викиди.

Менш затратним, але не менш корисним є використання насадки перед гвинтом, що зменшує витрату палива до 3-4%, в рамках великих торгових суден це приносить вже відчутні дивіденди в перші ж роки використання. Сам процес встановлення насадки займає відносно мало часу і є досить дешевим. Судновласник може легко встановити насадку в момент коли робиться планове обслуговування судна (чистка корпусу, фарбування, заміна анодів).

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						89
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОК

У виконаній дипломній роботі було запропоновано заходи для підвищення ефективності пропульсивного комплексу судна та модернізація ГД. Встановлення насадки перед гвинтом і на нього також покращує ефективність пропульсивної установки, шляхом зменшення турбулентних потоків у районі гвинта, що в кінцевому результаті також дозволяє економити паливо в межах 5–8%.

До проєкту включено розгляд інноваційних рішень — роторних вітрил та системи Wake Equalizing Duct (WED), які сприяють зниженню витрат палива та покращенню гідродинаміки судна. Вітрила на ефекті Магнуса зменшують опір руху, а WED покращує потік до гребного гвинта, підвищуючи ККД. Їх впровадження є доцільним як для модернізації, так і для проєктування наступного судна серії.

Впровадження вищезазначених заходів забезпечить відповідність судна та енергетичної установки діючим вимогам ІМО. EEDI = 3.62 г CO₂/(т·милю).

Загальний ефект від впровадження вищезгаданих заходів очікується на рівні 12-15% в порівнянні із поточним судном.

Як ми бачимо, навіть досить нове судно можна зробити більш ефективним і зменшити собівартість перевезення тони вантажу.

Таким чином, проєкт демонструє, що впровадження сучасного обладнання, автоматизованих систем управління та екологічних технологій забезпечує енергоефективність, зниження експлуатаційних витрат та відповідність судна Flex Aurora міжнародним стандартам і перспективним вимогам ІМО.

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						90
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних літературних джерел

1. <https://www.imo.org/>
2. Significant Ship 2020
3. Артемов Г.А., Горбов В.М. Суднові енергетичні установки: Навчальний посібник [Текст] – Миколаїв, УДМТУ, 2002. – 356с. 2. Горбов В.М.
4. <https://www.marinetraffic.com>
5. <https://www.vesselfinder.com>
6. <https://www.alfalaval.com/products/process-solutions/ballast-water-management-system/pureballast-3/>
7. <https://ua.kuehne-nagel.com/uk/-/znannya/morski-perevezennya/normi-solas-vgm>
8. <https://www.emigreen.eu/all-one-needs-to-know-regarding-selective-catalytic-reduction/>
9. <https://khinzawshwecom.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/04/1d-fresh-water-generator-alfa-laval-93.pdf>
10. https://hindustanuniv.ac.in/assets/naac/CA/1_3_4/1508_V_Chandra_Sekhar.pdf
11. <https://www.tespl.com/blog/WHRS-and-PP-for-Cement-Plants.php>
12. https://www.researchgate.net/figure/Overview-of-the-WHR-system-with-TEG-at-gas-power-plant-36-a-system-overview-b_fig2_382263168
13. Шостак В.П. Проектирование пропульсивной установки судов с прямой передачей мощности на винт/ Под ред. Шостака В.П. - Николаев: НКИ, 2003.–500 с
14. Проектування пропульсивної установки суден з прямою передачею потужності на гвинт/за ред. В.П. Шостака: Навчальний посібник. – Миколаїв: УДМТУ, 2003.
15. <https://www.marineinsight.com/tech/generator/understanding-different-operational-modes-of-shaft-generator-on-ships/>
16. <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/8/2833>
17. <https://www.kongsberg.com/maritime/products/electrical-power-system/energy-solutions/dual-hybrid-solution/>

18. Горбов В.М. Оцінка енергоефективності морського судна: методичні рекомендації до виконання розділу випускної кваліфікаційної роботи / В.М. Горбов, В.С. Мітенкова, Є.В. Білоусов, В.П. Савчук. Херсон: ХДМА, 2019. — 68 с.
19. <https://www.kongsberg.com/maritime/products/electrical-power-system/energy-products/low-voltage-drive/hybrid-shaft-generator/>
20. <https://www.electroengineer.info/2024/07/excitation-of-the-shaft-generator.html>
21. <https://wingd.com/products-solutions/engines/x72df-21>
22. [https://wingd.com/documents/x72df-2-1/engine-installation/mim/marine-installation-manual-\(mim\)](https://wingd.com/documents/x72df-2-1/engine-installation/mim/marine-installation-manual-(mim))
23. <https://www.mdpi.com/2077-1312/12/2/335>

					КР.ОП135.6211м.04.ПЗ	Арк.
						92
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		