

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Машинобудівний навчально-науковий інститут

Кафедра двигунів
внутрішнього згоряння,
установок та технічної
експлуатації

«Допущений до захисту»
Завідувач кафедри
Олексій ГОГОРЕНКО

« ____ » _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ПОКРАЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ
ПАЛИВНИХ ФОРСУНОК ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО КЛАПАНУ

Спеціальність 142 – Енергетичне машинобудування

Освітня програма – Двигуни внутрішнього згоряння

Для здобуття другого (магістерського) рівня вищої освіти

Керівник роботи



Борис ТИМОШЕВСЬКИЙ

Здобувач освіти



В'ячеслав ОЧЕРЕТЯНИЙ

Миколаїв 2025

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Інститут, факультет Машинобудівний навчально-науковий
Кафедра Двигунів внутрішнього згорання, установок та технічної експлуатації
Ступінь Магістр
Спеціальність 142 Енергетичне машинобудування
(шифр і назва)
Освітня програма Двигуни внутрішнього згорання

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

 Олексій ГОГОРЕНКО

« » 20 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧЕВІ ОСВІТИ

Очеретяний В'ячеслав Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Покращення експлуатаційних показників роботи паливних форсунок шляхом використання електромагнітного клапану
2. Керівник роботи д.т.н., проф. Тимошевський Б.Г.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом закладу вищої освіти від “___” _____ 20__ року № _____
3. Строк подання здобувачем роботи _____
4. Вихідні дані до роботи Двигун – 6ЧН 14,4/16,5 (Volvo Penta D16MG); паливо – дизельне; потужність двигуна – 450 кВт, частота обертання колінчастого валу – 1500 хв⁻¹
5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Особливості застосування двигуна 6ЧН 14,4/16,5 на поромі Peter Fraser; Сучасні напрямки вдосконалення паливних форсунок високообертових суднових двигунів; Вдосконалення паливних форсунок двигуна 6ЧН 14,4/16,5; Забезпечення вимог охорони праці; Економічне обґрунтування
6. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Загальний вид порому Peter Fraser; Поперечний переріз двигуна 6ЧН 14,4/16,5; Схема паливної системи; Паливна форсунка; Електромагнітний клапан форсунки

7. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

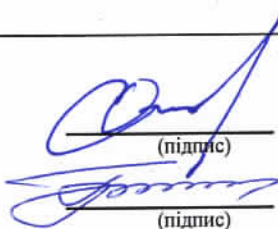
8. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Оформлення 1 розділу		
2	Оформлення 2 розділу		
3	Оформлення 3 розділу		
4	Оформлення 4 розділу		
5	Оформлення 5 розділу		
6	Оформлення креслень		

Здобувач освіти

Керівник роботи



(підпис)

В'ячеслав ОЧЕРЕТЯНИЙ
(прізвище та ініціали)

Борис ТИМОШЕВСЬКИЙ
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

В кваліфікаційній роботі розроблений комплекс заходів щодо покращення експлуатаційних показників роботи паливних форсунок суднового високообертового двигуна шляхом використання електромагнітного клапану. Розглянуто економічне обґрунтування. Наведені заходи щодо забезпечення охорони праці.

Кваліфікаційна робота виконана українською мовою на 70 сторінках розрахунково-пояснювальної записки. Використано 9 джерел. Графічна частина представлена на 5 кресленнях формату А1.

Ключові слова: паром, високообертовий двигун, форсунка, електромагнітний клапан.

The qualification work presents a set of measures to improve the operational performance of fuel injectors in high-speed marine engines through the use of electromagnetic valves. The economic justification was considered. Measures to ensure occupational safety are also provided.

The qualification work is executed in Ukrainian language on 70 pages of explanatory note. 9 sources are used. The graphic part is presented on 5 drawings of format A1.

Key words: ferry, high-speed engine, nozzle, electromagnetic valve.

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						2
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Розділ 1. Особливості застосування двигуна 6ЧН 14,4/16,5 на поромі Peter Fraser.....	5
Розділ 2. Сучасні напрямки вдосконалення паливних форсунок високообертових суднових двигунів.....	25
Розділ 3. Вдосконалення паливних форсунок двигуна 6ЧН 14,4/16,5.....	44
Розділ 4. Економічне обґрунтування.....	59
Розділ 5. Забезпечення вимог охорони праці.....	63
Висновки.....	68
Список використаної літератури.....	70
Додаток А. Загальний вид порому Peter Fraser.....	71
Додаток Б. Поперечний переріз двигуна 6ЧН 14,4/16,5.....	72
Додаток В. Схема паливної системи.....	73
Додаток Г. Паливна форсунка.....	74
Додаток Д. Електромагнітний клапан форсунки.....	75

ВСТУП

Сучасні дизельні двигуни внутрішнього згоряння відіграють ключову роль у транспортній, енергетичній та виробничій сферах економіки. У зв'язку з постійним зростанням вимог до екологічності, ефективності та економічності роботи двигунів значного значення набуває оптимізація процесів подачі та розпилення палива. Саме паливні форсунки, як основний елемент системи впорскування палива, безпосередньо впливають на формування суміші, характер процесу згоряння, питомі витрати палива та рівень шкідливих викидів.

Мета даної роботи – покращення показників роботи паливних форсунок суднового високообертового двигуна.

Задачі що вирішуються у роботі:

1. Аналіз сучасних конструкцій паливних форсунок високообертових двигунів.
2. Вдосконалення паливних форсунок.
3. Оцінка запропонованих рішень, технічні рекомендації та заходи з техніки безпеки.

Об'єкт дослідження – паливні форсунки.

Предмет дослідження – показники роботи паливних форсунок.

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						4
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1
ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДВИГУНА 6ЧН 14,4/16,5 НА
ПАРОМІ PETER FRASER

Опис порому Peter Fraser

Один із багатьох проєктів 2013 року, спрямованих на впровадження екологічно чистих морських технологій, це гібридний річковий пором Peter Fraser (рис. 1.1 – 1.2, табл. 1.1), який є даниною як дизайнерській майстерності компанії Navtech, так і екологічній відданості Канади збереженню своїх водних шляхів і річок вільними від надмірних викидів вуглецю.

Побудований у межах програми CAD\$10 млн (US\$9,5 млн), причому ці кошти були безпосередньо інвестовані урядом провінції Квебек, пором Peter Fraser згодом був спроектований для експлуатації на мілководдях уздовж річки Святого Лаврентія, забезпечуючи сполучення між муніципалітетами Квебеку Іль-Верт і Нотр-Дам-де-Септ-Дулор, при цьому експлуатацію здійснює туристичний оператор Société des traversiers du Québec.

Він увійшов в історію як перший у Північній і Південній Америці пасажирсько-автомобільний пором типу ро-ро, що повноцінно застосував гібридну дизель-електричну систему з літій-іонними акумуляторами як джерелом енергії. Судно завдовжки 33 м має місткість до 70 пасажирів і 12 автомобілів; останні поділяються на категорії, що включають 10 легкових автомобілів середнього розміру довжиною 5,7 м, а також два субкомпактні автомобілі довжиною 4,5 м. Крім того, на борт може бути прийнята вантажівка або причіп.

Допустиме навантаження на центральну лінію становить 13 тонн на кожну вісь, тоді як бокове навантаження на лівому борту судна оцінюється приблизно в 2,5 тонни на вісь [1].

					<i>KPM.142.6221мз.25.09.00.ПЗ</i>	Аркуш
						5
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд порому Peter Fraser

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		6

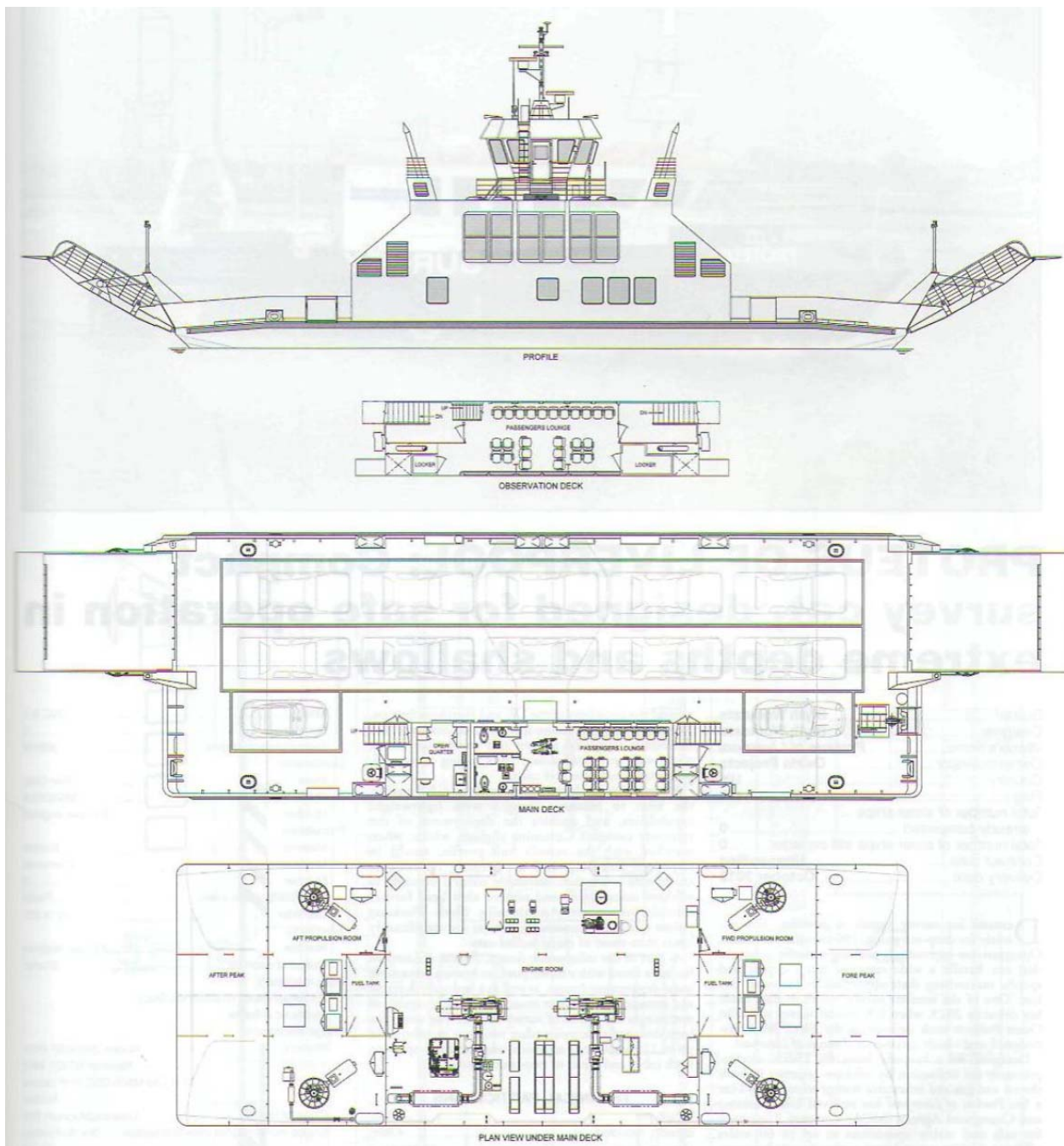


Рисунок 1.2 – Пором Peter Fraser

Peter Fraser має два пасажирські салони по 25 місць: один розташований поруч із двома санвузлами та під'єднаний до установки очищення стічних вод; інший обладнаний скляними стінами, що забезпечують широкий панорамний огляд зовнішнього простору.

Таблиця 1.1 – Головні характеристики порому

Параметр	Значення
Довжина максимальна, м	33,60
Довжина між перпендикулярами, м	32,23
Висота до палуби, м	2,25
Ширина найбільша, м	12,00
Проектна осадка, м	1,1
Дедвейт, т	125
Швидкість судна, вуз	10

Приміщення екіпажу розташовані на головній палубі та додатково оснащені системою аварійної сигналізації з індикацією для підвищення рівня безпеки.

Енергетична установка судна може працювати або від двох дизель-генераторів Volvo Penta D16 MG потужністю 450 кВт кожен, або від акумуляторної батареї ємністю 400 кВт·год, виготовленої компанією EсоPower. Гібридну електричну та керувальну систему було спроектовано, поставлено й змонтовано компанією Techsol Marine, яку у 2011 році придбав європейський постачальник технологічних рішень Imtech Marine.

Пором спеціально розроблений для роботи на мілководдях і має посилене днище для додаткового захисту, особливо під час швартування за низької води. Морські випробування показали, що осадка Peter Fraser у робочому стані становить 0,85 м при перевезенні 30 тонн корисного навантаження і збільшується до 1,1 м при навантаженні 110 тонн.

Маневровість судна оптимізована завдяки чотирьом рушіям Schottel SPJ 57 RD, кожен з яких приводиться в дію електродвигуном АВВ потужністю 220 кВт і керується з поста судноводія двома джойстиками.

Хоча раніше комерційна доцільність акумуляторних енергетичних систем могла викликати сумніви, такі судна, як Peter Fraser, доводять, що

					KPM.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						8
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

досягнення балансу між економічною ефективністю та екологічною відповідальністю є цілком реальним.

Опис двигуна 6ЧН 14,4/16,5 (Volvo Penta D16MG)

Системи дизель-генераторних установок Volvo Penta Genset є комплексним рішенням для забезпечення всіх потреб судна в електроенергії. Замовник отримує не лише надійні суднові дизельні двигуни, оптимально підібрані генератори та систему моніторингу, а й широкий спектр продукції та сервісних послуг для максимального підвищення ефективності інвестицій.

Кожна дизель-генераторна установка Volvo Penta Genset виготовляється на заводі Volvo з повною адаптацією до вимог конкретного замовника та постачається у зібраному, повністю випробуваному вигляді, готовому до монтажу на борту судна.

Основою дизель-генераторних установок Volvo Penta є плавнохідні та надійні суднові дизельні двигуни. Завдяки компактній конструкції вони займають менше місця в машинному відділенні, а зручний доступ до вузлів і агрегатів значно спрощує технічне обслуговування та ремонт. Системи автоматичного пуску й синхронізації працюють швидко та надійно, з комфортним запасом відповідаючи всім чинним стандартам.

Усі дизель-генераторні установки Volvo Penta Genset мають типові схвалення провідних класифікаційних товариств і можуть постачатися з повним пакетом сертифікаційної документації.

Двигуни Volvo Penta добре збалансовані та характеризуються відмінними показниками щодо викидів шкідливих речовин. У зв'язку з посиленням уваги до охорони довкілля в усьому світі вимоги до екологічних показників стають дедалі жорсткішими [2].

Двигун 6ЧН 14,4/16,5 (Volvo Penta D16MG) (рис. 1.3 – 1.4) сертифікований на відповідність вимогам ІМО щодо обмеження викидів NO_x,

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ІІЗ	Аркуш
						9
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

а також комплексним нормам з екологічності відповідно до стандартів ЕРА Tier 2, EU IWW та CCNR Stage 2.

Базова конструкція двигуна Volvo у поєднанні з високоефективною системою регулювання частоти обертання забезпечує відмінну здатність до швидкого приймання навантаження та стабільну роботу в перехідних режимах.

Усі стандартні дизель-генераторні установки оснащуються генераторами виробництва Newage Stamford. Stamford є лідером ринку в цьому діапазоні потужностей і забезпечує глобальне сервісне обслуговування по всьому світу. Ці генератори мають перевірену часом конструкцію, що базується на багаторічному досвіді у сфері виробництва електроенергії для наземних і морських застосувань.

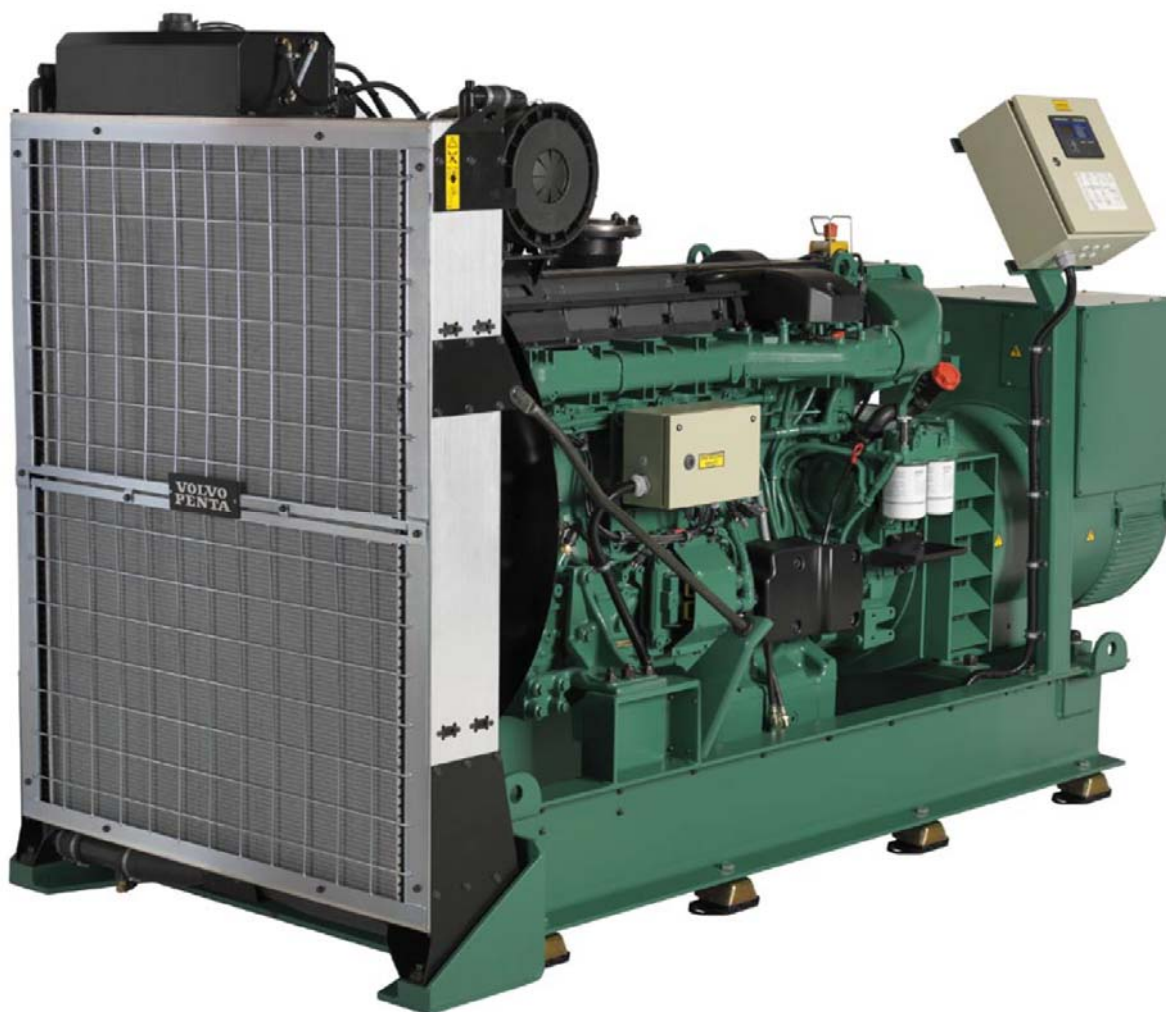


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд двигуна 6ЧН 16/24

					<i>KPM.142.6221мз.25.09.00.ПЗ</i>	Аркуш
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		10

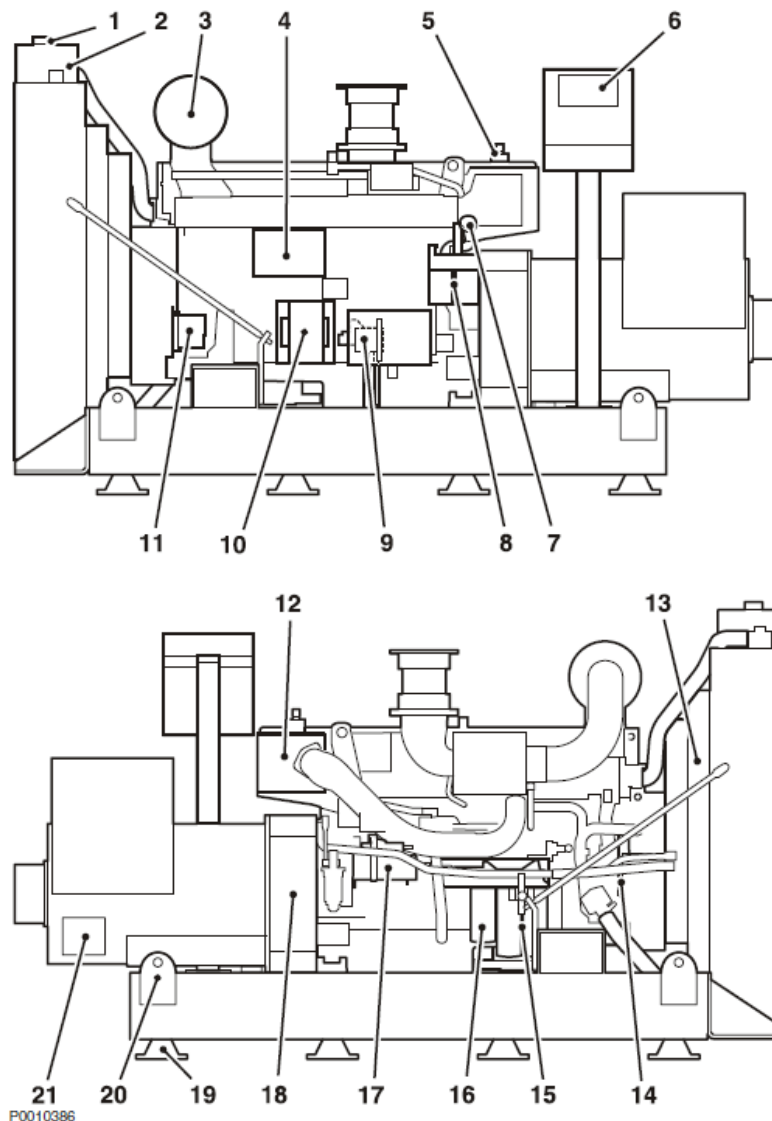


Рисунок 1.4 – Розташування основних елементів БЧН 16/24:

1 – заливна горловина охолоджувальної рідини; 2 – розширювальний бачок;
 3 – повітряний фільтр; 4 – електрична з'єднувальна коробка з кнопкою скидання SD; 5 – кнопка аварійної зупинки; 6 – з'єднувальна коробка MCU з панеллю; 7 – заливна горловина мастильного масла; 8 – перемики паливні фільтри; 9 – запірний паливний клапан; 10 – блок керування двигуном; 11 – генератор змінного струму; 12 – охолоджувач наддувного повітря; 13 – радіатор; 14 – насос прісної води; 15 – масляні фільтри двигуна; 16 – байпасний масляний фільтр двигуна; 17 – електричний стартер з допоміжною кнопкою пуску; 18 – вихід повітря генератора; 19 – гнучке кріплення; 20 – вушко для підймання; 21 – вхід повітря генератора

Двигун виконаний за схемою рядного шестициліндрового агрегату. За принципом роботи це чотиритактний дизельний двигун з безпосереднім упорскуванням палива, турбонаддувом та охолоджувачем наддувного повітря. Діаметр циліндра і хід поршня становлять 144 мм, робочий об'єм двигуна дорівнює 16,12 л, а ступінь стиску складає 17,5:1.

Блок картер (рис. 1.5) виготовлений із чавуну та відлитий єдиним цілісним елементом. Бічні стінки блоку мають арочну форму навколо кожного циліндра, що забезпечує високу жорсткість конструкції та ефективне зниження рівня шуму. Усі канали системи змащування механічно оброблені безпосередньо в тілі блоку.

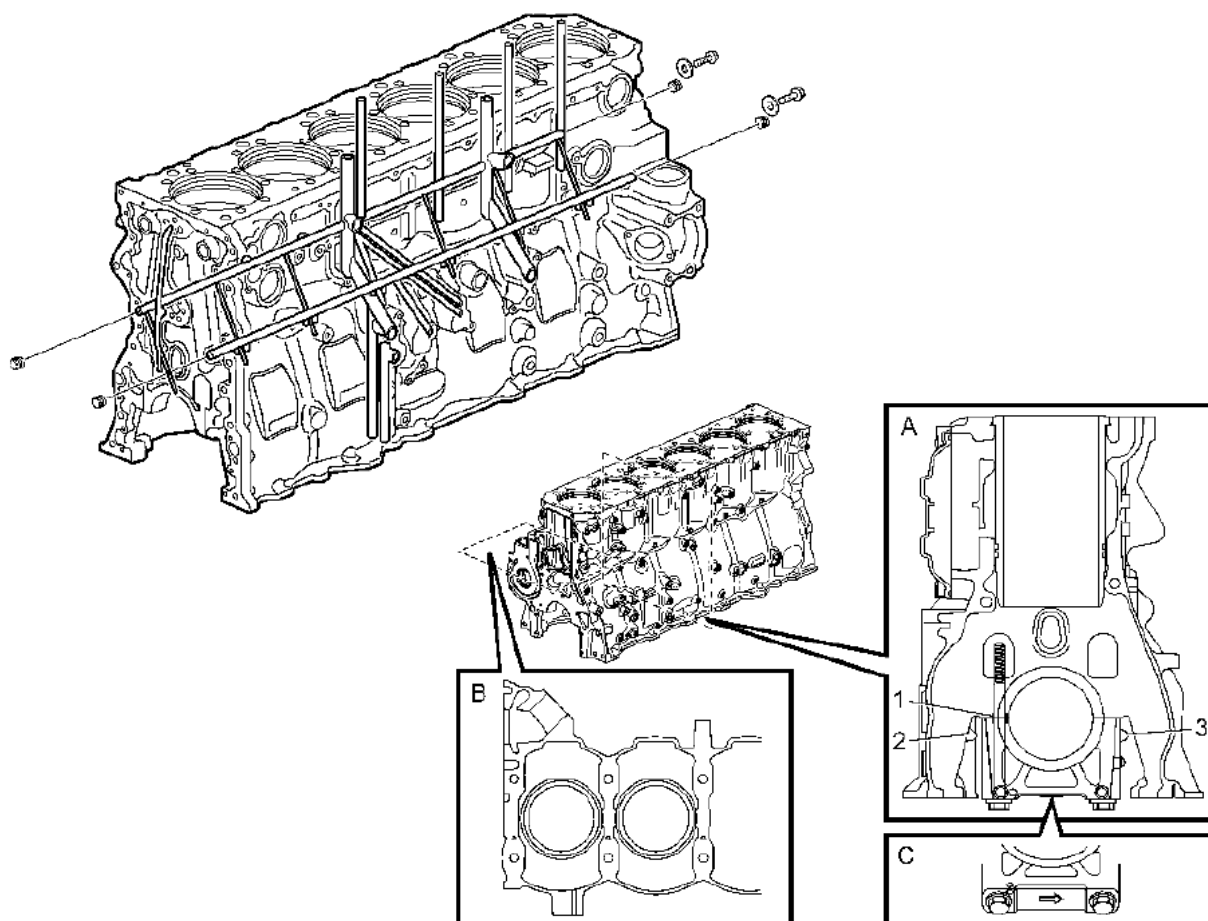


Рисунок 1.5 – Блок-картер

Передбачено два поздовжні масляні канали: канал охолодження поршнів розташований з правого боку, а головний канал подачі мастила – з

лівого боку. Канали герметично закриті спереду та ззаду, а на задній торцевій поверхні додатково виконаний канал подачі мастила до механізму газорозподілу.

Для зменшення вібрацій і, відповідно, зниження шуму роботи двигуна, до нижньої частини блоку встановлено підсилювальну раму. Масляний картер виготовлений із пластмаси та кріпиться за допомогою пружинних болтів. Ущільнення між блоком циліндрів і картером виконане у вигляді цільної гумової стрічки, встановленої в спеціальний паз у піддоні.

Кришки корінних підшипників центруються за допомогою запресованих втулок у блоці циліндрів. Для запобігання помилковому монтажу кришки мають нумерацію від 1 до 7 і литі виступи як на блоці, так і на самих кришках. На нижній поверхні кришок нанесені стрілки, які під час встановлення повинні бути спрямовані у бік впускної сторони двигуна.

Прокладка головки циліндрів виготовлена зі сталі та містить вулканізовані гумові ущільнення для каналів мастила й охолоджувальної рідини. Крім того, прокладка має низку опуклих штампованих елементів, які забезпечують можливість незначного ковзання головки циліндрів по прокладці під час монтажу та запобігають пошкодженню гумових ущільнювальних кілець.

Головка циліндрів (рис. 1.6) відлита єдиним цілим із чавунного сплаву, що забезпечує стійку та надійну опору для верхнього розподільного вала. Корпус термостата інтегрований безпосередньо в головку циліндрів (А). Для кожного циліндра передбачені окремі впускні та випускні канали з перехресною схемою газообміну (crossflow) (В), що покращує наповнення та продування циліндрів.

Паливний канал до насос-форсунок просвердлений поздовжньо через головку циліндрів і має кільцеподібний простір навколо кожної насос-форсунки (С). Подача мастила під тиском до механізму коромисел може здійснюватися через канал у заглушці (D). Для змащування розподільного

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						13
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

вала та коромисел у центральній частині лівого боку головки циліндрів виконано окремий мастильний канал (Е).

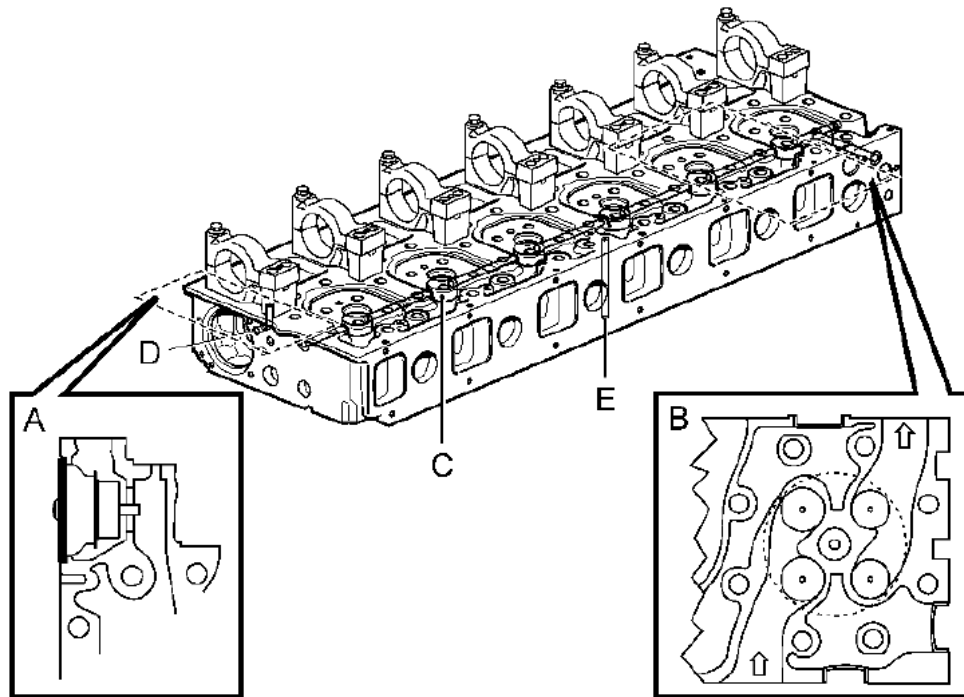


Рисунок 1.6 – Головка циліндрів

Напрямні клапанів виготовлені з легованого чавуну; усі вони оснащені ущільненнями стрижнів клапанів (маслознімними ковпачками). Сідла клапанів змінні, що підвищує ремонтпридатність і довговічність головки циліндрів.

Блок циліндрів оснащений мокрими змінними втулками (рис. 1.7), які виготовлені з чавунного сплаву методом відцентрового лиття. Простір охолоджувальної рідини навколо втулок циліндрів герметизується відносно блоку трьома ущільнювальними кільцями. Верхня частина ущільнюється кільцем, розташованим під буртом втулки. Нижня частина втулки циліндра ущільнюється двома гумовими кільцями: верхнє, розташоване ближче до охолоджувальної рідини, має чорний колір, а нижнє, з боку мастила, – фіолетовий.

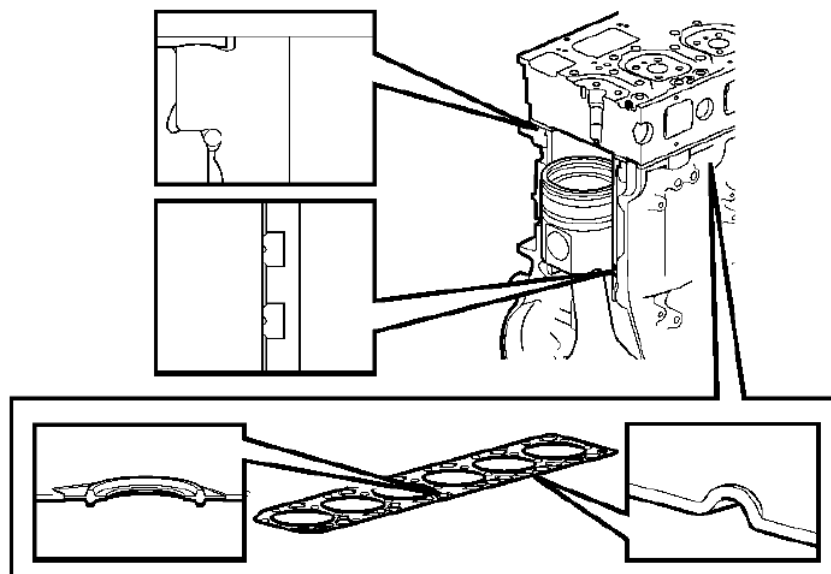


Рисунок 1.7 – Втулка циліндрів

Поршні (рис. 1.8) виготовлені з алюмінію та оснащені трьома поршневими кільцями. Верхнє компресійне кільце має клиноподібний (типу «Keystone») профіль, друге компресійне кільце виконане прямокутної форми, а нижнє кільце є пружинним маслознімним кільцем.

Шатуни (рис. 1.8) виготовлені методом кування, при цьому нижня головка виконана за технологією «fracture-split», тобто розділена по плоскій необробленій поверхні. Верхня головка шатуна оснащена запресованою втулкою, яка змащується через просвердлений канал у тілі шатуна.

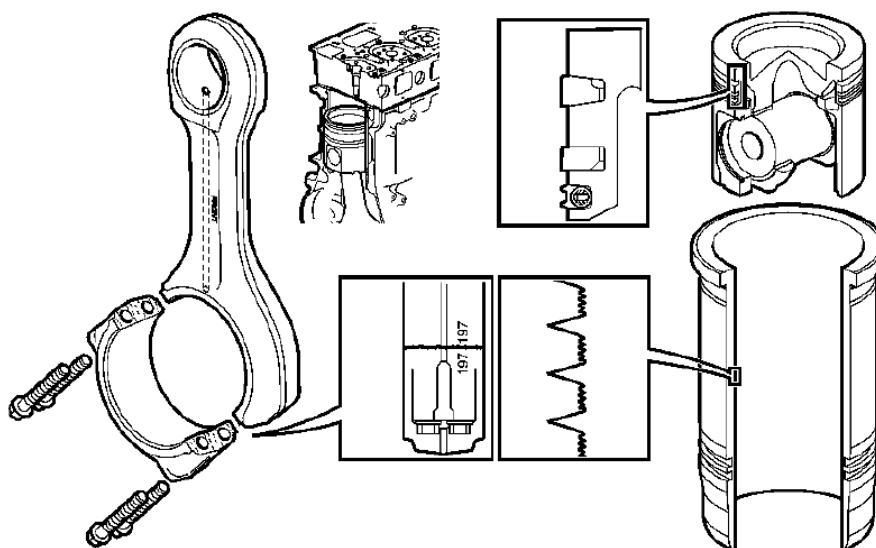


Рисунок 1.8 – Шатунно-поршнева група

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ

Аркуш

15

Колінчастий вал (рис. 1.9) виготовлений методом штампування з однієї заготовки, а його опорні поверхні підшипників індукційно загартовані, що підвищує міцність і знижує ризик утворення тріщин. Колінчастий вал має сім корінних підшипників, при цьому кожна шатунна шийка розташована між двома корінними підшипниками. Упорні півкільця встановлені на середньому корінному підшипнику.

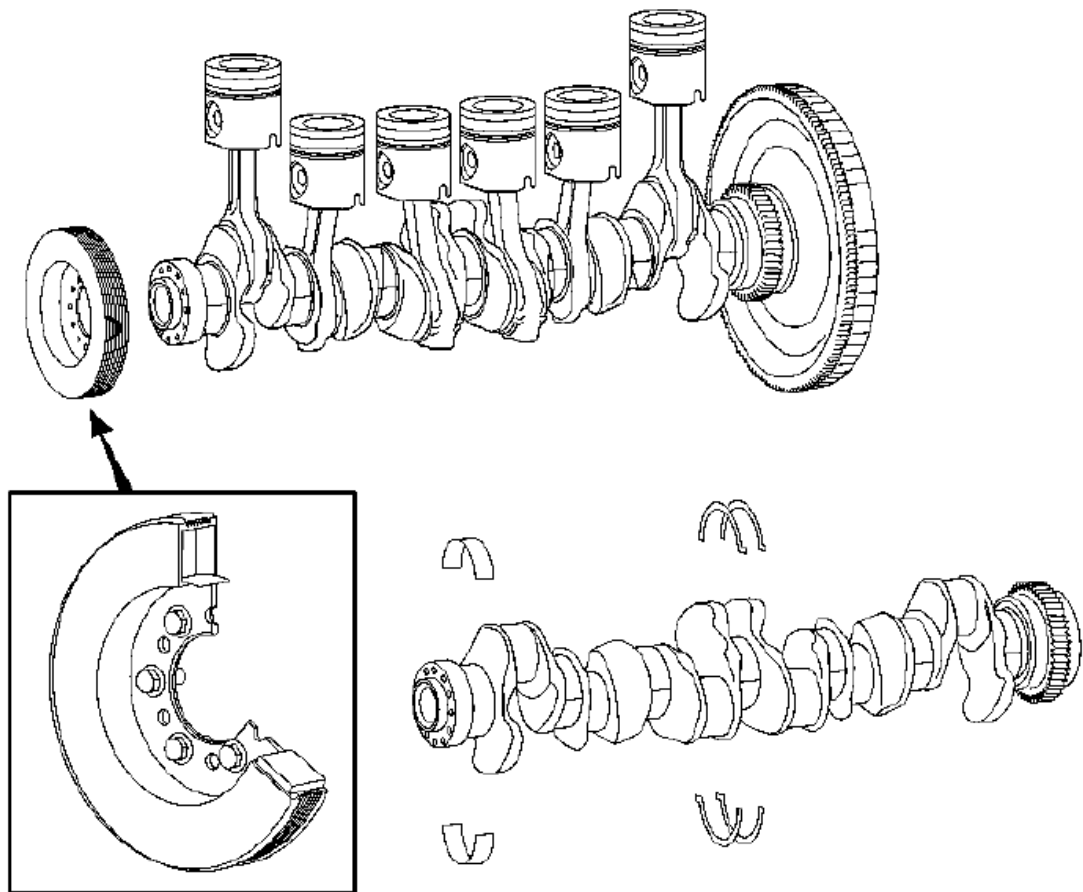


Рисунок 1.9 – Колінчастий вал

Як корінні, так і шатунні підшипники мають сталеві вкладиші, покриті свинцево-нікелевим шаром та облицьовані свинцевою бронзою. Колінчастий вал допускає шліфування на всі ремонтні розміри без повторного загартування.

Колінчастий вал оснащений інтегрованою маточиною для приводу шестерень механізму газорозподілу (з боку маховика) та для демпфера крутильних коливань / ремінного шківа (з переднього боку). На передньому

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						16
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

торці блоку циліндрів встановлена кришка з тефлоновим ущільненням, яке герметизує передній кінець колінчастого вала; ущільнення має зовнішню фетрову вставку, що виконує функцію пилозахисту.

Корпус вібраційного демпфера містить вільно обертове сталеве кільце, яке слугує інерційною масою. Простір між сталевим кільцем і корпусом демпфера заповнений високов'язкою силіконовою оливою. Коливання гасяться за рахунок дії оливи, що згладжує пульсуючий рух колінчастого вала та забезпечує рівномірний рух сталевого кільця.

Шестерня колінчастого вала встановлюється на задньому кінці вала. Напрямний штифт у шестерні входить у відповідний отвір колінчастого вала, що унеможливорює неправильне встановлення. На торці колінчастого вала розміщене О-подібне ущільнювальне кільце, яке герметизує з'єднання між колінчастим валом і шестернями газорозподілу.

Механізм газорозподілу оточений комбінованою кришкою шестерень газорозподілу / кришкою маховика, при цьому тефлонове ущільнення забезпечує герметичність між кришкою та колінчастим валом. Напрямний штифт колінчастого вала заходить у маховик, завдяки чому маховик може бути встановлений лише в одному положенні. Болти кріплення маховика затягуються через шестерню колінчастого вала безпосередньо до вала.

Маховик має ряд механічно оброблених канавок, призначених для датчика частоти обертання та положення системи керування двигуном. Змащування здійснюється через окремі масляні канали в блоці циліндрів до кожного корінного підшипника, а звідти – через канали до найближчої шатунної шийки.

Розподільний вал (рис. 1.10) є верхнім (ОНС) та має індукційно загартовані робочі поверхні. Опорні шийки розподільного вала допускають шліфування з подальшим установленням змінних вкладишів підшипників. Вал спирається на сім опорних корпусів підшипників, які розточені по одній осі та

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						17
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

пронумеровані від 1 до 7, починаючи з переднього торця двигуна; при цьому задній підшипник виконує функцію упорного.

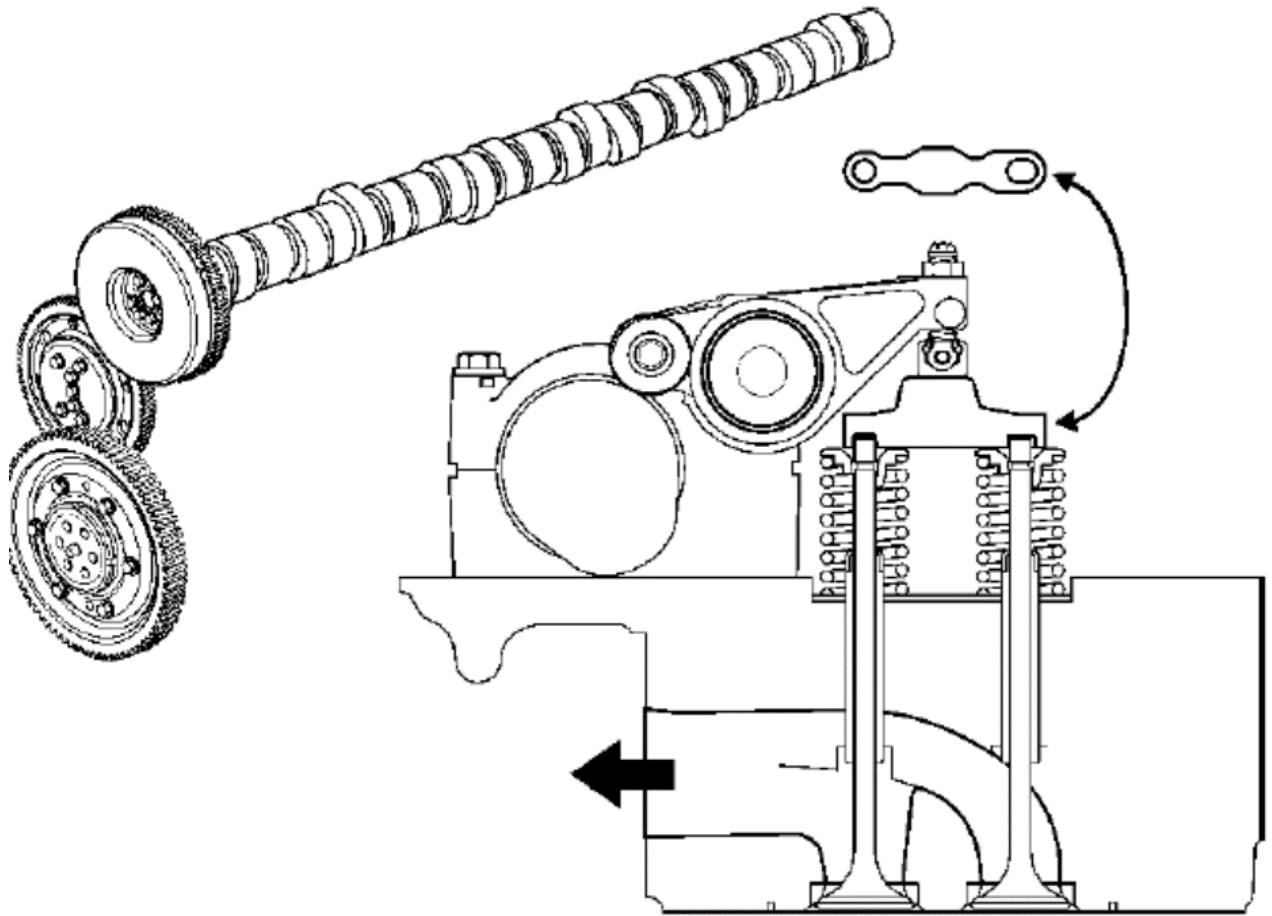


Рисунок 1.10 – Газорозподільний механізм

На кожний циліндр припадає три кулачки розподільного вала: один для впускних клапанів, один для випускних клапанів і середній кулачок для приводу насоса. Шестерня розподільного вала встановлюється на задньому фланці вала, а з зовнішнього боку розміщується гідравлічний демпфер крутильних коливань. Як шестерня розподільного вала, так і демпфер мають отвори під напрямний штифт, встановлений у розподільному валі, що унеможливорює неправильне складання. На демпфері виконані зубці, які формують сигнали для датчика положення розподільного вала.

Перед корпусом заднього підшипника розміщена фланцева мітка розподільного вала з числовими позначеннями 1–6 та міткою BMT (TDC).

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						18
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Мітка ВМТ використовується для базового встановлення розподільного вала і повинна знаходитися між двома мітками на корпусі підшипника, коли маховик встановлений на позначці 0°. Числові позначення застосовуються під час регулювання клапанів і насосу.

Вал коромисел з установленими на ньому коромислами, що спираються на запресовані сталеві втулки з поверхневою термообробкою, закріплюється болтами до кришок підшипників розподільного вала. Рух від коромисел до клапанів передається через клапанний місток (йок). Коромисло має ролик, який контактує з кулачком розподільного вала, а також кульову опору з регулювальним гвинтом, що взаємодіє з клапанним містком.

Випускні клапани приводяться в дію через клапанний місток із застосуванням напрямного пальця, тоді як впускні клапани працюють через плаваючий клапанний місток (без напрямного пальця). Випускні клапани оснащені подвійними клапанними пружинами.

Напрямні клапанів виготовлені з легованого чавуну, а сідла клапанів – зі сталі; обидва елементи є змінними. Усі напрямні клапанів оснащені ущільненнями стрижнів клапанів (маслознімними ковпачками).

Двигун оснащений *системою змащування* (рис. 1.11) під тиском, у якій подача мастила здійснюється шестеренним насосом, з'єднаним із шестернями газорозподільного механізму. Потік мастила регулюється сімома клапанами.

Мастильний насос приводиться в дію безпосередньо від шестерні колінчастого вала та подає мастило під тиском до двох повнопотокових фільтрів і байпасного фільтра. Байпасний фільтр характеризується невеликою витратою, але високим ступенем очищення мастила.

У блоці циліндрів уздовж його довжини просвердлено два канали. Канал, розташований з лівого боку блоку, є головним мастильним каналом, який забезпечує подачу мастила до всіх підшипників кривошипно-шатунного механізму; цей канал заглушений як спереду, так і ззаду. Інший канал, розміщений з правого боку блоку, є каналом охолодження поршнів і подає

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						19
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

мастило для змащування та охолодження поршнів; він також заглушений з обох кінців.

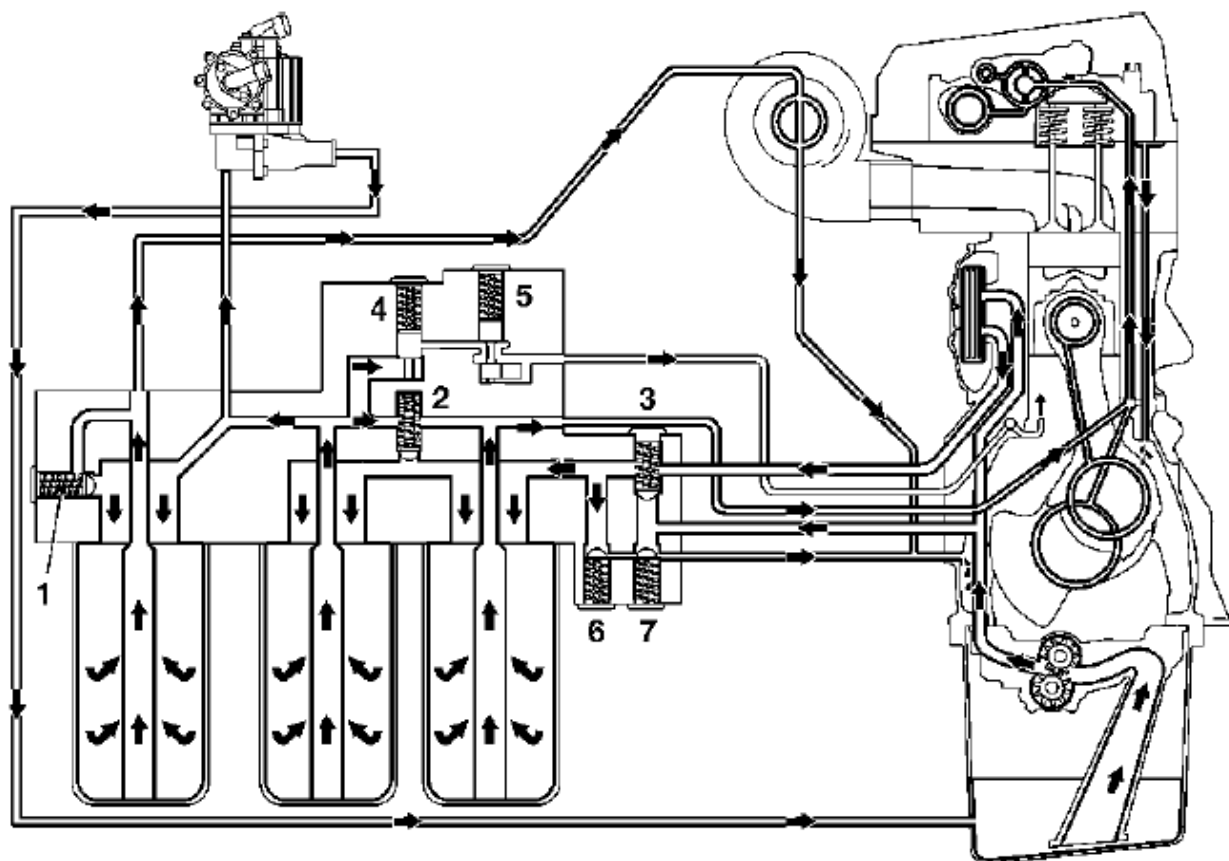


Рисунок 1.11 – Система змащування

Усі підшипники в головці циліндрів змащуються через порожнистий місток коромисел, який з'єднаний з блоком циліндрів литим каналом, розташованим у центральній частині блоку.

Корпус мастильного насоса виготовлений з алюмінію. Насос приводиться в дію безпосередньо від шестерні колінчастого вала. Корпус насоса та дві насосні шестерні підібрані як єдиний комплект і не можуть замінюватися окремо. Вали шестерень насоса спираються безпосередньо в корпусі насоса. Усмоктувальні та напірні трубопроводи виготовлені зі сталі та ущільнюються відносно кришки насоса і корпусу розподілу мастила гумовими ущільненнями.

Корпус насоса прикручений до нижньої частини блоку циліндрів і водночас виконує функцію кронштейна для всмоктувального сітчастого фільтра, який додатково закріплений на підсилювальній рамі. Запобіжний клапан системи змащування розташований у корпусі фільтра.

Масляний охолоджувач виконаний за схемою пластинчастого теплообмінника та розміщений з правого боку двигуна, з внутрішнього боку кришки сорочки охолодження. Охолоджувач занурений в охолоджувальну рідину, що забезпечує ефективне відведення теплоти від мастила.

Турбокомпресор (рис. 1.12) приводиться в дію енергією відпрацьованих газів, які, виходячи із системи випуску, проходять через корпус випускної турбіни. Потік відпрацьованих газів обертає турбінне колесо, яке через спільний вал передає обертання компресорному колесу, встановленому на тому самому валу.

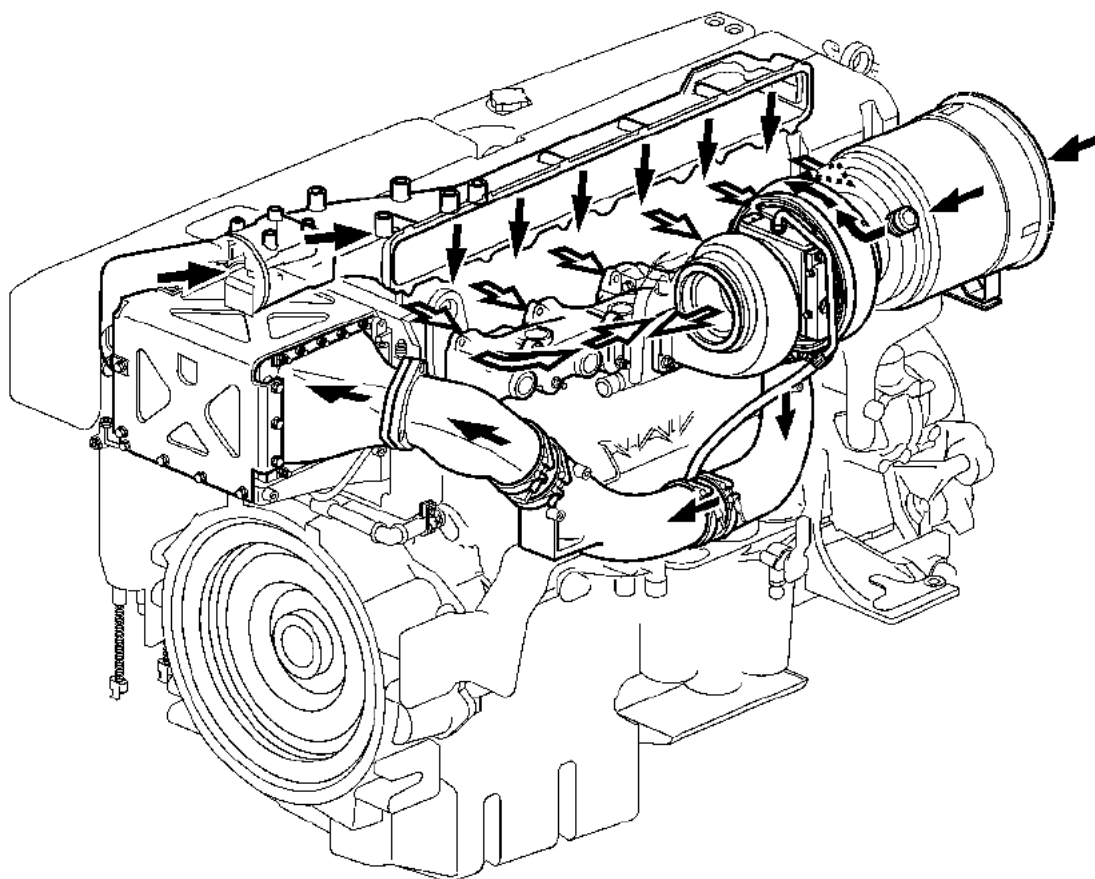


Рисунок 1.12 – Система наддуву

Компресорне колесо розміщене в корпусі, що з'єднаний між повітряним фільтром і охолоджувачем наддувного повітря / впускним колектором двигуна. Під час обертання компресорного колеса повітря всмоктується через повітряний фільтр, стискується та після попереднього охолодження в охолоджувачі наддувного повітря подається в циліндри двигуна, забезпечуючи підвищене наповнення та ефективніший робочий процес.

Система охолодження (рис. 1.13) двигуна поділена на два окремі контури. Внутрішня система охолодження двигуна є закритою системою з прісною водою, у якій температура охолоджувальної рідини регулюється поршневим термостатом.

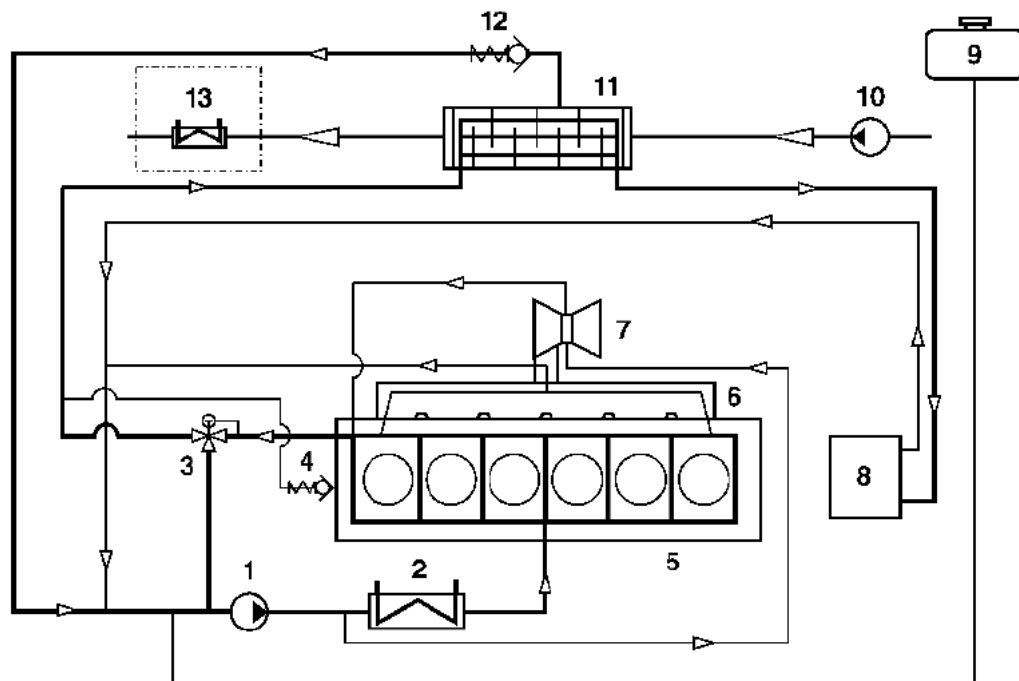


Рисунок 1.13 – Система охолодження:

1 – насос охолоджувальної рідини; 2 – масляний охолоджувач двигуна;
 3 – поршневий термостат; 4 – перепускний клапан; 5 – блок циліндрів /
 головка циліндрів; 6 – випускний колектор; 7 – турбокомпресор;
 8 – охолоджувач наддувного повітря; 9 – розширювальний бачок; 10 – насос
 заборотної води; 11 – теплообмінник; 12 – пріоритетний клапан; 13 – масляний
 охолоджувач реверс-редуктора

Охолоджувальна рідина з теплообмінника подається насосом охолодження у розподільчу сорочку блоку циліндрів, розташовану з правого боку блоку. Частина охолоджувальної рідини надходить у нижню сорочку охолодження гільз циліндрів, однак основна її кількість спрямовується вгору через масляний охолоджувач, а далі – до верхньої сорочки охолодження гільз. Зворотний потік охолоджувальної рідини з сорочки гільз також надходить до головки циліндрів.

Уся охолоджувальна рідина проходить через термостат і, залежно від температури двигуна, або спрямовується до теплообмінника, або повертається назад до насоса охолодження.

На передній частині головки циліндрів розташований пружинний перепускний клапан («клапан холодного пуску»). За умов великого навантаження двигуна та холодного стану двигуна (коли термостат закритий) цей клапан відкривається при заданому тиску охолоджувальної рідини та пропускає певну її кількість в обхід термостата. Завдяки цьому забезпечується циркуляція охолоджувальної рідини в охолоджувачі наддувного повітря, що запобігає його перегріванню.

Система заборотної води є зовнішнім контуром охолодження двигуна. У теплообміннику теплота передається від внутрішнього контуру охолодження двигуна (прісноводної системи) до зовнішнього контуру (заборотної води). Потік охолоджувальної рідини через теплообмінник регулюється пріоритетним клапаном. Двигун також може бути обладнаний системою охолодження через корпус судна (hull cooling). Циркуляція охолоджувальної рідини в замкненій системі здійснюється насосом охолодження двигуна (контур двигуна) або за допомогою окремого крильчатого насоса, встановленого на кришці маховика (контур охолодження наддувного повітря).

В охолоджувачі наддувного повітря (рис. 1.14) теплота від повітря, що надходить у двигун, передається прісноводній системі охолодження двигуна. Охолоджувач розташований над кришкою маховика в задній частині двигуна.

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						23
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

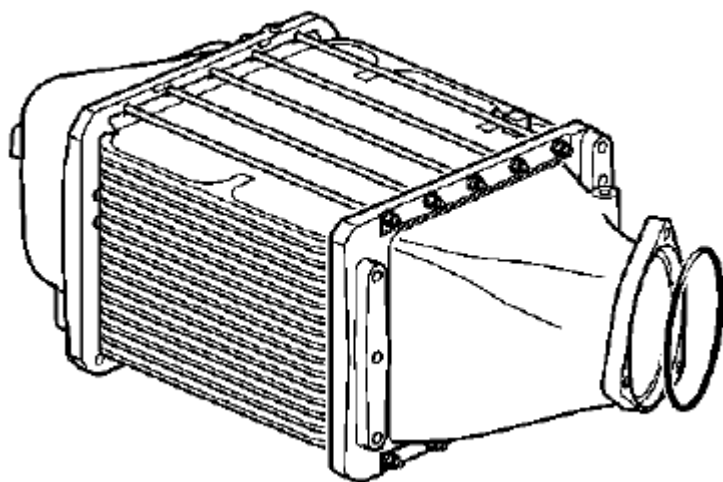


Рисунок 1.14 – ОНВ

Впускне повітря після стискання в турбокомпресорі проходить через охолоджувач наддувного повітря. Охолоджувач знижує температуру повітря, що суттєво покращує наповнення циліндрів, оскільки зменшується об'єм повітря. Завдяки цьому в циліндри двигуна може бути подана більша кількість повітря (кисню), що дає змогу спалювати більшу кількість палива в кожному робочому циклі, а отже, підвищується потужність двигуна. Крім того, охолодження наддувного повітря сприяє зменшенню теплового навантаження на двигун.

РОЗДІЛ 2

СУЧАСНІ НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПАЛИВНИХ ФОРСУНОК ВИСОКООБЕРТОВИХ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ

Сучасні високообертові судові двигуни (дизельні та газодизельні) працюють у режимах, де будь-яке відхилення параметрів упорскування миттєво відображається на економічності, димності, температурній напруженості та ресурсі ЦПГ і турбонаддуву. Тому паливна форсунка сьогодні розглядається не лише як «виконавчий орган» подачі палива, а як високоточний гідромеханічний вузол, що визначає якість сумішоутворення, стабільність згоряння та виконання екологічних вимог ІМО щодо NO_x і частинок. У цьому контексті можна виділити такі сучасні напрямки вдосконалення паливних форсунок високообертових судових двигунів [3].

Розвиток електронно-керованих систем упорскування є одним із базових і найбільш ефективних напрямків удосконалення паливних форсунок високообертових судових двигунів. Для двигунів з частотою обертання 1000–1800 об/хв характерні обмежені часові інтервали сумішоутворення, підвищена чутливість до розкиду циклової подачі та різка реакція на відхилення моменту початку упорскування. У цих умовах традиційні механічні системи впорскування вже не забезпечують необхідної точності, повторюваності та адаптивності, що зумовлює перехід до електронно-керованих рішень.

Сутність електронно-керованого упорскування полягає у відокремленні процесу створення тиску палива від процесу його дозування та впорскування. Тиск формується централізовано (акумуляція у паливній магістралі або рампі), а кожна форсунка керується електронним блоком управління, який задає момент відкривання, тривалість імпульсу та кількість циклових упорскувань. Такий підхід докорінно змінює вимоги до конструкції форсунки,

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

перетворюючи її з пасивного елемента на високошвидкісний виконавчий механізм.

Одним із ключових напрямків удосконалення є підвищення швидкодії електронно-керованих форсунок. У високообертових суднових двигунах тривалість усього процесу упорскування вимірюється мілісекундами, тому будь-яка інерційність рухомих елементів призводить до похибок дозування. Сучасні форсунки оснащуються оптимізованими соленоїдними або п'єзоелектричними приводами з мінімальною масою рухомих деталей, що дозволяє різко скоротити час відкривання та закривання голки розпилювача. Це забезпечує стабільність циклової подачі навіть за режимів частих змін навантаження, характерних для суднових допоміжних і маневрових режимів.

Другим важливим напрямком є реалізація багатофазного упорскування. Електронне керування дозволяє формувати не один, а кілька імпульсів подачі палива протягом одного робочого циклу: попереднє, основне та післяупорскування. Для високообертових суднових двигунів це має принципове значення, оскільки попереднє упорскування зменшує затримку займання і «жорсткість» згоряння, основне – забезпечує формування необхідної потужності, а післяупорскування може використовуватися для стабілізації температурного режиму та зменшення димності. Відповідно, форсунка повинна зберігати точність дозування малих порцій палива і стабільну роботу при багаторазовому відкриванні за дуже короткий проміжок часу.

Наступним напрямком є підвищення точності керування моментом початку упорскування. В електронно-керованих системах цей параметр визначається програмно з урахуванням частоти обертання, навантаження, температури повітря та палива, тиску наддуву й інших факторів. Для форсунок це означає необхідність мінімального розкиду часу реакції між керуючим електричним сигналом і фактичним відкриванням голки. Саме тому сучасні конструкції спрямовані на зменшення гідравлічних затримок у

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						26
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

керуючих порожнинах, оптимізацію каналів підведення палива та стабілізацію характеристик керуючого клапана впродовж усього ресурсу.

Важливим аспектом розвитку електронно-керованих систем упорскування є адаптація форсунок до високих і стабільних тисків палива. Високий тиск упорскування сприяє кращому розпиленню, зменшенню середнього діаметра крапель і більш рівномірному розподілу палива в камері згоряння. Для високообертових суднових двигунів це дозволяє компенсувати дефіцит часу на сумішоутворення. Водночас зростання тиску висуває жорсткі вимоги до міцності корпусу форсунки, зносостійкості голки та сідла, а також до стійкості розпилювача до кавітації та ерозії. Таким чином, розвиток електронно-керованих систем неминуче супроводжується вдосконаленням матеріалів і технологій виготовлення форсунок.

Окремим напрямком є інтеграція електронно-керованих форсунок із системами діагностики та керування технічним станом двигуна. Сучасні алгоритми дозволяють оцінювати непрямі параметри роботи форсунки – відхилення циклової подачі, нерівномірність роботи циліндрів, зміну характеру згоряння – і на цій основі коригувати керуючі сигнали. Для суднових умов це особливо важливо, оскільки дає змогу виявляти деградацію форсунки на ранніх стадіях, запобігати перевантаженню окремих циліндрів і підвищувати загальну надійність силової установки.

Ще одним сучасним напрямком є пристосування електронно-керованих форсунок до роботи з паливами змінної якості та альтернативними паливними сумішами. Високообертові суднові двигуни дедалі частіше експлуатуються в умовах коливань в'язкості, щільності та змащувальної здатності палива. Електронне керування дозволяє оперативно змінювати параметри упорскування, але це можливо лише за умови, що форсунка зберігає стабільну роботу при зміні фізико-хімічних властивостей палива. Тому сучасні конструкції орієнтовані на підвищену стійкість до залипання голки, утворення відкладень і зносу в умовах нестабільного палива.

					<i>KPM.142.6221мз.25.09.00.ПЗ</i>	Аркуш
						27
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Одним із ключових і найбільш наукоємних напрямків удосконалення паливних форсунок високообертових суднових двигунів є **розвиток і оптимізація конструкції розпилювача**. Саме розпилювач визначає характер формування паливного факела, ступінь диспергування палива, глибину проникнення струменя та його взаємодію з повітряним зарядом у камері згоряння. Для високообертових суднових двигунів, у яких процес сумішоутворення відбувається за вкрай обмежений проміжок часу, якість роботи розпилювача безпосередньо впливає на економічність, екологічні показники та термічну напруженість деталей циліндро-поршневої групи.

Першим і базовим напрямком удосконалення є оптимізація геометрії отворів розпилювача. Діаметр, довжина, співвідношення L/D, форма входу та виходу отворів, а також кут їх нахилу відносно осі форсунки підбираються з урахуванням конкретних умов роботи двигуна: частоти обертання, тиску наддуву, форми камери згоряння та інтенсивності завихрення повітря. Для високообертових двигунів характерною проблемою є або надмірне проникнення струменя з подальшим змочуванням стінок камери згоряння, або, навпаки, недостатня дальність факела, що призводить до локального збагачення суміші. Тому сучасні розпилювачі проектуються таким чином, щоб забезпечити компроміс між глибиною проникнення та інтенсивністю розпилення [4].

Другим важливим напрямком є керування дисперсністю паливних крапель. Зменшення середнього діаметра крапель прискорює випаровування палива і покращує сумішоутворення, однак надмірне подрібнення може призводити до підвищення максимальної температури згоряння та зростання викидів оксидів азоту. У високообертових суднових двигунах особливо актуальним є формування рівномірного спектра крапель, який забезпечує стабільне згоряння без різких температурних піків. Це досягається шляхом точного добору параметрів отворів, а також застосуванням розпилювачів з оптимізованою формою внутрішніх каналів.

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						28
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Наступним напрямком удосконалення є раціональне використання кавітаційних явищ у розпилювачі. За високих тисків упорскування у внутрішніх каналах і отворах розпилювача виникає кавітація, яка, з одного боку, сприяє інтенсивнішому руйнуванню струменя та покращенню первинного розпилення, а з іншого – може викликати ерозійний знос поверхонь. Сучасні дослідження спрямовані на створення умов так званої «контрольованої кавітації», за якої досягається позитивний ефект для розпилення без суттєвого зниження ресурсу розпилювача. Це реалізується шляхом оптимізації радіусів входу в отвори, їх профілювання та вибору відповідних матеріалів.

Важливим напрямком є вдосконалення схеми розташування отворів розпилювача. Кількість отворів, їх просторове розміщення та орієнтація мають відповідати геометрії камери згоряння і характеру руху повітря. Для високообертових суднових двигунів часто застосовуються багатоструминні розпилювачі, які забезпечують більш рівномірний розподіл палива по об'єму камери згоряння. При цьому зменшується ризик локального переобогачення суміші, що позитивно впливає на зниження димності та утворення сажі.

Окремий напрямок удосконалення пов'язаний із підвищенням зносостійкості та термостійкості розпилювача. Високообертові суднові двигуни працюють у жорстких умовах високих температур і тисків, а також часто використовують паливо змінної якості. Це призводить до утворення нагару, лаків і продуктів корозії у зоні отворів розпилювача. Сучасні конструкції передбачають застосування спеціальних сталей, термічної та хіміко-термічної обробки, а також захисних покриттів, які зменшують адгезію відкладень і зберігають стабільність форми отворів протягом усього ресурсу.

Ще одним важливим напрямком є узгодження конструкції розпилювача з режимами багатофазного упорскування. При реалізації попереднього, основного та післяупорскування розпилювач повинен забезпечувати стабільне формування факела навіть при дуже малих порціях палива. Це висуває

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

підвищені вимоги до точності виготовлення отворів, симетрії факела та відсутності гідравлічної нестабільності. Для високообертових двигунів така стабільність є критичною умовою зменшення циклової нерівномірності та підвищення плавності роботи.

Для високообертових суднових двигунів характерні надзвичайно жорсткі вимоги до динаміки процесу упорскування палива. За частот обертання 1000–1800 об/хв тривалість одного циклу згоряння обмежується мілісекундами, а будь-які затримки або нестабільність у роботі паливної форсунки безпосередньо призводять до порушення закону подачі палива, зростання циклової нерівномірності та погіршення економічних і екологічних показників. У цьому контексті підвищення швидкодії та стабільності роботи керуючого клапана і голки розпилювача є одним із ключових напрямків удосконалення паливних форсунок.

Першим принциповим аспектом є зменшення інерційності рухомих елементів. Голка розпилювача та керуючий клапан повинні відкриватися і закриватися з максимальною швидкістю, точно відтворюючи електричний керуючий сигнал. Для цього сучасні конструкції передбачають зменшення маси рухомих деталей, оптимізацію їх геометрії та застосування високоміцних матеріалів. Зниження інерції дозволяє скоротити час запізнювання між подачею керуючого імпульсу та фактичним початком упорскування, що особливо важливо для високообертових двигунів, де кожна частка мілісекунди відповідає значному куту повороту колінчастого вала.

Другим напрямком є оптимізація гідравлічної схеми керування голкою. У електронно-керованих форсунках відкривання і закривання голки здійснюється за рахунок перерозподілу тиску в керуючих порожнинах. Наявність дроселів, каналів і об'ємів зумовлює гідравлічні затримки, які можуть викликати нестабільність руху голки, коливання або «підвисання» у проміжних положеннях. Тому сучасні напрямки розвитку спрямовані на зменшення об'єму керуючих порожнин, оптимізацію перерізів каналів та

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

стабілізацію витратних характеристик керуючого клапана. Це дозволяє забезпечити чітке, повторюване відкривання та закривання розпилювача на кожному циклі.

Важливим напрямком удосконалення є підвищення стабільності роботи керуючого клапана. Клапан є центральним елементом, який перетворює електричний сигнал у гідравлічну дію. У високообертових суднових двигунах він працює з великою частотою спрацювань і зазнає значних динамічних навантажень. Тому особлива увага приділяється точності його виготовлення, мінімізації зазорів, вибору матеріалів, стійких до зносу та забруднення, а також зменшенню чутливості до коливань тиску й температури палива. Стабільна робота клапана є запорукою відтворюваності параметрів упорскування впродовж усього ресурсу форсунки.

Наступним напрямком є забезпечення стабільного руху голки розпилювача без коливань і відскоків. За високих тисків упорскування та швидких циклів відкривання існує ризик виникнення гідродинамічних коливань голки, що призводить до нерівномірного впорскування, мікропідтікання палива або зміни форми факела. Для усунення цих явищ застосовуються демпфувальні елементи, оптимізується форма конуса голки та сидла, а також підбираються параметри пружинних і гідравлічних сил, що діють на голку. У результаті досягається плавний, контрольований рух розпилювача навіть за режимів багатоімпульсного упорскування.

Окреме значення має узгодження швидкодії голки та керуючого клапана з режимами багатозафазного упорскування. Для реалізації попереднього, основного та післяупорскування форсунка повинна надійно працювати з дуже малими порціями палива, які подаються з мінімальними часовими інтервалами. Це висуває підвищені вимоги до повторюваності ходу голки та стабільності її закривання. Будь-які відхилення призводять до значної відносної похибки дозування, що особливо небезпечно для високообертових двигунів з високою чутливістю до складу суміші.

					<i>KPM.142.6221мз.25.09.00.ПЗ</i>	Аркуш
						31
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Ще одним важливим напрямком є підвищення надійності роботи керуючих елементів у реальних експлуатаційних умовах. Суднові двигуни часто працюють на паливі змінної якості, що може містити домішки, воду або продукти окиснення. Забруднення безпосередньо впливають на рухомі елементи керуючого клапана і голки розпилювача, викликаючи підвищене тертя, залипання або нестабільність роботи. Тому сучасні форсунки проектуються з урахуванням підвищеної стійкості до забруднень, застосуванням зносостійких поверхонь і конструктивних рішень, що зменшують ризик відмови.

Одним із найскладніших і водночас критично важливих напрямків удосконалення паливних форсунок високообертових суднових двигунів є **боротьба з кавітацією, ерозією та гідродударними явищами**, що виникають у процесі високотискового упорскування палива. Для двигунів із частотою обертання 1000–1800 об/хв характерні надвисокі швидкості протікання палива, різкі перепади тиску та багаторазові цикли відкривання і закривання форсунки протягом короткого часу. За таких умов негативні гідродинамічні явища суттєво впливають як на якість розпилення, так і на довговічність елементів форсунки.

Кавітація виникає внаслідок локального зниження тиску палива нижче тиску насичених парів у внутрішніх каналах і отворах розпилювача. У високообертових суднових двигунах це явище особливо поширене через поєднання високого тиску впорскування та малих геометричних розмірів отворів. З одного боку, кавітація може сприяти інтенсивнішому руйнуванню паливного струменя і покращенню первинного розпилення, однак з іншого – неконтрольована кавітація призводить до руйнування поверхонь отворів, нестабільності факела та швидкого зносу розпилювача. Тому сучасні напрямки вдосконалення орієнтовані не на повне усунення кавітації, а на її кероване обмеження [5].

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						32
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Одним із основних шляхів боротьби з кавітацією є оптимізація геометрії внутрішніх каналів і отворів розпилювача. Плавні радіуси входу в отвори, раціональний профіль каналів підведення палива, зменшення різких звужень і розширень дозволяють знизити локальні перепади тиску та ймовірність утворення кавітаційних порожнин. Для високообертових двигунів це особливо важливо, оскільки стабільність факела безпосередньо впливає на рівномірність сумішоутворення при обмеженому часі згоряння.

Тісно пов'язаною з кавітацією проблемою є ерозійний знос отворів і робочих поверхонь розпилювача. Колапс кавітаційних бульбашок супроводжується локальними імпульсами тиску, які викликають мікропошкодження матеріалу. З часом це призводить до збільшення діаметра отворів, порушення симетрії факела та зростання циклової подачі палива. Як напрямок удосконалення застосовуються спеціальні високоміцні сталі, поверхневе зміцнення, хіміко-термічна обробка та зносостійкі покриття, що підвищують опір ерозії й забезпечують збереження геометрії розпилювача протягом тривалого ресурсу.

Окрему групу проблем становлять гідроударні явища, які виникають при різкому відкриванні або закриванні керуючого клапана і голки розпилювача. У високообертових судових двигунах, особливо за багатофазного упорскування, такі імпульси тиску можуть багаторазово повторюватися протягом одного робочого циклу. Гідроудари призводять до підвищених динамічних навантажень на корпус форсунки, керуючий клапан і розпилювач, а також можуть викликати нестабільність руху голки та порушення дозування палива.

Для зменшення гідроударних ефектів сучасні конструкції передбачають оптимізацію швидкості зміни тиску в керуючих порожнинах, застосування дросельних і демпфувальних елементів, а також узгодження характеристик керуючого клапана з гідравлікою форсунки. Зниження амплітуди тискових

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						33
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

коливань дозволяє підвищити стабільність роботи форсунки, зменшити вібраційні навантаження та запобігти передчасному зносу деталей.

Важливим напрямком є також забезпечення гідравлічної стабільності при багатоімпульсному упорскуванні. Для реалізації попереднього, основного та післяупорскування форсунка повинна працювати в умовах частих і швидких змін тиску без виникнення резонансних коливань. Це вимагає ретельного підбору об'ємів керуючих камер, характеристик пружних і гідравлічних елементів, а також високої повторюваності параметрів виготовлення.

Одним із визначальних напрямків удосконалення паливних форсунок високообертових суднових двигунів є **розвиток матеріалів, методів термічної та хіміко-термічної обробки**, а також застосування захисних покриттів. За умов високих тисків упорскування, значних температурних градієнтів і багаторазових динамічних навантажень саме матеріальна база форсунки значною мірою визначає її ресурс, стабільність параметрів упорскування та надійність у тривалій експлуатації.

Першим ключовим аспектом є вибір матеріалів для критичних елементів форсунки – корпусу, керуючого клапана, голки та розпилювача. У високообертових суднових двигунах ці елементи працюють в умовах поєднання високого контактного тиску, тертя, кавітаційних впливів і корозійно-активного середовища палива. Тому сучасні конструкції орієнтовані на застосування високоякісних легованих сталей із підвищеною міцністю, в'язкістю та стійкістю до втомного руйнування. Особлива увага приділяється стабільності механічних властивостей матеріалу за змін температури, що є характерним для суднових режимів із тривалими навантаженнями.

Другим важливим напрямком є вдосконалення термічної та хіміко-термічної обробки деталей форсунки. Термообробка дозволяє поєднати високу твердість робочих поверхонь із достатньою в'язкістю серцевини деталі. Для голки розпилювача та її сидла це критично, оскільки контактні

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						34
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

напруження в зоні ущільнення надзвичайно високі. Сучасні підходи передбачають контрольоване гартування, відпуск та локальне зміцнення, що забезпечує стабільність геометрії та мінімізує зношування при багаторазових циклах відкривання і закривання.

Окремий напрямок пов'язаний із підвищенням опору кавітаційній та ерозійній дії. Кавітаційні процеси в каналах і отворах розпилювача призводять до мікропошкоджень поверхонь і поступового руйнування матеріалу. Для зменшення цих ефектів застосовуються сталі та сплави з дрібнозернистою структурою, а також методи поверхневого зміцнення, які підвищують мікротвердість і знижують чутливість до імпульсних навантажень. Це дозволяє зберігати геометрію отворів розпилювача та стабільність паливного факела протягом усього міжремонтного ресурсу.

Важливим сучасним напрямком є застосування захисних покриттів на робочих поверхнях форсунки. Тонкі зносостійкі покриття зменшують коефіцієнт тертя між голкою та напрямною, знижують адгезію продуктів згоряння і паливних відкладень, а також підвищують корозійну стійкість. Для високообертових судових двигунів це особливо актуально, оскільки навіть незначні відкладення або мікропошкодження можуть призвести до залипання голки, порушення закону упорскування та перевантаження окремих циліндрів.

Наступним напрямком є підвищення термостійкості розпилювача. Наконечник форсунки безпосередньо контактує з гарячими газами камери згоряння та зазнає значних теплових навантажень. Використання матеріалів із підвищеною жароміцністю та відповідних покриттів дозволяє зменшити теплову деградацію, утворення нагару та термічну втому металу. Це сприяє стабільній роботі форсунки на високих навантаженнях, характерних для судових енергетичних установок.

Ще одним важливим аспектом є забезпечення сумісності матеріалів форсунки з паливами змінної якості. Суднові високообертові двигуни часто експлуатуються на дизельному паливі з різними показниками чистоти,

					<i>KPM.142.6221мз.25.09.00.ПЗ</i>	Аркуш
						35
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

змащувальної здатності та вмісту агресивних домішок. Тому матеріали й покриття повинні бути стійкими до корозії, окиснення та хімічної взаємодії з паливом. Це дозволяє знизити чутливість форсунки до погіршення якості палива та підвищити надійність її роботи в реальних експлуатаційних умовах.

Одним із найбільш актуальних напрямків удосконалення паливних форсунок високообертових суднових двигунів є **підвищення їх стійкості до забруднень і відкладень**. У реальних умовах експлуатації судові двигуни часто працюють на паливі змінної якості, що може містити механічні домішки, воду, смолисті сполуки та продукти окиснення. За високих тисків і температур, характерних для високообертових режимів, ці домішки активно сприяють утворенню відкладень у внутрішніх каналах форсунки та на робочих поверхнях розпилювача, що призводить до порушення процесу уприскування [6].

Першим важливим напрямком є конструктивна оптимізація внутрішніх каналів форсунки з метою зменшення зон застою палива. У високообертових суднових двигунах будь-яке локальне зниження швидкості потоку або наявність «мертвих об'ємів» створює умови для осадження домішок і формування лакоподібних відкладень. Тому сучасні конструкції орієнтовані на плавні переходи каналів, мінімізацію різких змін перерізів та забезпечення постійного самоочищення поверхонь за рахунок високої швидкості потоку палива.

Другим напрямком є підвищення точності виготовлення і стабільності зазорів між рухомими елементами. Голка розпилювача та її напрямна працюють з мікронними зазорами, і навіть незначне накопичення відкладень може призвести до підвищеного тертя або залипання голки. Сучасні технології виготовлення дозволяють забезпечити високу чистоту поверхонь і стабільність геометрії, що зменшує ймовірність накопичення забруднень і забезпечує надійну роботу форсунки протягом усього ресурсу.

Важливим напрямком є застосування матеріалів і покриттів із низькою адгезією до відкладень. Поверхні з покращеними антиадгезійними властивостями значно знижують схильність до утворення нагару та лакових відкладень у зоні розпилювача. Для високообертових суднових двигунів це має особливе значення, оскільки стабільність форми отворів розпилювача безпосередньо впливає на характеристики паливного факела і рівномірність згоряння.

Наступним напрямком є оптимізація теплового режиму розпилювача. Надмірне перегрівання наконечника форсунки сприяє термічному розкладу компонентів палива і прискорює утворення відкладень. Сучасні рішення передбачають покращений тепловідвід від розпилювача, раціональне розміщення форсунки в головці циліндра та використання матеріалів із підвищеною теплопровідністю. Це дозволяє знизити температуру поверхонь, схильних до утворення нагару, і підвищити стійкість до забруднень.

Окремим важливим напрямком є узгодження конструкції форсунки з системою очищення та підготовки палива. Навіть найдосконаліша форсунка не може ефективно працювати без належної фільтрації палива. Тому підвищення стійкості до забруднень розглядається комплексно – у поєднанні з тонким очищенням палива, контролем вмісту води та стабілізацією його в'язкості. Для високообертових суднових двигунів це особливо важливо, оскільки їхні форсунки чутливі до найменших відхилень якості палива.

Ще одним сучасним напрямком є адаптація форсунок до тривалої роботи на часткових навантаженнях. Саме в цих режимах знижується температура в камері згоряння і збільшується ризик утворення нагару на розпилювачі. Сучасні конструктивні та матеріальні рішення спрямовані на збереження стабільності упорскування і мінімізацію відкладень навіть при тривалій роботі двигуна в економічних або маневрових режимах, характерних для суднової експлуатації.

Одним із найбільш перспективних і системоутворювальних напрямків удосконалення паливних форсунок високообертових суднових двигунів є ***впровадження вбудованої діагностики та адаптивного керування за технічним станом.*** Для двигунів з частотою обертання 1000–1800 об/хв характерна висока чутливість робочого процесу до найменших відхилень параметрів упорскування. Навіть незначні зміни швидкодії форсунки, циклової подачі або якості розпилення можуть призвести до зростання температур випускних газів, нерівномірності навантаження циліндрів і зниження ресурсу деталей. У цих умовах перехід від періодичного контролю до безперервного моніторингу стану форсунок стає принципово важливим.

Вбудована діагностика паливних форсунок ґрунтується на контролі електричних, гідравлічних і термодинамічних параметрів, які непрямо або безпосередньо відображають їхній технічний стан. До таких параметрів належать струм і напруга керуючого імпульсу, час відкривання та закривання голки, тиск у паливній магістралі, форма індикаторної діаграми в циліндрі, температура випускних газів та нерівномірність обертання колінчастого вала. Аналіз цих даних дозволяє виявляти початкові ознаки зносу, забруднення або деградації форсунки ще до появи явних відмов.

Важливим напрямком є діагностика швидкодії та повторюваності роботи форсунки. У високообертових суднових двигунах зменшення швидкості відкривання або неповне закривання голки одразу відображається на характері згоряння. Системи вбудованого контролю дозволяють фіксувати відхилення часу реакції форсунки від еталонних значень і використовувати цю інформацію для корекції керуючих сигналів або формування попереджувальних повідомлень про необхідність обслуговування.

Наступним важливим напрямком є адаптивне керування параметрами упорскування. На основі діагностичної інформації електронна система керування може автоматично змінювати тривалість імпульсу, момент початку упорскування або розподіл палива між фазами багатofазного упорскування.

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						38
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Для високообертових суднових двигунів це дозволяє компенсувати знос форсунки, часткове забруднення отворів розпилювача або зміну властивостей палива без негайного втручання обслуговчого персоналу.

Окремого значення набуває індивідуальна корекція роботи форсунок по циліндрах. У реальних умовах експлуатації навіть ідентичні форсунки з часом починають працювати по-різному. Адаптивні алгоритми дозволяють вирівнювати теплові та силові навантаження між циліндрами шляхом індивідуального підбору параметрів упорскування. Це зменшує циклову нерівномірність, стабілізує температуру випускних газів і підвищує загальну надійність суднового двигуна.

Ще одним напрямком є перехід до обслуговування за технічним станом (condition-based maintenance). Вбудована діагностика форсунок дозволяє відмовитися від жорстко регламентованих інтервалів заміни та переходити до обслуговування на основі фактичного стану. Для суднових енергетичних установок це має велике практичне значення, оскільки зменшує простої, оптимізує витрати на запасні частини та знижує ризик аварійних відмов під час рейсу.

Важливим аспектом є також підвищення експлуатаційної безпеки та екологічної ефективності. Своєчасне виявлення відхилень у роботі форсунок дозволяє запобігати перегріву окремих циліндрів, локальному переобogaщенню суміші та зростанню токсичності відпрацьованих газів. Адаптивне керування забезпечує підтримання оптимального процесу згоряння навіть за змінних умов навантаження і якості палива, що є характерним для суднової експлуатації.

Одним із найбільш динамічних і стратегічно важливих напрямків удосконалення паливних форсунок високообертових суднових двигунів є їх **адаптація до роботи на альтернативних і комбінованих паливах, а також відповідність сучасним і перспективним екологічним стратегіям судноплавства**. Посилення вимог ІМО щодо скорочення викидів оксидів

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						39
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

азоту, твердих частинок і парникових газів зумовлює необхідність використання нових паливних концепцій, реалізація яких неможлива без глибокої модернізації систем упорскування та, зокрема, паливних форсунок.

Першим важливим аспектом є адаптація форсунок до палив зі змінними фізико-хімічними властивостями. Альтернативні палива, такі як біодизель, синтетичні дизельні фракції, водопаливні емульсії або суміші традиційного дизельного палива з біокомпонентами, відрізняються за в'язкістю, густиною, змащувальною здатністю та схильністю до утворення відкладень. Для високообертових суднових двигунів це створює додаткові вимоги до конструкції форсунки, зокрема до точності зазорів, стабільності руху голки та зносостійкості розпилювача. Удосконалення форсунок у цьому напрямку дозволяє забезпечити надійне та відтворюване упорскування незалежно від складу палива.

Другим ключовим напрямком є розвиток форсунок для газодизельних і комбінованих систем живлення. У таких двигунах основна енергія подається у вигляді газоподібного палива, а рідке паливо використовується як пілотне для ініціації займання. Для високообертових суднових двигунів це означає необхідність надзвичайно точної подачі малих порцій пілотного палива з мінімальним розкидом циклової подачі. Удосконалення форсунок у цьому напрямку передбачає підвищення швидкодії, стабільності роботи на надмалих витратах і збереження чіткого факела навіть при дуже коротких імпульсах упорскування.

Важливим напрямком є пристосування форсунок до нових екологічних стратегій зниження викидів NOx і твердих частинок. Сучасні екологічні концепції базуються на оптимізації процесу згоряння, зокрема шляхом багатофазного упорскування, керування темпом тепловиділення та зниження пікових температур у циліндрі. Для високообертових суднових двигунів форсунка повинна забезпечувати точне формування попереднього та післяупорскування, що безпосередньо залежить від стабільності її

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

гідромеханічних характеристик і якості розпилення. Таким чином, адаптація до екологічних стратегій вимагає від форсунки високої точності та повторюваності роботи в широкому діапазоні режимів.

Наступним напрямком є забезпечення сумісності форсунок із системами EGR та іншими методами внутрішньоциліндрового регулювання згоряння. Повернення частини відпрацьованих газів змінює умови займання та сумішоутворення, що особливо відчутно у високообертових двигунах. У таких умовах форсунка повинна формувати паливний факел з урахуванням зниженого вмісту кисню та змінених термодинамічних властивостей робочого середовища. Це стимулює розвиток конструкцій розпилювачів і керування упорскуванням, орієнтованих на стабільність згоряння при екологічно спрямованих режимах.

Окремим важливим аспектом є адаптація форсунок до роботи з водовмісними та емульсійними паливами. Такі палива використовуються як ефективний засіб зниження температури згоряння і, відповідно, викидів NOx. Для високообертових суднових двигунів це вимагає від форсунки підвищеної стійкості до кавітації, корозії та нестабільності розпилення. Удосконалення матеріалів, геометрії отворів і гідравлічної схеми форсунки дозволяє реалізувати потенціал водопаливних емульсій без зниження надійності системи упорскування.

Ще одним напрямком є гнучка адаптація параметрів упорскування до умов експлуатації. Сучасні екологічні стратегії передбачають роботу двигуна в різних режимах – від мінімальних навантажень у зонах контролю викидів до повної потужності у відкритому морі. У таких умовах форсунка повинна стабільно працювати як на малих, так і на великих циклових подачах, забезпечуючи оптимальне згоряння та мінімальні викиди. Це досягається шляхом інтеграції форсунок з електронними системами керування та адаптивними алгоритмами регулювання.

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						41
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Проведений аналіз сучасних напрямків удосконалення паливних форсунок високообертових суднових двигунів показує, що найбільш перспективним і технологічно доцільним рішенням на сучасному етапі розвитку є застосування електромагнітних (соленоїдних) керуючих клапанів.

Електромагнітні клапани забезпечують оптимальне поєднання високої швидкодії, стабільності роботи та конструктивної надійності, що є критично важливим для високообертових суднових двигунів, які працюють у широкому діапазоні навантажень і частот обертання. Вони дозволяють реалізувати гнучке електронне керування процесом упорскування, включаючи багатофазне впорскування, точне дозування малих порцій палива та адаптацію закону подачі до поточного технічного стану двигуна.

На відміну від альтернативних рішень, електромагнітні клапани характеризуються високою експлуатаційною витривалістю, меншою чутливістю до забруднень палива та стабільною роботою в умовах тривалих навантажень, що є типовим для суднової експлуатації. Їх конструкція краще пристосована до роботи з паливами змінної якості, альтернативними та комбінованими паливами, а також до реалізації сучасних екологічних стратегій зі зниження викидів NOx і твердих частинок.

Крім того, електромагнітні клапани забезпечують кращу інтеграцію з системами вбудованої діагностики та адаптивного керування, що дозволяє переходити до обслуговування за технічним станом, підвищувати надійність силової установки та зменшувати експлуатаційні витрати. Важливою перевагою є також їх відносна конструктивна простота, ремонтпридатність і економічна доцільність порівняно з більш складними та дорогими керуючими елементами [7].

Таким чином, застосування електромагнітних керуючих клапанів у складі електронно-керованих паливних форсунок є найбільш перспективним напрямком розвитку високообертових суднових двигунів, оскільки дозволяє забезпечити збалансоване поєднання точності упорскування, надійності,

					<i>KPM.142.6221мз.25.09.00.ПЗ</i>	Аркуш
						42
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

екологічної відповідності та економічної ефективності в реальних умовах суднової експлуатації.

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						43
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ВДОСКОНАЛЕННЯ ПАЛИВНИХ ФОРСУНОК ДВИГУНА 6ЧН 14,4/16,5

Розрахунок робочого циклу двигуна 6ЧН 14,4/16,5

Параметр	Значення
<i>Вихідні дані</i>	
Діаметр циліндра, м	0,144
Хід поршня, м	0,165
Частота обертання, хв ⁻¹	1500
Тактність	0,5
Число циліндрів	6
Тиск наддуву, МПа	0,35
Тиск навколишнього середовища, МПа	0,1013
Температура навколишнього середовища, К	293
Показник політропи стиснення в компресорі	1,8
Коефіцієнт надлишку повітря для згоряння	2,08
Коефіцієнт продувки	1,05
Коефіцієнт залишкових газів	0,04
Коефіцієнт використання тепла в точці z	0,92
Коефіцієнт використання тепла в точці b	0,95
Ступінь стиснення	17,5
Ступінь підвищення тиску при згорянні	1,2
Підігрів заряду від стінок циліндра	20
Коефіцієнт заокруглення індикаторної діаграми	0,99
Коефіцієнт втрати тиску у впускному колекторі	0,95
Механічний ККД двигуна	0,9
Втрата тиску в повітроохолоджувачі	0,002
Температура залишкових газів, К	800

<i>Розрахунок процесу наповнення</i>	
Температура повітря за компресором, К	471,146
Температура заряду перед двигуном, К	310,815
Температура заряду до кінця процесу наповнення, К	348,86
Тиск повітря перед двигуном, МПа	0,348
Тиск заряду до кінця процесу наповнення, МПа	0,331
Коефіцієнт наповнення	0,863
<i>Розрахунок процесу стиснення</i>	
A_{vc}	19,282
B_c	0,00252
Теплоємність газоповітряної суміші та залишкових газів на ході стиснення визначається за формулою: $C_{vc}=19,282+0,00252 \cdot T$	
Середній показник політропи стиснення	1,359
Тиск наприкінці стиснення, МПа	16,184
Температура наприкінці стиснення, К	975,88
<i>Розрахунок процесу згоряння</i>	
Хімічний коефіцієнт молекулярної зміни	1,0307
Дійсний коефіцієнт молекулярної зміни	1,0296
Частка палива, що згоріла в точці z	0,968
Коефіцієнт молекулярної зміни в точці z	1,029
A_{vz}	19,84203
b_z	0,00303
A_{vb}	19,85975
B_b	0,003045
Середня мольна ізохорна теплоємність у точці z визначається за формулою: $C_{vz}=19,84203+0,00303 \cdot T$	

Середня мольна ізохорна теплоємність у точці b визначається за формулою: $C_{vb}=19,85975+0,003045 \cdot T$

Максимальна температура згоряння	1934
Максимальний тиск згоряння	19,421
<i>Розрахунок процесу розширення</i>	
Ступінь попереднього розширення	1,699
Ступінь подальшого розширення	10,299
Середній показник політропи розширення	1,277
Температура наприкінці процесу розширення, К	1014
Тиск наприкінці процесу розширення, МПа	0,988
<i>Індикаторні показники</i>	
Теоретичний середній індикаторний тиск, МПа	2,505
Дійсний середній індикаторний тиск, МПа	2,48
Індикаторний ККД	0,514
Індикаторна питома витрата рідкого палива, кг/(кВт×год)	0,164
<i>Ефективні показники</i>	
Середній ефективний тиск, МПа	2,232
Ефективний ККД двигуна	0,463
Ефективна питома витрата рідкого палива, кг/(кВт×год)	0,1821
Ефективна потужність двигуна, кВт	450

Опис паливної системи (рис 3.1)

Паливопідкачувальний насос (1) всмоктує паливо з бака через паливний попередній фільтр (2) та запірний паливний клапан (3) до всмоктувальної порожнини насоса. Далі насос подає паливо до корпусу фільтрів (4), через тонкий фільтр, і через запірний паливний клапан – до паливного каналу головки циліндрів (5). Паливний канал подає паливо до кожної форсунки (6) через кільцеподібний простір навколо кожної форсунки. Перепускний

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						46
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

(зливний) клапан (7) регулює тиск палива на вході до форсунок; у його складі передбачений вбудований клапан продувки. Повітря, що потрапляє в систему, разом з невеликою кількістю палива повертається в паливний бак по зворотній магістралі (8).

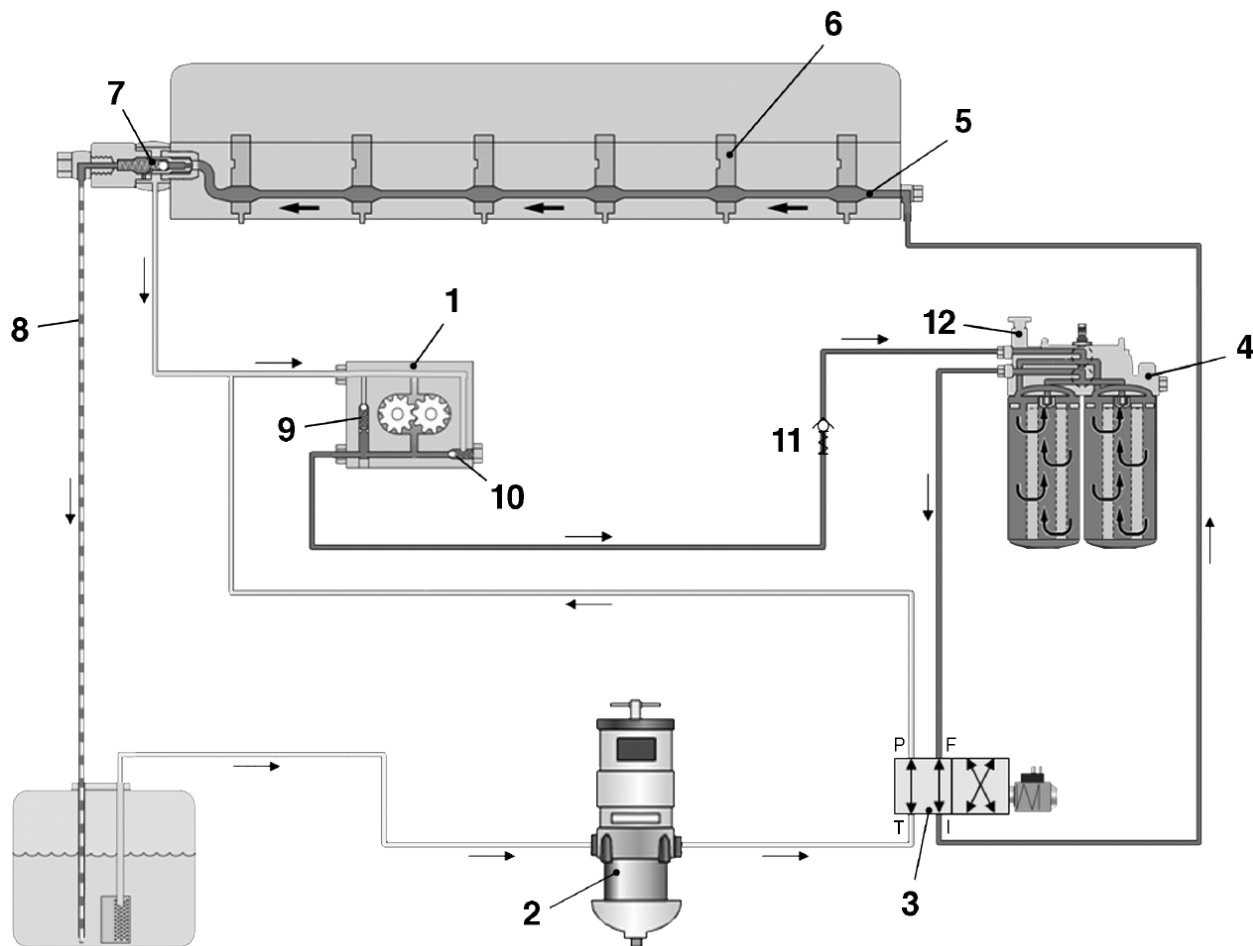


Рисунок 3.1 – Паливна система

Паливо відводиться з передньої частини головки циліндрів і далі, через запірний паливний клапан, проходить через перепускний клапан (11) до корпусу фільтрів, де змішується з паливом із всмоктувальної лінії, після чого знову подається до паливопідкачуального насоса.

У паливопідкачуальному насосі встановлено два клапани. Запобіжний клапан (10) відкривається і повертає паливо на всмоктувальну сторону при надмірному тиску (наприклад, у разі засмічення паливного фільтра).

Зворотний клапан (9) відкривається під час використання ручного насоса (12), розташованого на корпусі тонкого фільтра.

Під час активації запірного паливного клапана (3) напрямок потоку палива змінюється таким чином, що тиск подачі до паливного каналу головки циліндрів швидко знижується, унаслідок чого двигун зупиняється.

Розрахунок паливної системи

1	Добовий запас палива, кг/доб	$G_n = 24 \cdot K_m \cdot g_e \cdot N_e$	2162,16
	Питома ефективна витрата палива, кг/кВт·год	g_e	0,182
	Номінальна потужність двигуна, кВт	N_e	450
	Коефіцієнт запасу, який враховує можливе збільшення витрати палива	$K_m = 1,1 \dots 1,2$	1,10
2	Місткість витратної цистерни, м ³	$V = \frac{G_n}{\rho_n} \cdot K_1 \cdot K_2$	2,72
	Щільність палива при максимальній температурі в секції, кг/м ³	ρ_n	850,00
	Коефіцієнт захарашення цистерни елементами конструкції	$K_1 = 1,01 \dots 1,05$	1,03
	Коефіцієнт, що враховує мертвий об'єм цистерни	$K_2 = 1,03 \dots 1,05$	1,04
3	Продуктивність паливopідкачуального насоса, м ³ /год	$W_{nn} = \frac{K_3 \cdot g_e \cdot N_e}{\rho_n}$	0,19
	Коефіцієнт запаса подачі палива	$K_3 = 1,5 \dots 2,0$	2,00
4	Потужність привода паливopідкачуального насоса, кВт	$N_{nn} = \frac{W_{nn} \cdot K_4 \cdot p \cdot 10^3}{3600 \cdot \eta_{nn}}$	0,05
	Тиск нагнітання палива, МПа	p	0,50
	Коефіцієнт запаса потужності	$K_4 = 1,1 \dots 1,5$	1,30
	ККД поршневих паливopідкачувальних насосів	$\eta = 0,6 \dots 0,7$	0,70
5	Площа поверхонь фільтруючих елементів, м ²	$F_\phi = \frac{W_{nn}}{3600 \cdot v_m \cdot K_{жп}}$	0,00
	Швидкість фільтрації, м/с	$v_m = 0,02 \dots 0,05$	0,04
	Коефіцієнт живого перетину	$K_{жп} = 0,2 \dots 0,3$	0,30
6	Пропускна здатність сепаратора, м ³ /год	$W_{cen} = \frac{B_{дооб}}{\rho_n \cdot n \cdot \tau}$	0,12
	Добова витрата палива, кг/доб	$B_{дооб} = 24 \cdot g_e \cdot N_e$	1965,60
	Кількість сепараторів	$n = 1 \dots 4$	2
	Час роботи сепаратора, год	$\tau = 8 \dots 12$	10
7	Теплообмінна поверхня підігрівача палива в цистерні сепаратора, м ²	$F_{nn} = \frac{W_{cen} \cdot C_m \cdot (t_2 - t_1) \cdot \rho_n}{k \cdot \Delta t \cdot \eta_3}$	0,36
	Теплоємність палива, кДж/кг·К	C_m	1,90
	Температура палива, що поступає в сепаратора, °С	t_2	80,00
	Температура, при якій зберігається паливо, °С	t_1	40,00
	Коефіцієнт теплопередачі	k	500,00
	Коефіцієнт, що враховує забруднення підігрівача	η_3	0,70
	Середня різниця температур між насиченою парою і паливом, °С	$\Delta t = t_3 - \frac{t_2 + t_1}{2}$	60,00
	Температура насиченої пари, що поступає в підігрівач, °С	t_3	120,00

8	Потужність електричних підігрівачів, кВт	$N_{nn} = \frac{W_{cen} \cdot C_m \cdot (t_2 - t_1) \cdot \rho_n}{860 \cdot \eta_3}$	12,41
9	Хід плунжера ПНВТ, мм	$h_r = 1 \dots 1,5 \cdot d_r$	18,20
		приймаємо	19,00
10	Діаметр плунжера, мм	$d_r = 16,9 \cdot g_{y \max}^{0,303}$	12,60
		приймаємо	13,00
		$d_r = 35 + 0,04 \cdot (g_{y \max} - 10)$	
	Максимальна циклова подача палива, г/цикл	$g_{y \max} = 1,25 \cdot \frac{g_e \cdot (N_e / i)}{60 \cdot n \cdot z}$	0,38
	Кількість циліндрів	i	6,00
	Частота обертання, об/хв	n	1500,00
	Коефіцієнт тактності	z	0,50
11	Внутрішній діаметр паливопроводу високого тиску, мм	2 при $d_r < 10$ мм 2,5-2,6 при $d_r = 11 \dots 14$ мм 3 при $d_r = 15 \dots 20$ мм $3 + 0,218(d_r - 20)$ при $d_r > 20$ мм	1,47
		приймаємо	2,50
12	Діаметр одного соплового отвору, мм	0,25 при $D < 100$ мм 0,3 при $D = 105 \dots 200$ мм 0,35 при $D = 205 \dots 250$ мм 0,4 + 0,0012(D-250) при $D > 250$ мм	0,27
		приймаємо	0,30
	Діаметр циліндра, мм	D	144,00
13	Кількість соплових отворів	$i_c = 4 \dots 8$	4,00
14	Довжина соплового отвору, мм	$l_c = (3 \dots 4) \cdot d_c$	1,20

Вдосконалення паливних форсунок

З публікації WO 03/002868 А відома форсунка з електромагнітним клапаном, що має якір, до складу якого входять якірна пластина та керувальний клапанний елемент (кулька і сідло). Така форсунка працює за принципом класичного клапанного механізму з голкою, яка приводиться в дію переміщенням якоря. У цьому випадку керувальний клапанний елемент сприймає осьові зусилля, зумовлені тиском палива. При цьому на якір постійно діє значна сила пружини, унаслідок чого для спрацювання форсунки необхідно створювати великі керувальні зусилля. Це істотно обмежує точність регулювання процесу впорскування та ускладнює адаптацію роботи форсунки

до змінних режимів роботи двигуна. Саме ці недоліки нині є предметом активного вдосконалення сучасних паливних систем.

Також з патенту EP 1612403 відома форсунка для впорскування палива в камеру згоряння двигуна внутрішнього згоряння, у якій процес упорскування контролюється електромагнітним керувальним клапаном. Цей клапан забезпечує відкривання та перекривання зливного дроселя, що з'єднує керувальну порожнину з лінією зливу палива. Керувальна порожнина з одного боку обмежена керувальним поршнем, який впливає на клапанний елемент, що відкриває або закриває щонайменше один розпилювальний отвір, через який паливо подається в камеру згоряння.

Зливний дросель розташований у деталі, з боку, протилежного керувальній порожнині, де виконане конічне сидло. На це сидло сідає запірний елемент, жорстко пов'язаний з якорем електромагнітного клапана. Для цього на запірному елементі сформована ущільнювальна кромка, яка притискається до конічного сидла. Запірний елемент переміщується вздовж осьового стержня, виконаного за одне ціле з деталлю, у якій розміщений зливний дросель.

Однак для забезпечення герметичного закриття електромагнітного клапана необхідно виготовляти спряжені поверхні з дуже високою точністю, а також забезпечувати прецизійну припасовку запірного елемента до осьового стержня. Лише за дотримання цих вимог досягається точне спрямоване переміщення запірного елемента та його надійна герметична посадка на сидло. Саме тому сучасні дослідження та розробки зосереджені на спрощенні конструкції, зменшенні керувальних зусиль і підвищенні стабільності роботи форсунок у широкому діапазоні режимів роботи двигуна.

У кваліфікаційній роботі пропонується конструкція паливної форсунки з керування клапанним елементом, що відкриває та закриває щонайменше один розпилювальний отвір, здійснюється керувальним клапаном у вигляді

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						50
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

електромагнітного клапана. На якорі електромагнітного клапана сформована ущільнювальна поверхня, яка під час закриття керувального клапана опускається на сідло. При цьому якір виконаний таким, що переміщується без жорсткої напрямної між верхнім і нижнім обмежувачами ходу.

Виконання ущільнювальної поверхні безпосередньо на якорі дає змогу відмовитися від окремого запірного елемента, характерного для відомих рішень рівня техніки. Завдяки цьому суттєво зменшується маса рухомих деталей, що є одним із ключових напрямків сучасного вдосконалення паливних форсунок. Зменшення маси, у свою чергу, скорочує час спрацювання керувального клапана, а отже, й усієї форсунки, підвищуючи точність і швидкодію процесу впорскування. Додатковою перевагою такого рішення є зменшення габаритів електромагнітного клапана та, відповідно, зниження вимог до монтажного простору.

Герметичне закриття електромагнітного клапана при посадці ущільнювальної поверхні якоря на сідло досягається за рахунок самовирівнювання якоря під час його упору в нижній обмежувач ходу. У вдосконаленому варіанті це вирівнювання забезпечується пружною напрямною кромкою, виконаною на якорі, переважно по його зовнішньому діаметру. У разі виникнення коливань або перекосу під час переміщення в напрямку закриття якір спочатку торкається обмежувача саме цією напрямною кромкою, після чого завдяки її пружності вирівнюється та займає оптимальне положення, у якому ущільнювальна поверхня щільно прилягає до сідла, забезпечуючи надійне перекриття зливного дроселя.

Переміщення якоря до нижнього обмежувача здійснюється під дією пружного елемента, який у типовому виконанні являє собою спіральну пружину стиску. Для ефективної передачі зусилля в зоні, максимально наближеній до сідла в радіальному напрямку, внутрішній діаметр пружного елемента доцільно виконувати приблизно рівним внутрішньому діаметру

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						51
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

сідла. При цьому завдяки пружності напрямної кромки на її притискання втрачається лише незначна частина зусилля, що розвивається пружиною.

Особливістю вдосконаленої конструкції є те, що в якорі виконано отвір, у який встановлено стержень, що працює на стиск, для сприйняття осьових зусиль, створюваних тиском палива. Це дає змогу приводити якір у дію порівняно малими зусиллями, що відкриває можливість надзвичайно точного та тонкого керування форсункою – ключової вимоги до сучасних систем упорскування.

В одному з кращих варіантів виконання напрямна кромка та ущільнювальна поверхня якоря, а також опорна поверхня і сідло керувального клапана обробляються шліфуванням і розташовуються в одній площині. Таке рішення значно спрощує та здешевлює виготовлення електромагнітного клапана, оскільки усувається необхідність точної взаємної припасовки кількох деталей. Верхній обмежувач ходу якоря при цьому виконаний у вигляді кільцевої поверхні, при контакті з якою якір, навіть у разі перекосу, самовирівнюється.

Для забезпечення осьової компенсації сил тиску якір доцільно виконувати таким чином, щоб протилежні поверхні, на які діють осьові зусилля, мали однакову площу та перебували під однаковим тиском. З цією метою діаметр отвору в якорі виконують близьким до внутрішнього діаметра сідла, а для зменшення витоків палива отвір піддають хонінгуванню. Стержень при цьому встановлюється з щільною, але рухомою посадкою. Важливо, що для забезпечення перпендикулярності між ущільнювальною поверхнею та отвором не потрібна їх обробка за один установ, що спрощує технологію виготовлення якоря.

Опорна поверхня для напрямної кромки та сідло, як правило, виконуються в одній деталі, яка встановлюється в корпус форсунки. Таке конструктивне об'єднання дозволяє розташовувати їх на одній зовнішній поверхні без необхідності додаткового вирівнювання торців отворів.

					<i>KPM.142.6221мз.25.09.00.ПЗ</i>	Аркуш
						52
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Зусилля пружного елемента, що забезпечує переміщення якоря від магніта до сідла, у вдосконалених варіантах регулюється кільцем, яке задає ступінь попереднього стиску пружини. Зі збільшенням осьової товщини кільця зростає попередній стиск і, відповідно, зусилля, що діє на якір. Зазвичай кільце розташовується з боку пружини, протилежного якорю, однак у деяких сучасних рішеннях його встановлюють між пружиною та якорем, що дає змогу додатково використовувати його для центрування якоря.

Для запобігання перекосу якоря під час відкривання та закривання в одному з варіантів стержень, що працює на стиск, складається з штифта, оточеного пружним елементом, і пальця, встановленого в отворі якоря. Можливість нахилу пальця відносно штифта дозволяє компенсувати перекоси. Це досягається, наприклад, виконанням їх контактних поверхонь випуклими, у вигляді сферичних сегментів, або встановленням кульки між пальцем і штифтом. Такі рішення є перспективними напрямками подальшого вдосконалення високоточних паливних форсунок для сучасних двигунів внутрішнього згоряння.

На рис. 3.2 у поздовжньому розрізі показано фрагмент паливної форсунки з електромагнітним клапаном. У форсунці 1 керування керувальним поршнем 2, який забезпечує відкривання та закривання не показано на кресленні клапанного елемента (голки), здійснюється електромагнітним клапаном 3. Клапанний елемент відкриває або перекриває щонайменше один розпилювальний отвір, у такий спосіб регулюючи процес впорскування палива в камеру згоряння двигуна внутрішнього згоряння.

Керувальний поршень 2 приводиться в дію гідравлічно. Для цього він зі сторони, протилежної клапанному елементу, сполучений з керувальною порожниною 4. Керувальна порожнина 4 через вхідний дросель 5 з'єднана з підвідним паливопроводом 6, унаслідок чого паливо, що перебуває під робочим тиском паливної системи, може надходити до керувальної порожнини. Скидання тиску з керувальної порожнини 4 здійснюється через

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						53
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

зливний дросель 7, який гідравлічно сполучений зі зливною лінією (на фігурі не показана).

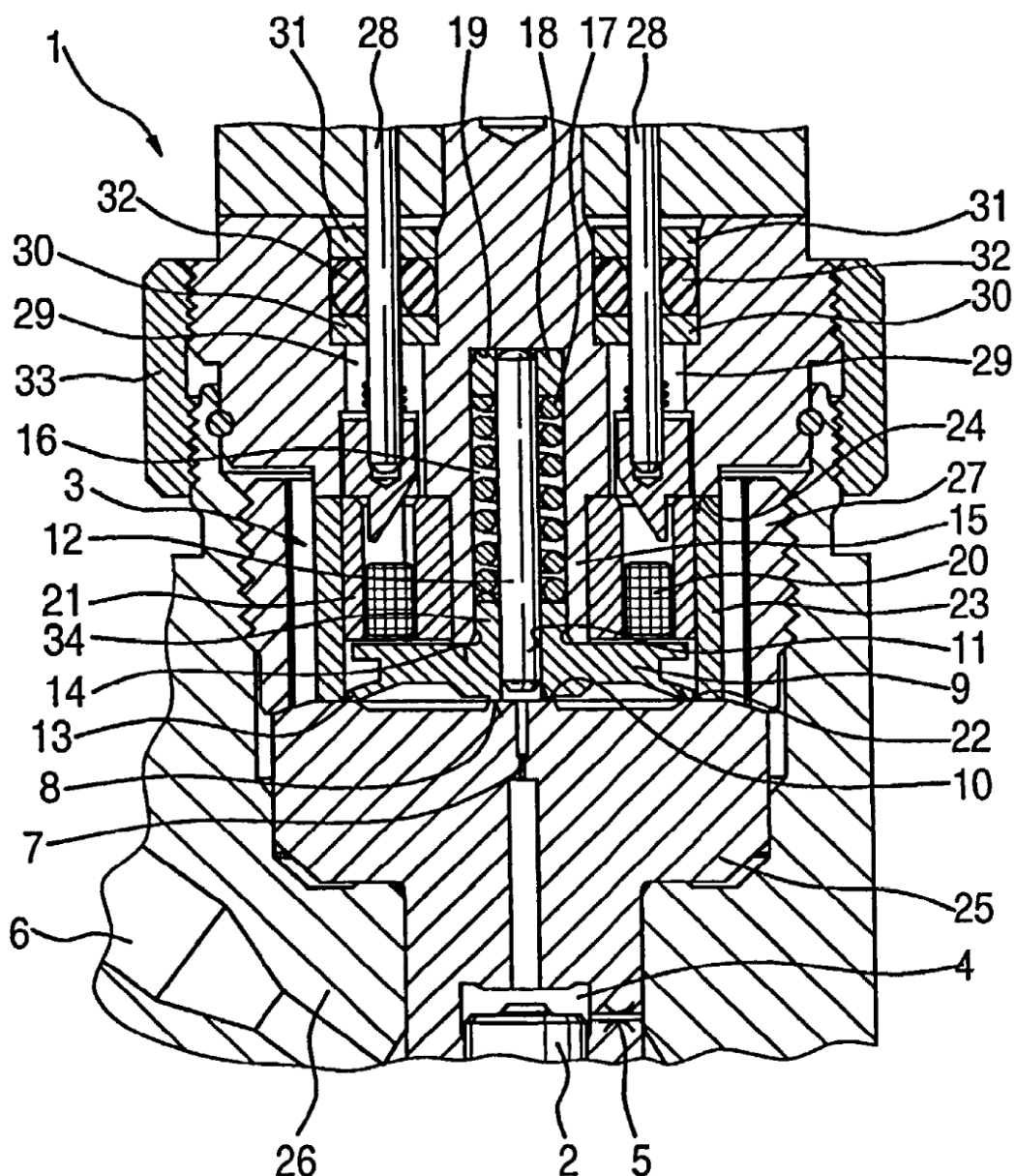


Рисунок 3.2 – Фрагмент конструкції клапана

Для забезпечення наповнення керувальної порожнини паливом під робочим тиском зливний дросель 7 виконаний перекриваним електромагнітним клапаном 3. З цією метою в електромагнітному клапані 3 передбачена ущільнювальна поверхня 8, сформована безпосередньо на якорі 9, яка під час закривання опускається на сідло 10. У наведеному варіанті ущільнювальна поверхня 8 та сідло 10 утворюють плоске сідло, однак у

перспективних виконаннях можливе застосування й інших типів сідел, що усувають навантаження запірного елемента осьовими зусиллями, що є важливим напрямом сучасного вдосконалення конструкції.

Для сприйняття осьових зусиль, створюваних тиском палива при закритому електромагнітному клапані 3, в якорі 9 виконано отвір 11, у який встановлено стержень 12, що працює на стиск. З метою мінімізації впливу осьових зусиль тиску на якір діаметр отвору 11 виконано таким, що приблизно відповідає внутрішньому діаметру ущільнювальної поверхні 8. Додатково стержень 12 виконує функцію ущільнення отвору 11, запобігаючи витіканню палива. Для цього він встановлюється з щільною, але рухомою посадкою. При цьому, на відміну від відомих технічних рішень, не вимагається виготовлення ущільнювальної поверхні та отвору за один установ, що спрощує виготовлення якоря та підвищує технологічність конструкції.

Для самовирівнювання якоря 9 під час його контакту з нижнім обмежувачем ходу, тобто при посадці ущільнювальної поверхні 8 на сидло 10, на якорі виконано пружну напрямну кромку 13. Верхнім обмежувачем ходу якоря слугує кільцева поверхня 14, яка є нижньою торцевою поверхнею обмежувальної (упорної) втулки 15.

В обмежувальній втулці 15 виконано глухий отвір 16, у який встановлено пружний елемент 17, що в сучасному виконанні зазвичай являє собою спіральну пружину стиску. Один її кінець спирається на якір 9, а інший – на кільце 18, яке впирається в дно 19 отвору 16. Підбором осьової товщини кільця 18 регулюється зусилля, з яким пружний елемент 17 діє на якір, що забезпечує точне налаштування характеристик спрацювання форсунки.

Електромагнітний клапан 3 додатково містить електромагніт 20, установлений у магнітному осерді 21, при цьому електроживлення підводиться через штифти 28.

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						55
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Для забезпечення рівномірного та герметичного прилягання ущільнювальної поверхні 8 до сидла 10 сидло 10, опорна поверхня 22, а також відповідні поверхні прямої кромки 13 і ущільнювальної поверхні 8 виконані шліфуванням в одній площині. Це рішення спрямоване на підвищення надійності та стабільності роботи електромагнітного клапана.

Хід якоря 9 обмежується обмежувальною втулкою 15. Для регулювання довжини ходу передбачена втулка 23, у якій розміщені якор 9 і магнітне осердя 21; її осьова довжина визначає максимальний хід якоря. Обмежувальна втулка 15 при цьому спирається своєю торцевою поверхнею 24 на втулку 23.

Вхідний дросель 5, зливний дросель 7, а також сидло 10 і опорна поверхня 22 виконані в окремій деталі 25, яка встановлюється в корпусі 26 форсунки та фіксується прижимним різьбовим кільцем 27 із зовнішньою різьбою.

В обмежувальній втулці 15 виконані отвори 29, у кожному з яких розміщено штифт 28. Для ущільнення та центрування штифтів кожен з них оснащений нижнім кільцем 30, верхнім кільцем 31 та ущільнювальним кільцем 32, розташованим між ними. У наведеному варіанті обмежувальна втулка 15 закріплюється в корпусі 26 форсунки за допомогою стяжної гайки 33.

Запропонований електромагнітний клапан 3 може застосовуватися як у інверсно керованих (нормально відкритих), так і в неінверсно керованих (нормально закритих) паливних форсунках, що розширює можливості його використання в сучасних і перспективних системах упорскування палива.

Для ініціювання процесу впорскування палива неінверсно керованою паливною форсункою на електромагніт 20 керувального електромагнітного клапана 3 подається електроживлення. Термін «неінверсно керована» означає, що під час подачі електроживлення щонайменше один розпилювальний отвір перебуває у відкритому стані, і через нього паливо впорскується в камеру згоряння двигуна внутрішнього згоряння.

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						56
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Після подачі електроживлення електромагніт 20 створює магнітне поле, під дією якого якір 9 притягується до магніта та переміщується в його напрямку. У результаті ущільнювальна поверхня 8 якоря 9 відривається від сидла 10, відкриваючи сполучення керувальної порожнини 4 через зливний дросель 7 із зливною лінією (на кресленні не показана). Через відкрите сполучення паливо починає витікати з керувальної порожнини, внаслідок чого тиск у керувальній порожнині знижується.

Зменшення тиску в керувальній порожнині 4 призводить до зниження гідравлічного зусилля, що діє на керувальний поршень 2, унаслідок чого він переміщується в напрямку керувальної порожнини. При цьому клапанний елемент (голка) підіймається зі свого сидла, відкриваючи щонайменше один розпилювальний отвір, після чого розпочинається процес впорскування палива.

Хід якоря 9 обмежується обмежувальною втулкою 15, у кільцеву поверхню 14 якої якір упирається під час свого підйому. Осьову спрямованість руху якоря 9 забезпечує виконаний на ньому кільцевий виступ (бобишка) 34, який входить в отвір 16 обмежувальної втулки 15. Водночас з міркувань технологічності та економічності виготовлення форсунки отвір 16 і кільцевий виступ 34 не піддаються прецизійному припасувальному шліфуванню. Тому, незважаючи на дуже малий хід якоря 9 (зазвичай 0,02–0,04 мм), повністю усунути його коливання неможливо, що враховується під час сучасного конструктивного вдосконалення.

З метою забезпечення герметичної посадки ущільнювальної поверхні 8 на сидло 10 під час закриття зливного дроселя 7, що відповідає завершенню процесу впорскування палива, на якорі 9 виконано пружну напрямну кромку 13. Така кромка ефективно запобігає перекосу якоря навіть за нерівномірної дії зусилля пружного елемента 17. У разі виникнення перекосу напрямна кромка 13 першою контактує з опорною поверхнею 22, запобігаючи подальшому відхиленню якоря від осьового положення.

Для завершення процесу впорскування електроживлення з електромагніта 20 знімається. У цьому випадку якір 9 під дією пружного елемента 17 починає переміщуватися від магніта до моменту, коли ущільнювальна поверхня 8 знову сяде на сідло 10. При цьому зливний дросель 7 перекривається, і керувальна порожнина 4 через підвідний паливопровід 6 та вхідний дросель 5 заповнюється паливом під тиском, характерним для всієї паливної системи. Тиск у керувальній порожнині знову зростає до робочого рівня.

Унаслідок підвищення тиску збільшується гідравлічне зусилля, що діє на керувальний поршень 2, і він переміщується в напрямку клапанного елемента. Клапанний елемент при цьому опускається на своє сідло, перекриваючи щонайменше один розпилювальний отвір, у результаті чого процес упорскування припиняється.

Інверсно керована паливна форсунка відрізняється від неінверсно керованої тим, що за наявності електроживлення на електромагніті щонайменше один розпилювальний отвір закритий, а в знеструмленому стані магніта – відкритий. Для цього керувальний поршень 2 і клапанний елемент гідравлічно пов'язані між собою таким чином, що при переміщенні керувального поршня 2 у напрямку клапанного елемента він підіймається зі свого сидла та відкриває розпилювальний отвір. Натомість при подачі електроживлення керувальний поршень 2 переміщується в напрямку керувальної порожнини 4, унаслідок чого клапанний елемент опускається на сідло й перекриває подачу палива.

Згідно дослідних даних при використанні електромагнітних форсунок [8] питома ефективна витрата палива зменшується на 1% (в нашому випадку на 2 г/(кВт×год) – з 182 до 180 г/(кВт×год)).

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						58
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Мета дослідження полягає в аналітичному обґрунтуванні економічної доцільності використання вдосконалених паливних форсунок.

У таблиці 4.1 приведені техніко-економічні показники двигуна бЧН 14,4/16,5 (Volvo Penta D16MG)

Таблиця 4.1 – Техніко-економічні показники двигуна

Найменування	Позначення	Розмірність	Базовий двигун	Спроектований двигун
Потужність	N_e	кВт	450	450
Частота обертання	n	хв^{-1}	1500	1500
Діаметр циліндра, м	D	м	0,144	0,144
Хід поршня, м	S	м	0,165	0,165
Питома витрата палива	g_{ep}	кг/кВт·год	0,182	0,18
Механічний ккд	η_m	-	0,9	0,9
Питома витрата масла	g_m	кг/кВт·год	0,0022	0,0022
Ціна двигуна	Π	грн	300000	320000
Ціна палива	Π_{π}	грн/кг	60	60
Ціна масла	Π_m	грн/кг	50	50
Час роботи за рік	t	год	300	300
Число контрольних ремонтів	η	-	1	1
Сумарний коефіцієнт по капітальних ремонтах	ϵ_{min}	-	1,1	1,1
Коефіцієнт частини вартості роботи	b	-	0,05	0,05

Коефіцієнт використання потужності	K_{Π}	-	0,85	0,85
Коефіцієнт частини вартості капітального ремонту	$K_{к.р.}$	-	0,3	0,3
Ресурс двигуна до першого перебирання	$t_{пер}$	год	30000	30000
Ресурс двигуна до капітального ремонту	$t_{к.р.}$	год	100000	100000
Нормативний коефіцієнт порівняння економічної ефективності	E	-	0,15	0,15

Оцінювання економічної ефективності здійснюється відповідно до вимог методичних рекомендацій.

Зазначений підхід використовується для вирішення таких завдань:

1. Техніко-економічне обґрунтування вибору оптимальних варіантів виготовлення та впровадження нових технічних рішень.
2. Відображення показників економічності та ефективності у встановлених нормах і нормативних документах.
3. Розрахунок фактичного рівня ефективності застосування нової техніки в умовах експлуатації.

Розрахунок економічної ефективності

1) Річна продуктивність

$$N = K_{\Pi} \cdot N_e \cdot t, \text{ кВт*г за рік}$$

2) Термін служби

$$T = \frac{t_{кп}}{t}, \text{ рік}$$

3) Річні поточні витрати на паливо

$$Z_n = N \cdot \Pi_n \cdot g_e, \text{ грн}$$

4) Річні поточні витрати на масло

$$З_{\text{м}} = g_{\text{м}} \cdot N \cdot Ц_{\text{м}} \cdot 10^{-3}, \text{грн}$$

5) Річні витрати на поточний ремонт

$$З_{\text{н.р}} = \frac{b \cdot t \cdot Ц}{t_{\text{пер}}}, \text{грн}$$

6) Річні поточні витрати на капітальний ремонт

$$З_{\text{к.р}} = \frac{K_{\text{к.р}} \cdot t \cdot Ц}{t_{\text{к.р}} \cdot \varepsilon_{\text{min}}}, \text{грн}$$

7) Річний економічний ефект у споживача

$$U_1 = \underline{З_{\text{н}} + З_{\text{м}} + З_{\text{к.р}} + З_{\text{н.р}}}, \text{грн}$$

8) Річний економічний ефект у споживача від використання модернізованого двигуна.

$$E_{\text{к}} = \left[Ц_{\delta} \cdot \frac{N_{\epsilon}}{N_{\delta}} \cdot \left(\frac{\frac{1}{T_{\delta}} + E_{\delta}}{\frac{1}{T_{\epsilon}} + E_{\epsilon}} \right) + \frac{U_1^{1\delta} - U_1^{\epsilon}}{\frac{1}{T_{\epsilon}} + E_{\epsilon}} \right] \cdot Ц_{\epsilon}, \text{грн}$$

$$\text{де } U_1^{1\delta} = \frac{N_{\epsilon}}{N_{\delta}} \cdot U_1^{\delta}$$

9) Час окупності модернізованого двигуна

$$T_{\text{окуп}} = \frac{\Delta K}{\Delta S}, \text{років}$$

де ΔK – додаткові одноразові витрати на модернізацію двигуна,

ΔS – річна економія при експлуатації модернізованого двигуна

$$\Delta S = З_{\text{н}}^{\delta} - З_{\text{н}}^{\epsilon} + З_{\text{м}}^{\delta} - З_{\text{м}}^{\epsilon} + З_{\text{н.р}}^{\delta} - З_{\text{н.р}}^{\epsilon} + З_{\text{к.р}}^{\delta} - З_{\text{к.р}}^{\epsilon}, \text{грн}$$

Результати розрахунку економічної ефективності представлені в табл. 4.2.

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						61
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку економічної ефективності

Найменування	Позначення	Розмірність	Базовий двигун	Спроектований двигун
Річна продуктивність	N	кВт·год/рік	114750,0	114750,0
Термін служби	T	рік	15,0	15,0
Річні поточні витрати на паливо	Z_p	грн	1253070,0	1239300,0
Річні поточні витрати на масло	Z_m	грн	12622,5	12622,5
Річні витрати на поточний ремонт	$Z_{п.р}$	грн	150,0	160,0
Річні витрати на капітальний ремонт	$Z_{к.р}$	грн	245,5	261,8
Річний економічний ефект у споживача	U_1	грн	1266088,0	1252344,3
	U_1^{16}	грн	1266088,0	-
Річний економічний ефект у споживача від використання спроектованого двигуна	E_k	грн	43432,2	
Додаткові одноразові витрати на модернізацію двигуна	ΔK	грн	20000,0	
Річна економія при експлуатації модернізованого двигуна	ΔS	грн	13743,6	
Час окупності модернізованого двигуна	$T_{окуп}$	рік	1,46	
		місяць	17,46	

Річний економічний ефект модернізованого двигуна в порівнянні з базовим двигуном за рахунок використанням вдосконаленої системи впорскування у розмірі 43432,2 грн. Заміна базового двигуна окупиться приблизно за 18 місяців.

РОЗДІЛ 5

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМОГ ОХОРОНИ ПРАЦІ

Загальні положення та небезпечні виробничі фактори

Електромагнітні паливні форсунки є високоточними та технологічно складними елементами паливних систем сучасних високооберткових суднових двигунів. Вони забезпечують точне дозування палива, формування оптимального факела розпилення та адаптацію процесу впорскування до змінних режимів роботи двигуна. Разом із цим умови їх експлуатації характеризуються дією комплексу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, серед яких домінуючими є високий тиск палива, підвищені температури, електрична напруга, інтенсивні вібрації, шум, а також пожежо- і вибухонебезпечні властивості палива.

У високооберткових суднових двигунах тиск у паливній апаратурі досягає надзвичайно високих значень, що створює підвищену небезпеку для персоналу у разі розгерметизації елементів форсунки або паливопроводів. Одночасно електромагнітні форсунки є складовою електронно керованих систем, що передбачає наявність електричних ланцюгів керування та живлення, а отже – ризик ураження електричним струмом. Усе це зумовлює необхідність комплексного підходу до забезпечення охорони праці з урахуванням специфіки суднових умов експлуатації [9].

Забезпечення охорони праці при експлуатації електромагнітних паливних форсунок

Під час штатної експлуатації електромагнітних паливних форсунок основна увага повинна приділятися запобіганню аварійним ситуаціям, пов'язаним із порушенням герметичності паливної системи та відмовами електронних компонентів. Робота з форсунками допускається лише за умови повної справності паливної апаратури, наявності захисних кожухів і

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						63
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

огорожень, а також стабільної роботи системи автоматичного контролю та сигналізації.

Категорично забороняється виконання будь-яких операцій з форсунками на працюючому двигуні або при наявності тиску в паливній системі. Перед оглядом або регулюванням необхідно зупинити двигун, знизити тиск палива до атмосферного та переконатися у відсутності залишкової напруги в електричних колах керування. Особливу небезпеку становлять мікропротікання палива, які можуть бути малопомітними, але здатні призвести до важких травм у разі контакту струменя палива зі шкірою людини.

З метою зниження ризику опіків та термічних уражень усі роботи з електромагнітними форсунками повинні виконуватися лише після охолодження двигуна до безпечної температури. Обслуговуючий персонал зобов'язаний використовувати спеціальний захисний одяг, термостійкі рукавиці, захисні окуляри та засоби індивідуального захисту органів слуху. В умовах машинного відділення судна, де рівень шуму часто перевищує допустимі значення, це є обов'язковою вимогою охорони праці.

Вимоги охорони праці при технічному обслуговуванні електромагнітних форсунок

Технічне обслуговування електромагнітних паливних форсунок пов'язане з підвищеним рівнем небезпеки, оскільки передбачає втручання в паливну та електричну системи двигуна. Усі роботи з технічного обслуговування повинні виконуватися відповідно до затверджених інструкцій виробника та судових експлуатаційних регламентів.

Перед початком технічного обслуговування необхідно забезпечити повне відключення електроживлення системи керування двигуном, встановлення попереджувальних знаків і блокування можливості випадкового пуску двигуна. Особлива увага приділяється стану електричних роз'ємів форсунок,

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ІІЗ	Аркуш
						64
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ізоляції проводів і надійності заземлення, оскільки в умовах підвищеної вологості та вібрацій можливе прискорене старіння ізоляційних матеріалів.

Під час перевірки та очищення форсунок необхідно виключити застосування відкритого полум'я або іскроутворюючих інструментів. Використовувані мийні та очищувальні рідини повинні бути дозволені до застосування в суднових умовах і не створювати додаткових токсикологічних або пожежних ризиків. Усі зняті елементи форсунок мають зберігатися в спеціально відведених місцях, що унеможлиблює їх забруднення або механічне пошкодження.

Охорона праці при ремонті електромагнітних паливних форсунок

Ремонт електромагнітних паливних форсунок належить до робіт підвищеної небезпеки та повинен виконуватися лише кваліфікованим персоналом у спеціально обладнаних майстернях або сервісних центрах. Проведення ремонтних робіт безпосередньо в машинному відділенні судна допускається лише у виняткових випадках і за умови суворого дотримання вимог охорони праці.

Під час розбирання форсунок особливу небезпеку становлять залишкові тиски палива та можливе раптове переміщення пружних елементів. Тому перед початком ремонту необхідно повністю знеструмити форсунку, видалити залишки палива та переконатися у відсутності напружених пружинних вузлів. Усі операції повинні виконуватися із застосуванням спеціального інструменту, що відповідає вимогам вибухо- та пожежобезпеки.

Особлива увага приділяється дотриманню чистоти робочого місця, оскільки навіть незначні забруднення можуть негативно вплинути на точність роботи електромагнітної форсунки після ремонту. Забороняється використання несертифікованих запасних частин, оскільки це може призвести не лише до відмови форсунки, але й до виникнення небезпечних аварійних ситуацій під час подальшої експлуатації двигуна.

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						65
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Забезпечення екологічної безпеки при експлуатації електромагнітних паливних форсунок

Екологічна безпека є невід’ємною складовою охорони праці при експлуатації електромагнітних паливних форсунок суднових двигунів. Несправні або некоректно відрегульовані форсунки можуть призводити до погіршення процесу згоряння, збільшення викидів оксидів азоту, незгорілих вуглеводнів і твердих частинок, що негативно впливає як на довкілля, так і на умови праці персоналу в машинному відділенні.

Витоки палива з форсунок або паливопроводів становлять серйозну загрозу забруднення морського середовища та підвищують ризик пожеж. Тому регулярний контроль герметичності паливної системи, своєчасне виявлення та усунення несправностей є важливими заходами екологічної та виробничої безпеки. Зібране під час обслуговування паливо, промивні рідини та забруднені матеріали повинні утилізуватися відповідно до вимог міжнародних конвенцій та суднових екологічних процедур.

Застосування сучасних електромагнітних форсунок з високою точністю керування впорскуванням сприяє зниженню витрати палива та скороченню шкідливих викидів, що відповідає вимогам міжнародних екологічних стандартів і водночас покращує санітарно-гігієнічні умови праці екіпажу.

Висновки до розділу

У результаті проведеного аналізу встановлено, що забезпечення вимог охорони праці при експлуатації електромагнітних паливних форсунок високообертових суднових двигунів є комплексним завданням, яке охоплює технічні, організаційні та екологічні аспекти. Основними небезпечними факторами є високий тиск палива, електрична напруга, підвищені температури, вібрації та пожежонебезпечні властивості палива. Мінімізація ризиків досягається шляхом суворого дотримання регламентів експлуатації,

					<i>KPM.142.6221мз.25.09.00.ПЗ</i>	Аркуш
						66
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

технічного обслуговування і ремонту, використання засобів індивідуального захисту та належної підготовки обслуговуючого персоналу.

Дотримання вимог охорони праці не лише забезпечує безпечні умови роботи екіпажу, але й підвищує надійність та довговічність електромагнітних паливних форсунок, сприяє зниженню аварійності та негативного впливу суднових двигунів на довкілля. У сучасних умовах розвитку суднового машинобудування комплексний підхід до охорони праці при експлуатації паливної апаратури є необхідною передумовою ефективної та безпечної експлуатації суднових енергетичних установок.

					<i>КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ</i>	Аркуш
						67
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу, пов'язану з підвищенням експлуатаційних показників паливних форсунок високообертового суднового двигуна шляхом застосування електромагнітного керування процесом упорскування палива. Актуальність теми зумовлена зростанням вимог до економічності, екологічності та надійності суднових енергетичних установок, а також необхідністю адаптації паливної апаратури до сучасних режимів роботи двигунів і нормативних обмежень щодо викидів шкідливих речовин.

У першому розділі роботи проаналізовано умови експлуатації високообертового суднового двигуна 6ЧН 14,4/16,5 у складі енергетичної установки порома Peter Fraser. Розглянуто особливості конструкції та принципу дії основних систем двигуна, що визначають вимоги до паливних форсунок за умов роботи на змінних навантаженнях і в гібридній дизель-електричній схемі. Показано, що стабільність процесу упорскування та якості розпилення палива мають вирішальний вплив на економічні, екологічні та ресурсні показники двигуна.

У другому розділі виконано аналіз сучасних напрямків удосконалення паливних форсунок високообертових суднових двигунів. Встановлено, що перехід від традиційних механічних систем до електронно керованих рішень є об'єктивною тенденцією розвитку суднового двигунобудування. Особливу увагу приділено підвищенню швидкодії форсунок, реалізації багатофазного упорскування, оптимізації геометрії розпилювача, зменшенню кавітаційних та ерозійних явищ, а також підвищенню стійкості до забруднень і роботи на паливі змінної якості. Показано, що саме комплексне вдосконалення конструкції та керування форсункою дозволяє забезпечити стабільне сумішоутворення за високих частот обертання.

					КРМ.142.6221мз.25.09.00.ПЗ	Аркуш
						68
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

У третьому розділі розроблено технічне рішення щодо вдосконалення паливної форсунки двигуна 6ЧН 14,4/16,5 шляхом застосування електромагнітного клапана керування. Обґрунтовано доцільність такого підходу з позицій підвищення точності дозування палива, стабільності моменту початку упорскування та можливості адаптації параметрів упорскування до режимів роботи двигуна. Показано, що застосування електромагнітного керування дозволяє зменшити інерційність рухомих елементів, покращити повторюваність циклової подачі та створити передумови для реалізації багатофазного упорскування, що є особливо важливим для високообертових суднових двигунів.

У четвертому розділі виконано економічне обґрунтування запропонованого технічного рішення. Встановлено, що підвищення ефективності процесу упорскування палива за рахунок удосконалення форсунок сприяє зниженню питомої витрати палива, стабілізації теплового режиму двигуна та зменшенню витрат на технічне обслуговування. Отримані результати свідчать про економічну доцільність впровадження електромагнітних паливних форсунок у складі енергетичних установок суден аналогічного класу.

У п'ятому розділі розглянуто питання забезпечення вимог охорони праці при експлуатації, технічному обслуговуванні та ремонті електромагнітних паливних форсунок. Визначено основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, характерні для паливної апаратури високообертових суднових двигунів, і запропоновано комплекс технічних та організаційних заходів щодо їх мінімізації. Показано, що дотримання вимог охорони праці є необхідною умовою безпечної та надійної експлуатації як самих форсунок, так і суднової енергетичної установки в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Significant Small Ships of 2013. The Royal Institution of Naval Architects, 2013. pp. 38 - 39.
2. Workshop Manual. Groups 21–26. AB VOLVO PENTA, 2007. 228 p.
3. Woodyard D. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. Eighth edition. Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 200-Wheeler Road, Burlington, 2004. 914 p.
4. Наливайко В. С., Тимошевський Б. Г., Ткаченко С. Г. Суднові двигуни внутрішнього згоряння : підруч. Миколаїв : Вид-во Торубара В.В., 2015. 332 с.
5. Kees Kuiken. Diesel Engines for ship propulsion and power plants. Target Global Energy Training. Onnen, The Netherlands. July 2008.
6. Судновий механік: Довідник у 3 томах / за редакцією А. А. Фока. Одеса.: Фенікс, 2008. Т. 1. 1036 с.
7. Latarche M. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. Tenth edition. Elsevier Ltd, 2021. 930 p.
8. Woodyard D. Marine diesel engines and gas turbines. 9th ed. Oxford, 2009. 896 p.
9. ДСТУ 7239:2011 Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація.

					<i>KPM.142.6221мз.25.09.00.ПЗ</i>	Аркуш
						70
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		