

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
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ
СУДНОВОГО ДВИГУНА НА ЗАПАС МІЦНОСТІ ПОРШНЯ

Спеціальність 142 – Енергетичне машинобудування

Для здобуття другого (магістерського) рівня вищої освіти

Керівник роботи

Здобувач освіти




Миколаїв 2025

Олексій ГОГОРЕНКО

Олександр CHICAP

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

Завідувач кафедри ДВЗ, У та ТЕ

 О. А. Гогоренко
« » 20 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧЕВІ ОСВІТИ

Снісару Олександрю Едуардовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження впливу частоти обертання судового двигуна на запас міцності поршня
2. Керівник роботи канд. техн. наук, доцент Гогоренко О. А.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом закладу вищої освіти від "15" 10 2025 року № 1226-уч
3. Строк подання здобувачем роботи _____
4. Вихідні дані до роботи Двигун Wärtsilä 9L32/40; потужність двигуна – 4500 кВт; частота обертання колінчатого валу – 750 хв⁻¹; ступінь стиснення – 15,2; температура навколишнього середовища – 25 °С.
5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Особливості використання двигуна на судні; Моделювання робочого циклу і розрахунок динаміки двигуна на номінальному режимі; Оцінка залежності запасу міцності поршня від частоти обертання судового двигуна; Економічна оцінка дослідження; Організація безпеки праці під час експлуатації двигунів внутрішнього згорання
6. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Попорений переріз двигуна; Поршень; Графіки залежностей основних параметрів двигуна

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

Здобувач освіти

Керівник роботи



(підпис)

/Олександр ШЧЕПАН/
(прізвище та ініціали)/Олексій ГОГОРЕНКО/
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Метою даної кваліфікаційної роботи є оцінка впливу частоти обертання колінчастого вала на робочий процес і запас міцності поршня суднового дизельного двигуна на прикладі двигуна Wärtsilä 9L32/40, а також визначення раціональних режимів його роботи з точки зору надійності та міцності.

Об'єкт дослідження – робочі процеси та динамічні навантаження суднового чотиритактного дизельного двигуна Wärtsilä 9L32/40.

Предмет дослідження – напружено-деформований стан поршня та поршневого пальця двигуна Wärtsilä 9L32/40 залежно від частоти обертання колінчастого вала.

У роботі виконано тепловий розрахунок робочого циклу двигуна на номінальному режимі при частоті обертання $n = 750 \text{ хв}^{-1}$ із використанням методу Гріневецького–Мазінга. Визначено основні термодинамічні параметри процесів наповнення, стиснення, згоряння та розширення, побудовано індикаторну діаграму та розраховано індикаторні й ефективні показники двигуна.

На основі результатів теплового розрахунку виконано динамічний розрахунок двигуна з визначенням сил газового тиску, інерційних сил та зусиль у кривошипно-шатунному механізмі. Визначено екстремальні значення нормальних і тангенціальних сил, що діють на елементи циліндро-поршневої групи.

Виконано розрахунок поршня та поршневого пальця на міцність для номінального та дослідницьких режимів роботи двигуна при частотах обертання $n = 550, 650, 750, 850$ та 950 хв^{-1} . Проаналізовано зміну механічних і теплових навантажень у днищі поршня та побудовано графіки залежності сумарних напружень і теплового навантаження від частоти обертання. Встановлено, що зі зростанням частоти обертання запас міцності поршня зменшується, однак для всіх розглянутих режимів розрахункові напруження та деформації не перевищують допустимих значень. Найбільш раціональним з точки зору співвідношення навантажень і запасу міцності є режим роботи двигуна при $n = 750 \text{ хв}^{-1}$.

Ключові слова: ПОРШЕНЬ, ПОРШНЕВИЙ ПАЛЕЦЬ, СУДНОВИЙ ДИЗЕЛЬНИЙ ДВИГУН, ДИНАМІКА, НАВАНТАЖЕННЯ, РОБОЧИЙ ЦИКЛ.

					КРМ.142.6221м.25.20.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		4

ABSTRACT

The purpose of this qualification work is to assess the impact of crankshaft rotation speed on the working process and safety margin of a marine diesel engine piston using the Wärtsilä 9L32/40 engine as an example, as well as to determine rational operating modes in terms of reliability and durability.

The object of the study is the working processes and dynamic loads of the Wärtsilä 9L32/40 four-stroke marine diesel engine.

The subject of the study is the stress-strain state of the piston and piston pin of the Wärtsilä 9L32/40 engine depending on the crankshaft rotation speed.

The work includes a thermal calculation of the engine's operating cycle at rated speed $n = 750 \text{ min}^{-1}$ using the Grinevets-Mazing method. The main thermodynamic parameters of the filling, compression, combustion, and expansion processes are determined, an indicator diagram is constructed, and the indicator and effective performance of the engine are calculated.

Based on the results of the thermal calculation, a dynamic calculation of the engine was performed to determine the gas pressure forces, inertial forces, and forces in the crank-connecting rod mechanism. The extreme values of the normal and tangential forces acting on the elements of the cylinder-piston group were determined.

The strength of the piston and piston pin was calculated for the nominal and test modes of engine operation at rotational speeds of $n = 550, 650, 750, 850,$ and 950 min^{-1} . The change in mechanical and thermal loads in the piston crown was analyzed, and graphs of the dependence of total stresses and thermal load on the rotation frequency were constructed. It was established that with an increase in rotational frequency, the piston's safety margin decreases, but for all modes considered, the calculated stresses and deformations do not exceed the permissible values. The most rational in terms of the ratio of loads and safety margin is the engine operating mode at $n = 750 \text{ min}^{-1}$.

Keywords: PISTON, PISTON PIN, MARINE DIESEL ENGINE, DYNAMICS, LOAD, WORKING CYCLE.

					KPM.142.6221M.25.20.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		5

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	4
ВСТУП	7
1. ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДВИГУНІВ ТИПУ Wärtsilä 9L32/40 НА СУДНІ.....	9
1.1. Загальна характеристика двигуна	9
1.2. Технічне обслуговування, основні технічні параметри та режимні характеристики	16
1.3. Висновки до розділу.....	20
2. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ЦИКЛУ І РОЗРАХУНОК ДИНАМІКИ ДВИГУНА НА НОМІНАЛЬНОМУ РЕЖИМІ	21
2.1. Розрахунок робочого циклу двигуна	21
2.2. Розрахунок динаміки двигуна на номінальному режимі	26
2.3. Висновки до розділу.....	29
3. ОЦІНКА ЗАЛЕЖНОСТІ ЗАПАСУ МІЦНОСТІ ПОРШНЯ ВІД ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ СУДНОВОГО ДВИГУНА.....	30
3.1. Вихідні дані, розрахунок поршня на міцність	30
3.2. Розрахунок пальця поршня на міцність	33
3.3. Серія розрахунків робочого циклу, динаміки двигуна та побудова графіків залежності	35
3.4. Серія розрахунків поршня та пальця поршня двигуна на міцність при збільшенні частоти обертання.....	39
3.5. Висновки до розділу.....	40
4. ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ДОСЛІДЖЕННЯ.	41
4.1. Визначення витрат на матеріали	41
4.2. Розрахунок вартості палива й енергії.	41
4.3. Розрахунок амортизації універсального устаткування	42
4.4. Розрахунок заробітної плати	42
4.5. Внески на соціальні заходи.....	43
4.6. Накладні витрати	43
4.7. Розрахунок економічної ефективності	43
4.8. Висновки до розділу.....	45
5. ОРГАНІЗАЦІЯ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ	46
5.1 Конвенція СОЛАС 74.....	46
5.2 Конвенція МАРПОЛ 73/78	47
5.3. Техніка безпеки при несенні ваhti та виконанні робіт у машинному відділенні	49
5.4. Загальні питання забезпечення охорони судна.....	54
5.5. Висновки до розділу.....	58
ВИСНОВОК ДО РОБОТИ	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	61
ДОДАТОК.....	62

ВСТУП

Сучасний двигун внутрішнього згоряння представляє собою високотехнологічний агрегат з максимально сучасними рішеннями щодо його систем для надійності та безвідмовності. Для того щоб вирішити таке завдання треба застосовувати передові технології та звернути особливу увагу на найбільш навантаженні вузли. Один із таких вузлів на який впливають механічні та теплові навантаження є поршень та його елементи, особливістю якого є робота при різних, не постійних, режимах механічних і теплових дій.

Один із ключових та простих способів збільшення потужності це збільшення частоти обертання. Під час цих дій спостерігається покращення показників двигуна, але водночас збільшуються навантаження на вузли в тому числі на поршень та його елементи, що призводить до підвищеної деградації та зношення деталей.

Для того щоб визначити баланс між оптимальною частотою обертів двигуна та навантажень на поршень і його деталей для досягнення максимального ресурсу елементів та при цьому отримати безпечну потужність яка не буде негативно впливати на двигун, треба зробити серію розрахунків на визначення запасу міцності поршня при зміні частоти обертання, ця робота покаже наглядно які оберти двигуна Wartsila 9L 32/40 ефективними без негативного впливу на деталі та елементи агрегату.

Головним питанням роботи є визначення робочих, механічних, теплових та динамічних процесів 4-ох тактного дизельного двигуна Wartsila 9L 32/40. Розрахунок поршня та пальця поршня на міцність, графік зміни навантажень на поршень відносно різної частоти обертів двигуна - це основна частина виконання роботи.

За мету поставлено підвищення надійності двигуна Wartsila 9L 32/40.

Для того щоб досягти мети роботи було зроблено наступне:

- визначено особливості використання, основні технічні параметри та режимні характеристики двигуна типу Wartsila 9L 32/40;

					KPM.142.6221м.25.20.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		7

- Розраховано робочий цикл двигуна та динаміку з подальшим моделюванням індикаторної та динамічної діаграм під різну частоту обертання;
- Розраховано поршень та палець поршня на міцність з побудовою графіку залежності міцності поршня до обертів двигуна;
- Пораховано економічну оцінку дослідження, розраховано витрати на матеріали, заробітну плату, премію, та інші витрати на цю роботу;
- Розглянуто безпеку праці під час експлуатації двигунів внутрішнього згоряння та його елементів;

Методикою дослідження є використання наукової літератури та теоретичного узагальнення, спостереження, методи проєктування.

Цінність роботи полягає в тому, що результати цієї роботи можна використовувати з метою покращення ефективних, механічних, теплових показників та надійності двигунів внутрішнього згоряння.

					КРМ.142.6221м.25.20.ПЗ	Лист
						8
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДВИГУНА Wärtsilä 9L32/40 НА СУДНІ

1.1 Загальна характеристика двигуна

Двигун Wärtsilä 9L32/40 (рис. 1.1) призначений для використання в якості головного двигуна суден з прямим механічним приводом або дизель-електричним приводом, а також може використовуватися в якості допоміжного агрегату. Його конструкція дозволяє оптимізувати постійну частоту обертання або комбіновану криву потужності, що робить його привабливим для торгового флоту, включаючи танкери, контейнеровози, бурові платформи та судна постачання (OSV). Завдяки своїй надійності та довговічності Wärtsilä 32 часто вибирають для круїзних суден і поромів, а також для допоміжних систем електропостачання на судах різних класів.

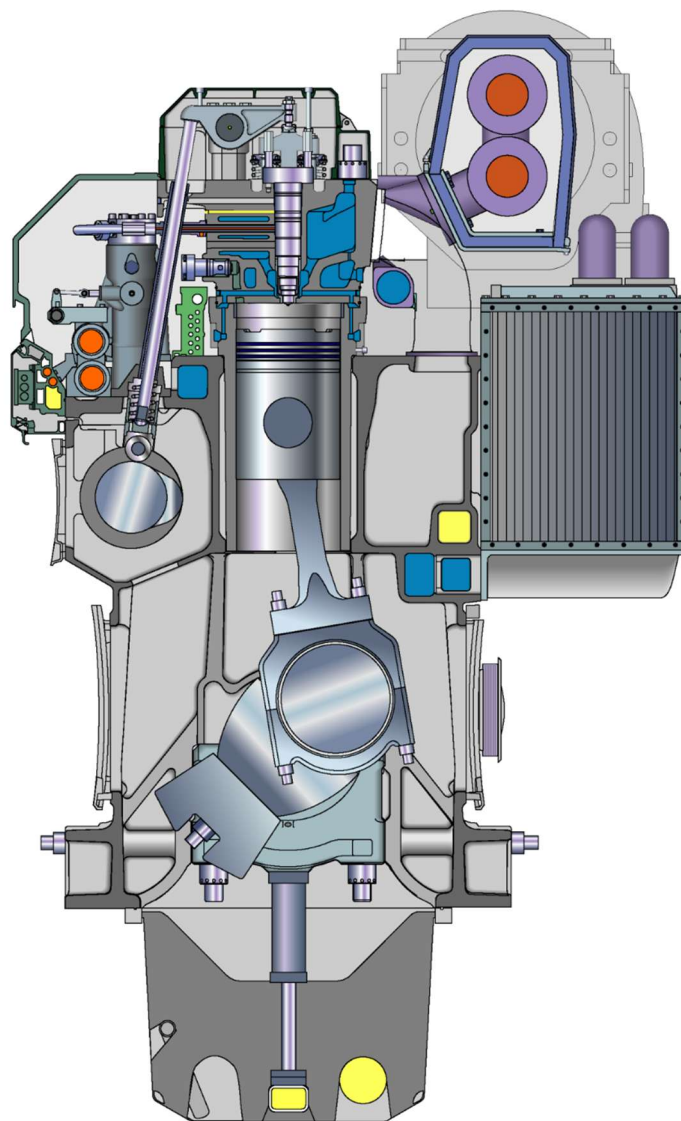


Рис. 1.1 Поперечний переріз двигуна Wärtsilä 9L32/40

Фундаментна рама двигуна складається з високих поздовжніх балок, зварених з поперечними балками, в яких розміщені опори рами. Фундаментна

					KPM.142.6221M.25.20.01.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		9

рама спрощеної коробчастої форми зварена зі сталі і закріплена болтами на сталевих клинах до фундаменту корпусу судна. Рама повністю зварена і має люки для доступу до кожного циліндрового відсіку і до відсіку приводу на стороні управління. Відсік приводу має люк на протилежному боці.

Двигун може ефективно працювати на різних видах палива, включаючи важкі сорти низької якості, і розрахований на тривалий термін служби без капітального ремонту до 24 000 годин. Завдяки простій конструкції та можливості технічного обслуговування залежно від стану, час простою скорочується, а експлуатаційні витрати мінімізуються. Wärtsilä 32 відповідає вимогам IMO Tier II щодо викидів, встановленим у додатку VI до MARPOL 73/7.

Двигуни серії 9L32/40 — це рядні 9-циліндрові турбонаддувні чотири-тактні двигуни з діаметром циліндра 320 мм і ходом поршня 400 мм.

На Рис. 1.2 зображені Масо-габаритні характеристики двигуна

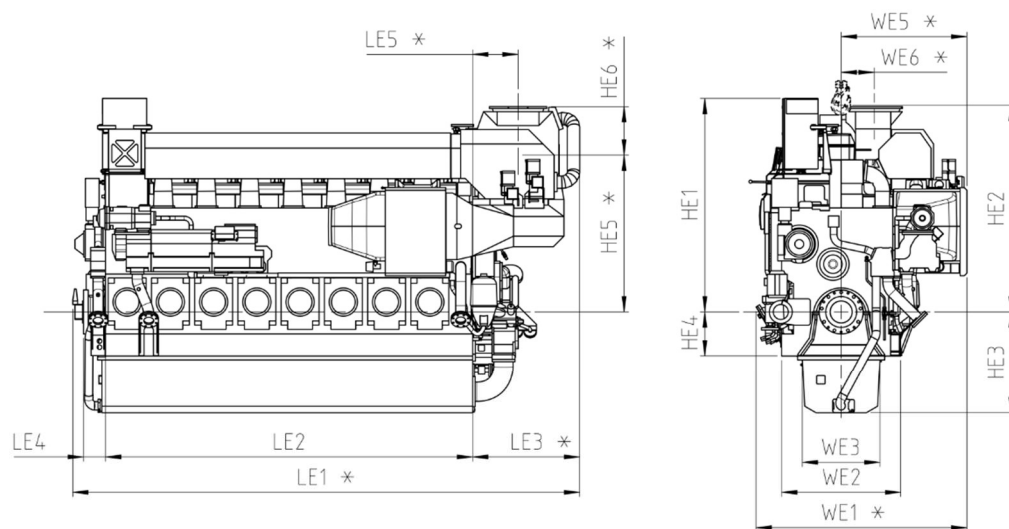


Fig 1-1 In-line engines (DAAF061578B)

Engine	LE1	LE2	LE3	LE4	LE5	HE1	HE2	HE3	HE4	HE5
W 6L32	5255	3670	1214	250	515	2423	2345	1153	500	1780
W 7L32	5745	4160	1214	250	515	2423	2345	1153	500	1780
W 8L32	6235	4650	1214	250	515	2423	2345	1153	500	1780
W 9L32	5725	5140	1214	250	515	2423	2345	1153	500	1780

Engine	HE6	WE1	WE2	WE3	WE5	WE6	Weight
W 6L32	550	2389	1350	880	1425	325	35.4
W 7L32	550	2389	1350	880	1425	325	39.7
W 8L32	550	2389	1350	880	1425	325	44.6
W 9L32	550	2389	1350	880	1425	325	48.7

Рис. 1.2 Масо-габаритні характеристики двигуна

Колінчастий вал (рис. 1.3) виготовлений із спеціальної сталі та оснащений механізмами компенсації для зменшення вібрацій. Шток (рис. 1.4) типу «Mors» дозволяє знімати поршень без відкривання підшипника на великому

кінці, що підвищує безпеку та зручність обслуговування. Поршень (рис. 1.5) складається з двох частин: нижня частина виготовлена з кулястого графітового лиття, верхня частина – з високоякісного матеріалу, що забезпечує стійкість до тиску та оптимальний зазор для функціонування кільця.



Рис. 1.3 Колінчастий вал

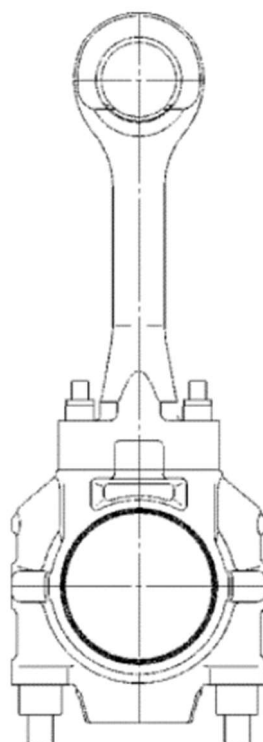


Рис. 1.4 Шатун

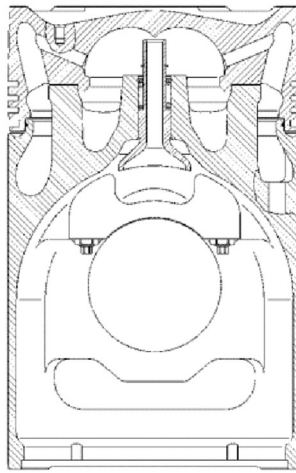


Рис. 1.5 Поршень

Втулки циліндрів (рис. 1.6) мають опорне кільце та верхнє кільце, що підвищує стійкість до деформацій та забезпечує ефективне охолодження.

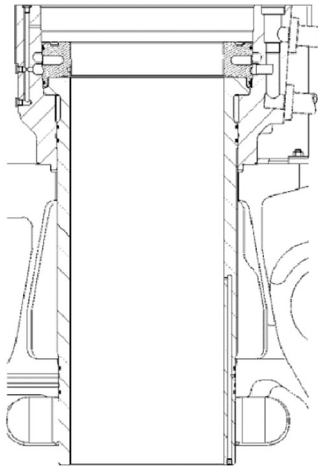


Рис. 1.6 Втулка циліндра

Кришки циліндрів (рис. 1.7) оснащені впускними та випускними клапанами, пусковим і індикаторним клапанами, а форсунка палива розташована в центрі. Двигун має два розподільні вали, які окремо керують клапанами та насосами впорскування, що дозволяє зменшити вплив крутильних вібрацій та підвищує точність газорозподілу.

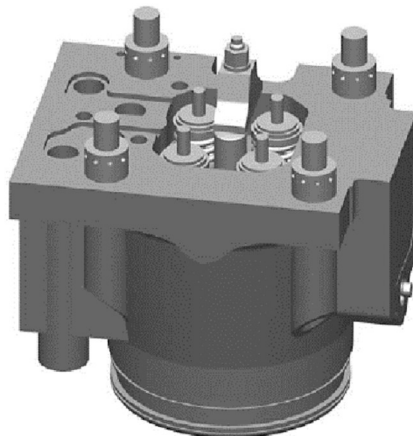


Рис. 1.7 Кришка циліндрів

Системи головного двигуна

Система подачі палива під високим тиском (рис. 1.8) має заслінку регулювання тиску з кінцевим регулюванням, циліндр VIT і два неохолоджувані голчасті клапани з одностороннім розпиленням палива для кожного циліндра. Конструкція паливної системи дозволяє працювати у всіх режимах тільки з високовязкими залишковими паливами, без використання дизельного палива.

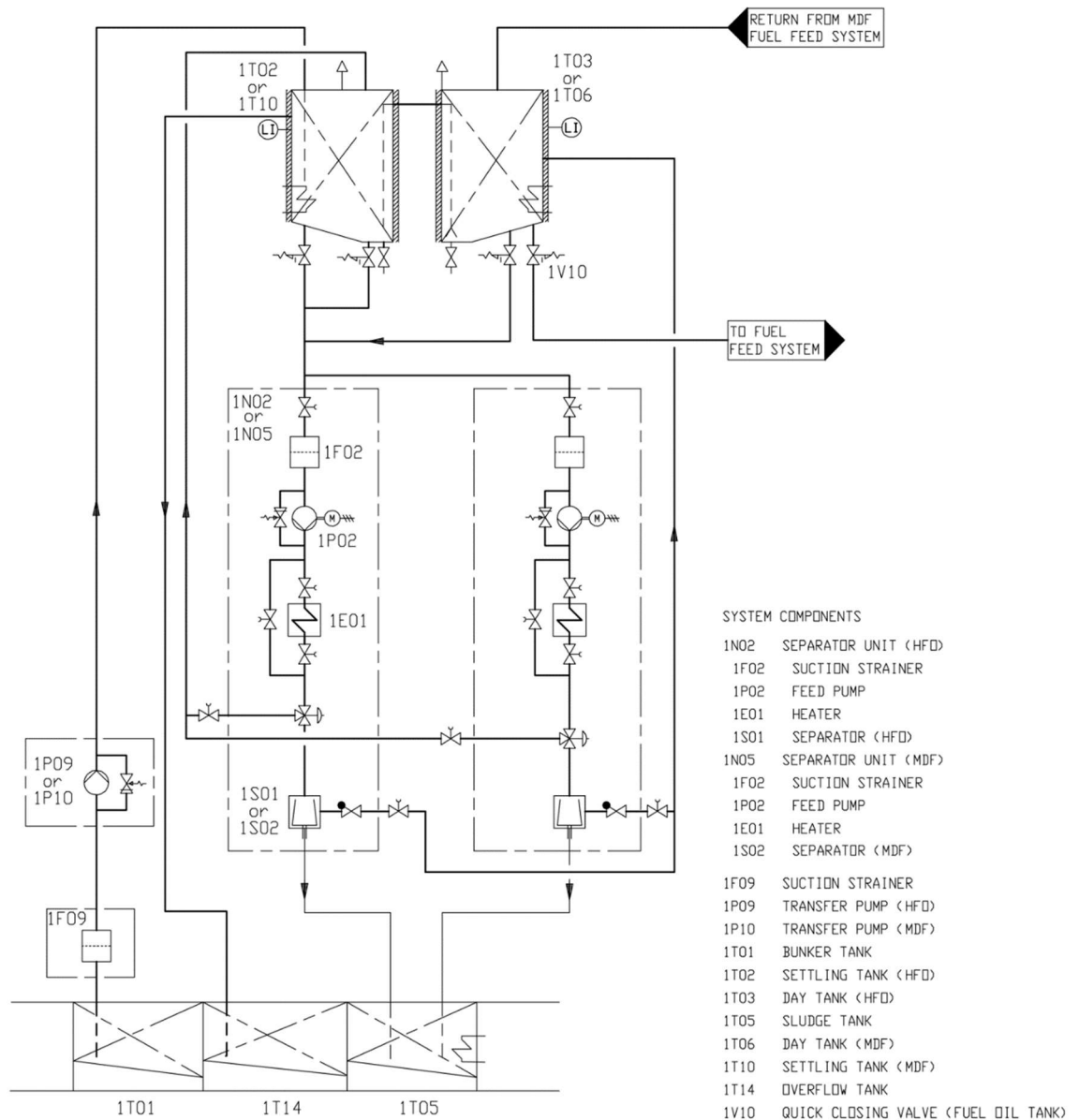


Рис. 1.8 Паливна система двигуна

Системи циркуляційного змащення (рис. 1.9)

Масляні насоси колінчастого валу (два штуки) – відцентрового типу, з електричним приводом. Масло подається до двигуна двома трубопроводами: нижньою трубою – для змащення рами та осевих підшипників і до приводного відсіку, верхньою трубою – до телескопів для змащення головних, хрестових і моторних підшипників та для охолодження поршнів. Подача масла до гідравлічної системи для відкриття випускних клапанів забезпечується

автономною системою з двома електричними гвинтовими насосами.

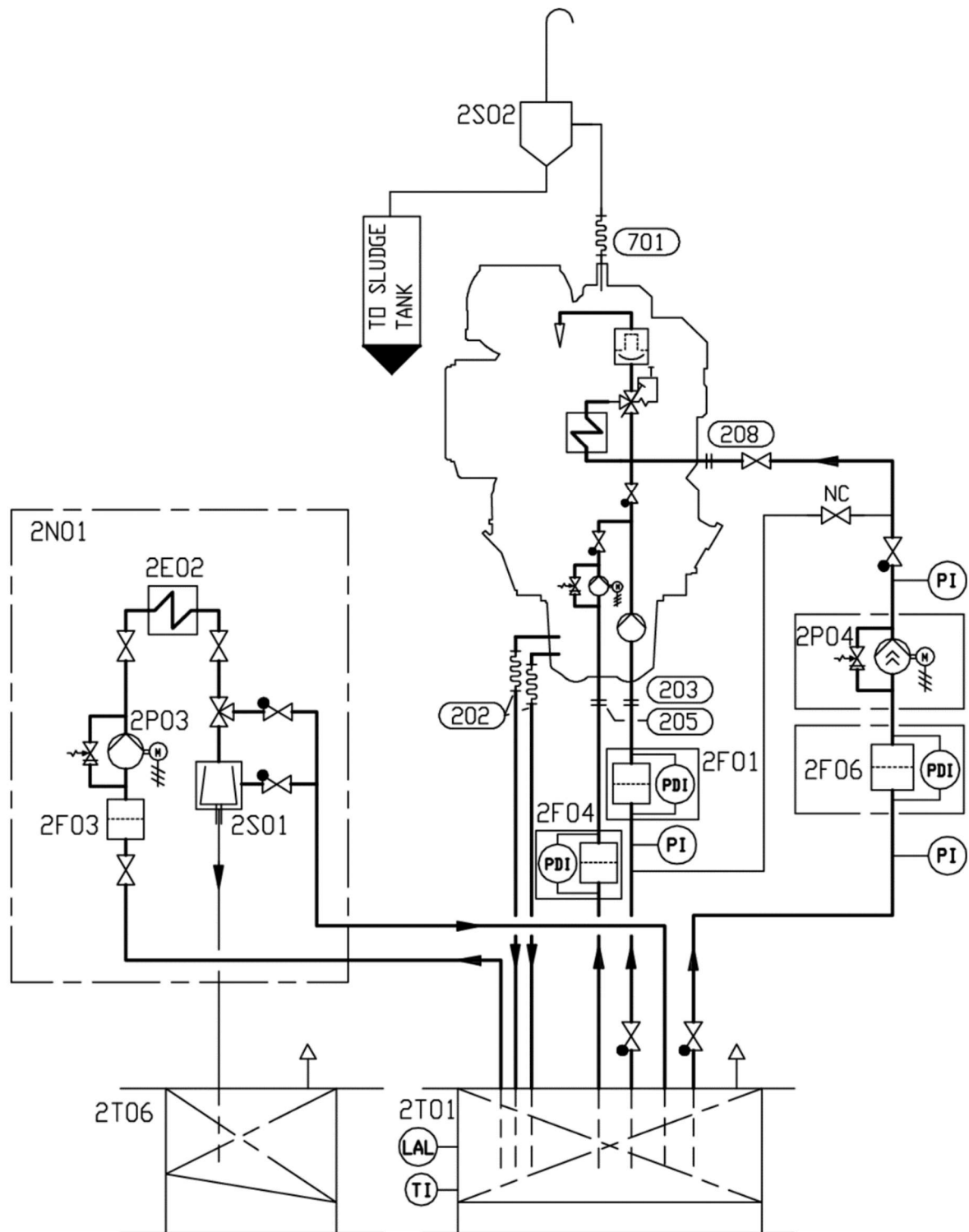


Рис. 1.9 Система змащення двигуна

Охолодження циліндрів (рис. 1.10) забезпечується двома електричними відцентровими насосами, які подають свіжу воду для охолодження мембран, циліндрових гільз, кришок і випускних клапанів циліндрів. Верхній край втулки, кришка і сідло випускного клапана мають отвори для проходження охолоджувальної води. Як правило, в систему вбудовується пластинчастий охолоджувач. Для попереднього прогрівання двигуна перед запуском в

Система стиснутого повітря призначена для пуску ГД, допоміжних двигунів СЕС та забезпечення суднових потреб; включає електрокомпресори, балони високого тиску 30 бар, масло-волого-відділювач та інше обладнання (рис. 1.11).

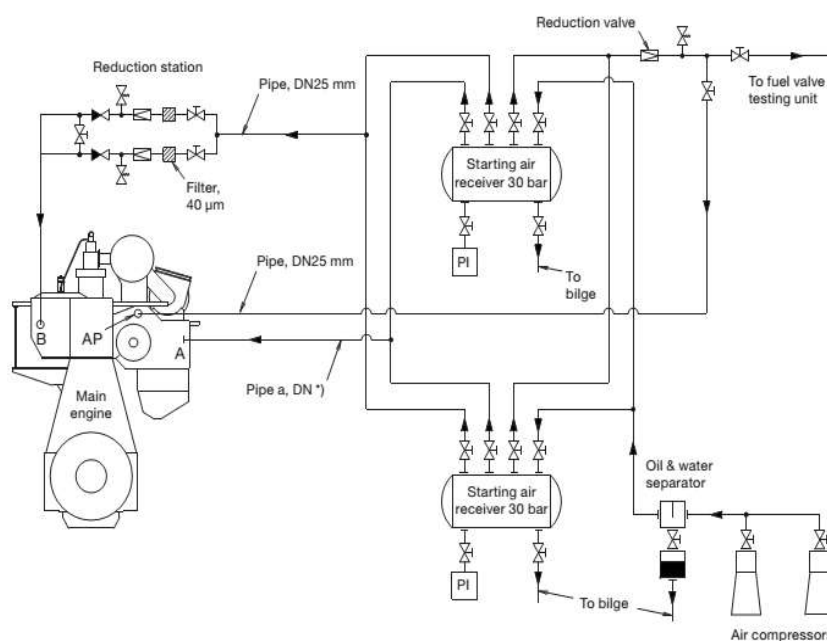


Рис. 1.11 Система стиснутого повітря

1.2 Технічне обслуговування, основні технічні параметри та режимні характеристики двигуна

Технічне обслуговування (ТО) полягає у виконанні робіт, що забезпечують підтримку необхідного стану СТЗ та конструкцій:

- 1) своєчасне виконання профілактичних та ремонтних робіт, включаючи контроль технічного стану;
- 2) видалення експлуатаційних відкладень;
- 3) виявлення та усунення несправностей;
- 4) відновлення та/або своєчасна заміна зношених деталей, елементів і вузлів.

Як правило, технічне обслуговування повинно виконуватися за графіком і забезпечувати працездатність судна та його елементів у період між капітальними ремонтами.

Для виконання технічного обслуговування члени технічної служби судна, які не несуть вахту, об'єднуються в бригади, склад яких визначається старшим механіком за необхідністю. Робоча бригада для частин судна керується боцманом, а для машини – другим механіком.

У технічному обслуговуванні безпосередньо беруть участь члени екіпажу, відповідальні за керівництво (демонтаж, огляд, усунення несправностей, закриття місця технічного обслуговування – присутність, контроль обсягу та якості виконаних робіт, приймання власних технічних засобів).

Розподіл за завідуваннями

Регламентується Статутом та уточнюється судновим розкладом по завідуваннях, який складає старший механік і стверджує капітан.

Другий механік: головні і аварійні двигуни, валопровід, дейдвудний пристрій, рушій, рульовий пристрій, баластні, водовідливні та масляні системи, системи пожежогасіння, аварійно-рятувальне обладнання механічної установки.

Третій механік: допоміжні двигуни, повітряні компресори, повітроохолоджувачі, паливна система, (на парових судах – котельна установка, ОУ, системи котельні води, забезпечення парою загально-суднових механізмів).

					КРМ.142.6221м.25.20.01.ПЗ	Лист
						16
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Четвертий механік: механічна частина палубних механізмів, вантажних і зачисних систем, котельна і опріснювальна установки, системи котельної води, обігріву баластних і паливних танків, парогасіння.

Електромеханік: на суднах без електроруху входить все електрообладнання, включаючи електричну частину засобів автоматизації і контролю.

Старпом+боцман: корпус судна, суднові пристрої, аварійно-рятувальне обладнання, мірні, повітряні та прийомні труби, трапи, обладнання загальносуднових системи – старпом відповідає за ТВ, боцман забезпечує ТО.

Другий помічник капітана: вантажні пристрої й устаткування трюмів (прийомні сітки, горловини танків, системи внутрішньої трюмної вентиляції та механізації) – відповідає за правильне ТВ цього обладнання.

Третій помічник: штурманське, навігаційне та гідрометеорологічне обладнання, прилади та інструменти, морські карти, керівництва і посібники для плавання і ін.

Профілактичні та ремонтні роботи становлять основну частину трудовитрат екіпажу, що пояснюється необхідністю значного застосування ручної праці.

Шляхами зниження трудомісткості суднових робіт є: впровадження засобів механізації; зменшення обсягу профілактичних та ремонтних робіт, що виконуються силами суднового екіпажу; комплектація механізмів у необхідній кількості змінно-запасними деталями; подальше підвищення надійності суднового обладнання.

Механізація трудомістких процесів передбачає, поряд із застосуванням механізованого інструменту з очищення та фарбування, використання механізованих пристроїв для монтажних та демонтажних робіт на ГД, допоміжних механізмах та суднових пристроях, способів очищення цистерн та теплообмінних апаратів та ін.

В процесі експлуатації деталі суднових машин і механізмів схильні до природного зносу, що призводить до зміни техніко-експлуатаційних показників суднового устаткування. Підтримка і відновлення цих показників є завданням

технічного обслуговування, яку вирішують шляхом проведення ремонтів, профілактичних розтинів, оглядів і ревізій суднових механізмів, моточисток, налагоджень, регулювань, своєчасного забезпечення матеріалами, змінними деталями, інструментом, засобами механізації робіт в суднових умовах.

Ремонт суднової техніки в залежності від необхідних для його виконання обладнання, оснащення та кваліфікації виконавців можна розділити на два види: заводський і експлуатаційний. Заводський ремонт може бути виконаний тільки в заводських умовах з виводом судна з експлуатації, експлуатаційний може проводитися в суднових умовах в процесі експлуатації.

Чіткий поділ суднових ремонтних робіт на заводські та експлуатаційні дозволяє по кожному судну встановити номенклатуру ремонтних робіт, для виконання яких потрібно заводське обладнання. Визначення необхідної періодичності цих робіт дозволяє встановити оптимальні терміни роботи судна без заводського ремонту.

Основним документом, що визначає організацію технічного обслуговування, є план-графік робіт, виконуваних в умовах експлуатації. План-графік визначає строки проведення оглядових профілактичних робіт на час експлуатації судна без виведення його на заводський ремонт; його також використовують для оперативного планування робіт на місяць, рейс, стоянку. Плани-графіки для механічної частини складають по завідування ІІ, ІІІ, ІV механіків, а по електромеханічній частини – по завідування електромеханіка.

Вихідні дані для розрахунків двигуна приведені в таблиці 1.1

Двигун з номінальною потужністю 4500 кВт, частота обертання колінчатого валу становить 750 об/хв, а ступінь стиснення дорівнює 15,2. Температура навколишнього середовища – 25 °С.

Таблиця 1.1

Діаметр поршня	мм	D=	320
Частота обертання КВ	хв ⁻¹	n=	750
Максимальний тиск згоряння	МПа	P_z=	19,453
Тиск на початку стиску	МПа	P_a=	0,366
Тиск наддуву	МПа	P_k=	0,381
Тиск залишкових газів	МПа	P_r=	0,362
Кривошипно-шатунне відношення.		l=	0,204
Маса деталей, що рухаються зворотно-поступово.		m=	110,000
Радіус кривошипа.	м	r=	0,200
Ступінь стиску		e=	15,2
Показник політропи стиску		n1=	1,3640
Показник політропи розширення		n2=	1,271
Ступінь попереднього стиску		p=	1,611
Втрата тиску в охоложувачі	МПа	DR=	0,004

1.3 Висновки до розділу

В ході вивчення технічних параметрів та режимних характеристик двигуна Wärtsilä 9L 32/40, це сучасний двигун внутрішнього згоряння, він має найкращу в своєму класі щільність потужності та економію палива в широкому діапазоні робочих режимів.

Wärtsilä 32 має перевірену репутацію в широкому діапазоні застосувань на судах. Він використовується для головних двигунів, як з прямим механічним приводом, так і дизель-електричних, а також як допоміжний двигун. Він може бути оптимізований для постійної швидкості або по комбінованій кривій. У торговому флоті типові області застосування включають використання в якості головного двигуна на різних типах танкерів і контейнеровозів.

У морському секторі надійність Wärtsilä 32 зробила його найпопулярнішим середньошвидкісним двигуном для суден OSV та бурових суден. Аналогічно, у секторі круїзних суден та поромів Wärtsilä 32 зарекомендував себе як найпопулярніший двигун свого розміру.

Стандартний Wärtsilä 32, звичайно, відповідає вимогам IMO Tier II. Двигун розроблений для тривалої роботи без технічного обслуговування та має інтервали капітального ремонту до 24 000 годин. Це, а також конструкція, що не вимагає особливого технічного обслуговування, скорочують час простою, сприяють плануванню та знижують експлуатаційні витрати.

Разом з технічним обслуговуванням за станом та довгостроковими договорами на обслуговування, інтервал капітального ремонту для Wärtsilä 32 може бути ще більше подовжений, що мінімізує витрати на технічне обслуговування та максимізує дохідність судна.

					KPM.142.6221м.25.20.01.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		20

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ЦИКЛУ І РОЗРАХУНОК ДИНАМІКИ ДВИГУНА НА НОМІНАЛЬНОМУ РЕЖИМІ

2.1 Розрахунок робочого циклу двигуна

Аналіз фактичного робочого циклу поршневого двигуна за підходом Гриневець-Мазінга виявляє значні відхилення від абстрактних ідеалізованих циклів. Основною метою теплового аналізу процесів у двигуні внутрішнього згоряння є визначення ключових характеристик, що впливають на його економічну ефективність і термодинамічну ефективність. Ці дані також є основою для подальшого проєктування компонентів, зокрема для розрахунку міцності, стійкості до деформації та зносостійкості. Тепловий аналіз дає змогу створити діаграму показників, розрахувати середній показник тиску та визначити оптимальні розміри і кількість циліндрів для нової конструкції двигуна на основі заданої потужності.

Для виконання теплових розрахунків необхідно враховувати нижню теплоту згоряння палива, яка визначається вмістом горючих компонентів і співвідношенням хімічних елементів у його складі. Саме це значення використовується в розрахунках, оскільки воно є більш точним для реальних умов експлуатації. Існує чіткий взаємозв'язок між нижньою і верхньою теплотою згоряння, який враховується при моделюванні процесів.

В рамках кваліфікаційної роботи було застосовано перевірений підхід термоаналізу, який вперше запропонував В. І. Гриневецький, а згодом модернізував Е. К. Мазінг. Цей метод базується на принципах термохімії та термодинаміки і дозволяє комплексно моделювати теплові процеси в робочому об'ємі циліндра. Для розрахунків було використано програмне забезпечення Mathcad, що забезпечило точність і наочність результатів.

Вихідні параметри для розрахунку робочого циклу двигуна

У табл. 2.1 наведено вхідні дані для розрахунку робочого циклу двигуна

Таблиця 2.1

Параметр	Позначення	Розмірність	Значення
Ефективна потужність	N_e	кВт	4500
Частота обертання	n	хв^{-1}	750
Тиск навколишнього середовища	P_0	МПа	0.103
Температура навколишнього середовища	T_0	К	298
Ступінь підвищення тиску в компресорі	P_k		3.7
Коефіцієнт продувки	Φ_a		1.03
Коефіцієнт залишкових газів	Y_r		0.02
Коефіцієнт використання теплоти в точці Z	ξ_z		0.92
Коефіцієнт використання теплоти в точці b	ξ_b		0.98
Ступінь стиснення	ε		15.2
Ступінь підвищення тиску при згорянні	λ		1.3
Підігрів заряду від стінок циліндра	ΔT_a	К	11
Доля ходу поршня втраченого на продувку	Φ_n		0
Коефіцієнт скруглення індикаторної діаграми	ζ		0.96
Механічний ККД двигуна	η_m		0.95
Адіабатний ККД компресора	$\eta_{k.ad}$		0.76
Зниження тиску в повітроохолоджувачі	$\Delta P_{ох.}$	МПа	0.004
ККД системи охолодження наддувного повітря	η_o		0.9
Температура залишкових газів	T_r	К	600
Масовий склад палива	C	кг/кг	0.87
	H		0.126
	S		0
	O		0.004
Нижча теплота згоряння палива	Q_H	кДж/кг	42664.4
Кількість циліндрів	i		9
Діаметр циліндру	D_c	м	0.32
Хід поршня	S_c	м	0.40
Коефіцієнт тактності	z		0.5
Коефіцієнт надлишку повітря для згоряння	α		2.3
Показник адіабати для повітря	k_b		1.4
Механічний ККД турбіни	$\eta_{t.m}$		0.96
Адіабатний ККД турбіни	$\eta_{t.ad}$		0.75

Розрахунок робочого циклу двигуна

Розрахунок робочого циклу розраховано в програмі MATHCAD, результати приведені у табл. 2.2

Таблиця 2.2

Параметр	Позначення	Розмірність	Значення
Результати розрахунку процесу наповнення			
Тиск наддуву	P_k	МПа	0.381
Температура повітря за компресором	T_k	К	475.939
Температура повітря перед двигуном	T_s	К	315.794
Температура заряду до кінця процесу наповнення	T_a	К	332.151
Тиск повітря перед двигуном	P_s	МПа	0.377
Тиск заряду до кінця процесу наповнення	P_a	МПа	0.366
Коефіцієнт наповнення	η_n		0.968
Результати розрахунку процесу стиснення			
Середній показник політропи стиску	n_1		1.364
Тиск в кінці стиску	P_c	МПа	14.964
Температура в кінці стиску	T_c	К	893.92
Результати розрахунку процесу згорання			
Дійсна кількість повітря для згорання	L	кмоль/кг	1.138
Хімічний коефіцієнт молекулярної зміни	β_0		1.0278
Дійсний коефіцієнт молекулярної зміни	β		1.0273
Доля палива, що згоріла в точці z	x_z		0.939
Коефіцієнт молекулярної зміни в точці z	β_z		1.026
Максимальна температура згорання	T_z	К	1825.388
Максимальний тиск згорання	P_z	МПа	19.453
Результати розрахунку процесу розширення			
Ступінь попереднього розширення	ρ		1.611
Ступінь послідовного розширення	δ		9.435
Показник політропи розширення	n_2		1.271
Температура в кінці процесу розширення	T_b	К	993.17
Тиск в кінці процесу розширення	P_b	МПа	1.122
Результати визначення індикаторних показників			
Теоретичний середній індикаторний тиск	P_i	МПа	2.727
Дійсний середній індикаторний тиск	P_i	МПа	2.618
Індикаторна питома витрата палива	b_i	кг/кВт × г	0.168
Індикаторний ККД	η_i		0.503
Результати визначення ефективних показників			
Середній ефективний тиск	P_e	МПа	2.487
Ефективний ККД двигуна	η_e		0.477
Питома ефективна витрата палива	b_e	кг/кВт × г	0.1767
Ефективна потужність двигуна	N_e		4503.785
Порівняння заданої і отриманої ефективної потужності двигуна	ΔN		0.084 – 1%
Результати визначення дійсного P_k компресора			
Витрата повітря через компресор	G	кг/с	7.505
Витрата газів через турбіну	G_t	кг/с	7.727
Тиск газів перед турбіною	P_r	МПа	0.362
Температура газу перед турбіною	T_t	К	780.285
Загальна кількість продуктів згорання	M_s	кмоль	1.17
Універсальна газова стала для відпрацьованих газів	R_t	кДж/кг × К	287.439
Показник адіабати розширення газу в турбіні	k_t		1.376
Дійсний ступінь підвищення тиску в компресорі	P_{kd}		3.714
Розрахунковий тиск наддуву	ΔP_k		0.366 – 1%

Розрахунок і створення індикаторних діаграм

Графічне представлення процесів у вигляді розрахункових діаграм базується на результатах моделювання робочого циклу, яке було проведено в середовищі MathCad. Ці діаграми потім використовуються як основа для динамічного аналізу та розрахунків міцності конструктивних елементів двигуна. Діаграма була створена аналітично за допомогою програмного пакету Excel.

Значення координат для процесів стиснення та розширення, які описуються політропними залежностями, розраховуються за такими формулами: Для процесу стиснення:

$$p = \frac{p_c}{(V/V_c)^{n_1}}$$

- Для процесу розширення:

$$p = \frac{p_z * \rho^{n_2}}{(V/V_c)^{n_2}}$$

де $v/v_c = \epsilon_x$ – відношення об'ємів, яке представляє собою поточне значення ступеня стиснення.

Для обчислення індикаторної діаграми необхідні наступні вихідні дані:

Показник політропи стиснення n_1	1,364
Показник політропи розширення n_2	1,271
Тиск кінця стиснення p_c , МПа	14,964
Максимальний тиск згоряння p_z , МПа	19,453
Ступінь попереднього розширення ρ	1,611
Ступінь стиснення ϵ	15,2

Табл. 2.3 – результат розрахунків для побудови індикаторної діаграми

V/V_c	$p_{ст}$	$p_{розш}$
1,00	19,45	
1,00	14,96	19,45
1,61	7,81	19,45
2,29	4,83	12,44
2,97	3,39	8,94
3,65	2,56	6,88
4,33	2,03	5,54
5,01	1,66	4,60
5,69	1,40	3,91
6,37	1,20	3,39
7,05	1,04	2,98
7,73	0,92	2,65
8,41	0,82	2,38
9,08	0,74	2,16
9,76	0,67	1,97
10,44	0,61	1,81
11,12	0,56	1,67
11,80	0,52	1,55
12,48	0,48	1,44
13,16	0,44	1,35
13,84	0,42	1,26
14,52	0,39	1,19
15,20	0,37	1,12
15,20	0,37	0,37

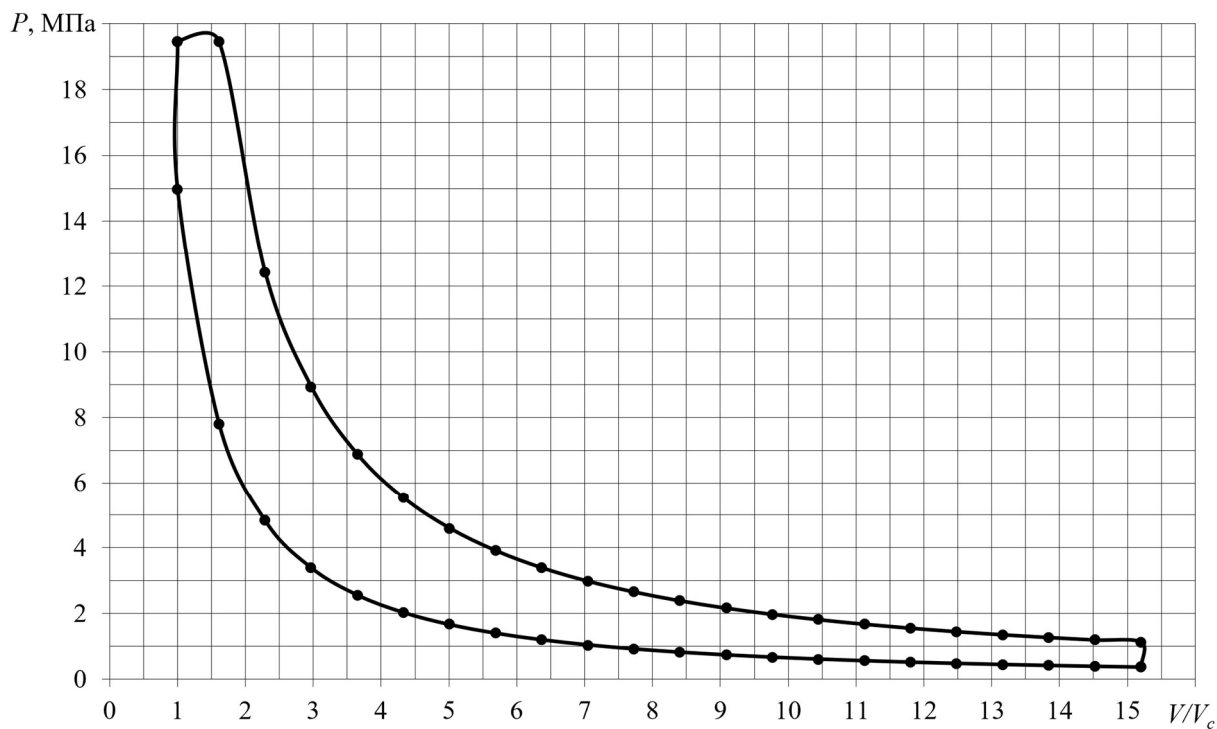


Рис.2.1 – індикаторна діаграма

2.2 Розрахунок динаміки двигуна на номінальному режимі

Динамічний розрахунок двигуна виконується для визначення сил і моментів, що діють на деталі циліндро-поршневої групи і колінчато-шатунного механізму, а також для визначення крутного моменту на вихідному валу двигуна.

Початкові дані для динамічного розрахунку двигуна наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

Діаметр поршня	мм	D=	320
Частота обертання КВ	хв ⁻¹	n=	750
Максимальний тиск згоряння	МПа	P_z=	19,453
Тиск на початку стиску	МПа	P_a=	0,366
Тиск наддуву	МПа	P_k=	0,381
Тиск залишкових газів	МПа	P_r=	0,362
Кривошипно-шатунне відношення.		l=	0,204
Маса деталей, що рухаються зворотно-поступово.		m=	110,000
Радіус кривошипа.	м	r=	0,200
Ступінь стиску		e=	15,2
Показник політропи стиску		n1=	1,3640
Показник політропи розширення		n2=	1,271
Ступінь попереднього стиску		p=	1,611
Втрата тиску в охолоджувачі	МПа	DR=	0,004

Динамічний розрахунок проводиться у табличній формі, який приводиться в таблиця 2.5

Таблиця 2.5

φ°	P_r	P_j	P_{dv}	N	Z	T
0	0,3770	-2,0306	-1,6536	0,0000	-1,6536	0,0000
15	0,3770	-1,9270	-1,5500	-0,0820	-1,4760	-0,4803
30	0,3770	-1,6326	-1,2556	-0,1287	-1,0230	-0,7393
45	0,3770	-1,1926	-0,8156	-0,1189	-0,4926	-0,6607
60	0,3770	-0,6712	-0,2942	-0,0528	-0,1014	-0,2812
75	0,3770	-0,1385	0,2385	0,0479	0,0154	0,2427
90	0,3770	0,3441	0,7211	0,1503	-0,1503	0,7211
105	0,3770	0,7345	1,1115	0,2234	-0,5034	1,0158
120	0,3770	1,0153	1,3923	0,2499	-0,9126	1,0808
135	0,3770	1,1926	1,5696	0,2288	-1,2716	0,9481
150	0,3770	1,2885	1,6655	0,1708	-1,5278	0,6849
165	0,3770	1,3311	1,7081	0,0903	-1,6733	0,3549
180	0,3770	1,3425	1,7195	0,0000	-1,7195	0,0000
195	0,3724	1,3311	1,7035	-0,0901	-1,6688	-0,3539
210	0,3929	1,2885	1,6814	-0,1724	-1,5424	-0,6914
225	0,4310	1,1926	1,6236	-0,2367	-1,3154	-0,9807
240	0,4944	1,0153	1,5097	-0,2710	-0,9895	-1,1719
255	0,5974	0,7345	1,3318	-0,2677	-0,6033	-1,2172
270	0,7684	0,3441	1,1125	-0,2318	-0,2318	-1,1125
285	1,0668	-0,1385	0,9282	-0,1866	0,0600	-0,9449
300	1,6262	-0,6712	0,9550	-0,1714	0,3291	-0,9128
315	2,7757	-1,1926	1,5831	-0,2308	0,9562	-1,2826
330	5,3330	-1,6326	3,7004	-0,3794	3,0150	-2,1788
345	10,5796	-1,9270	8,6526	-0,4575	8,2394	-2,6814
360	14,9801	-2,0306	12,9496	0,0000	12,9496	0,0000
375	19,4530	-1,9270	17,5260	0,9266	16,6890	5,4311
390	13,6222	-1,6326	11,9896	1,2293	9,7686	7,0594
405	7,4127	-1,1926	6,2201	0,9067	3,7571	5,0395
420	4,5043	-0,6712	3,8330	0,6880	1,3207	3,6635
435	3,0408	-0,1385	2,9023	0,5833	0,1877	2,9544
450	2,2400	0,3441	2,5841	0,5385	-0,5385	2,5841
465	1,7715	0,7345	2,5060	0,5037	-1,1351	2,2902
480	1,4851	1,0153	2,5004	0,4488	-1,6389	1,9410
495	1,3070	1,1926	2,4995	0,3644	-2,0251	1,5098
510	1,1989	1,2885	2,4874	0,2551	-2,2817	1,0228
525	1,1406	1,3311	2,4717	0,1307	-2,4213	0,5135
540	1,1222	1,3425	2,4647	0,0000	-2,4647	0,0000
555	0,3620	1,3311	1,6931	-0,0895	-1,6586	-0,3517
570	0,3620	1,2885	1,6505	-0,1692	-1,5140	-0,6787
585	0,3620	1,1926	1,5546	-0,2266	-1,2595	-0,9390
600	0,3620	1,0153	1,3773	-0,2472	-0,9027	-1,0692
615	0,3620	0,7345	1,0965	-0,2204	-0,4967	-1,0021
630	0,3620	0,3441	0,7061	-0,1471	-0,1471	-0,7061
645	0,3620	-0,1385	0,2235	-0,0449	0,0145	-0,2275
660	0,3620	-0,6712	-0,3092	0,0555	-0,1065	0,2956
675	0,3620	-1,1926	-0,8306	0,1211	-0,5017	0,6729
690	0,3620	-1,6326	-1,2706	0,1303	-1,0352	0,7481
705	0,3620	-1,9270	-1,5650	0,0827	-1,4903	0,4850
720	0,3620	-2,0306	-1,6686	0,0000	-1,6686	0,0000

За даними табл. 3.2. були побудовані діаграми P_r , P_j , P_{dv} , N , T , Z , які зображено на рис. 2.2 та 2.3

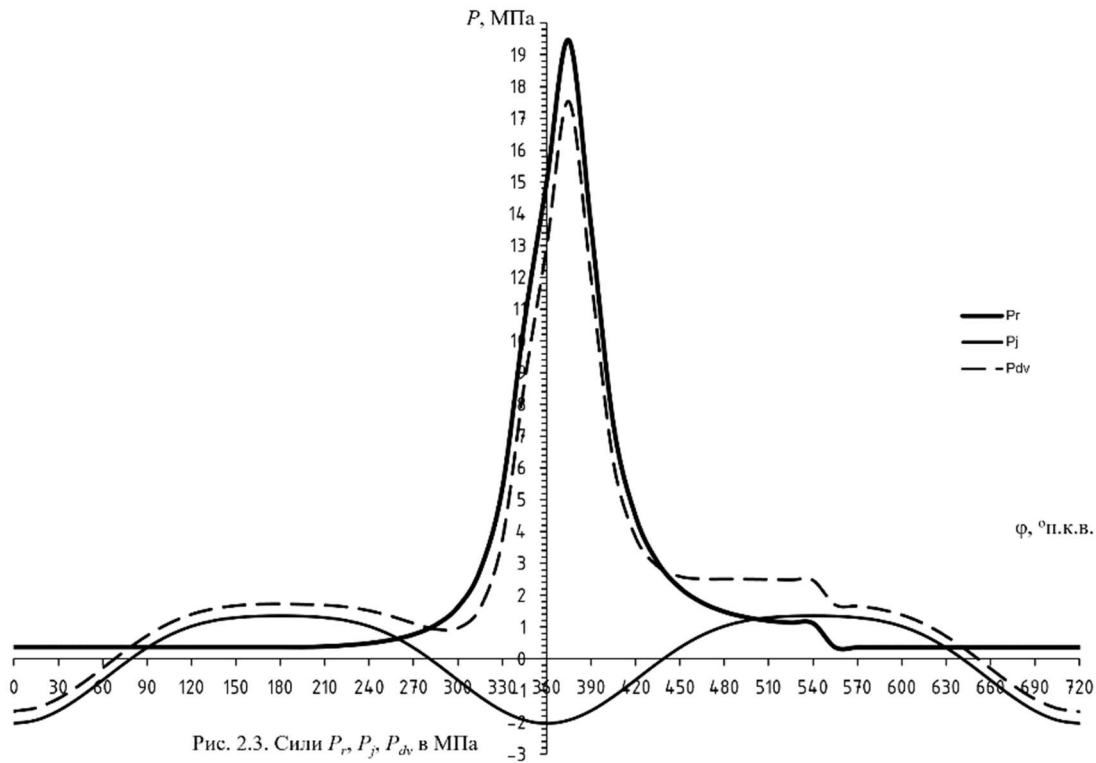


Рис. 2.2

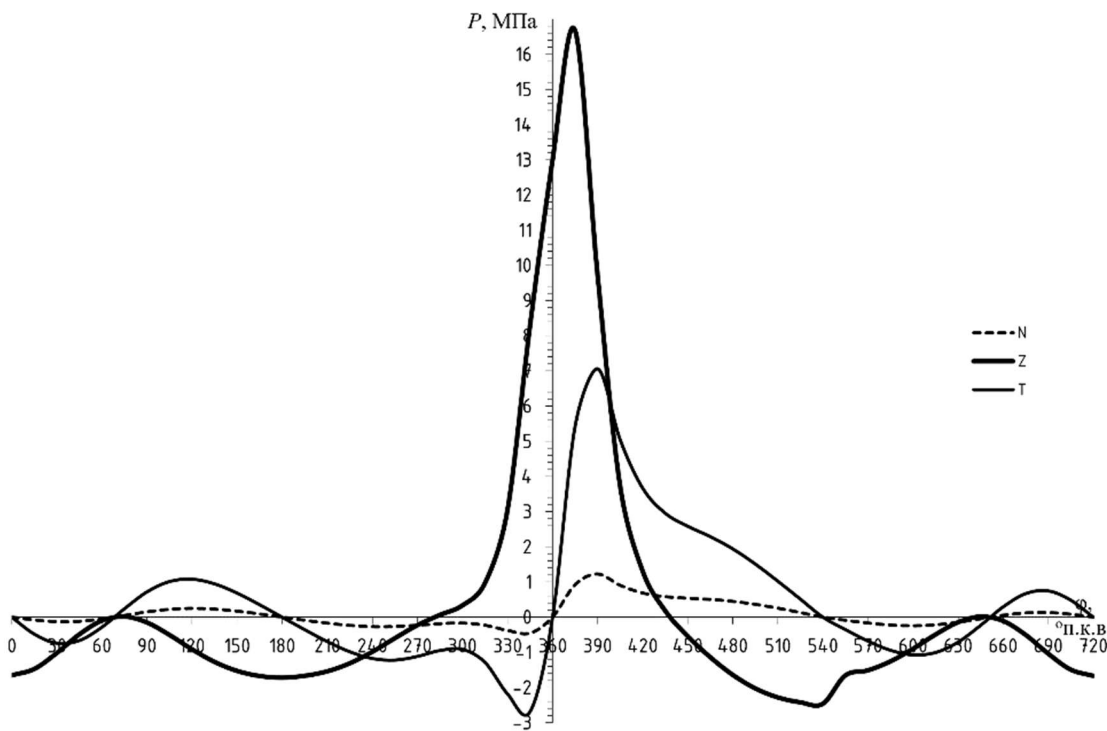


Рис. 2.3

2.3 Висновки до розділу

В цьому розділі побудовано графік робочого циклу і розраховано динаміку двигуна на номінальному режимі, при розрахунках на номінальній частоті обертів (750), можна відслідкувати оптимальні показники роботи двигуна внутрішнього згоряння.

Розрахунок робочого циклу двигуна потрібен для визначення його ефективної роботи та потужності, оцінка ефективності (ККД), визначається яка частка енергії палива перетвориться на корисну роботу, а яка – втрачається.

Визначення робочих процесів, моделювання тактів впуску, стиску, розширення (робочий хід) та випуску газів, для розуміння того як вони впливають на роботу.

В свою чергу динамічний розрахунок потрібен для того, щоб визначити міцність деталей, розрахунок сил інерції та тиску газів для оцінки навантажень на КШМ, щоб запобігти руйнуванню відповідних елементів.

Зниження шумів та вібрацій, аналіз коливань кривошипно-шатунного механізму з подальшим моделюванням графіку, для визначення оптимальних режимів для збільшення в першу чергу довговічності ДВС.

РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ЗАЛЕЖНОСТІ ЗАПАСУ МІЦНОСТІ ПОРШНЯ ВІД ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ СУДНОВОГО ДВИГУНА

Головною метою цього розділу стоїть питання чи витримає поршень та його елементи всі навантаження, які діють на нього при роботі суднового двигуна на різних обертах. Це важливий аспект тому що, при пошкодженні поршня та його елементів, двигун майже одразу може вийти з ладу, що призводить в першу чергу до матеріальних збитків.

Існують такі основні критичні параметри та навантаження, які треба розрахувати та обрати:

Термічне навантаження – при зміні частоти обертів двигуна відповідно і змінюється тепловий режим, за логікою: вищі оберти = вищі температури, що призводить до швидкого руйнування механізмів та систем КШМ в загальності.

Механічне навантаження – це навантаження від сил інерції які діють та зростають пропорційно квадрату швидкості обертання.

Вибір матеріалу поршня – важливий аспект, при правильному виборі, він дає можливість забезпечити необхідний запас міцності на всьому обраному діапазоні частоти обертання двигуна.

3.1 Вихідні дані, розрахунок елементів поршня на міцність

Основні конструктивні параметри приведені у таблиці 3.1

Таблиця 3.1

Параметр	Позначення, розрядність	Дані
Товщина днища поршня	δ , м	0.02
Висота поршня	H , м	0.382
Відстань від днища поршня до осі під поршньовий палець	h_1 , м	0.215
Висота юбки поршня	I_y , м	0.251
Відстань до першої кільцевої канавки	I_1 , м	0.045
Діаметр головки поршня	d_g , м	0.2251
Діаметр юбки поршня	d_y , м	0.2498
Відстань між торцями бобишок	b , м	0.12
Товщина стінки голівки поршня	S , м	0.072
Висота перемичок	h_n , м	0.007
Діаметр поршньового пальця	d_p , м	0.103
Довжина пальця	I_p , м	0.202

$$P_y = \frac{N \times (\pi \times \frac{(D \times 1000)^2}{4})}{I_y \times D \times 1000000}$$

$$P_y = \frac{0.39 \times (\pi \times \frac{(0.32 \times 1000)^2}{4})}{0.251 \times 0.32 \times 1000000} = 0.39 \text{ МПа}$$

Допустимий питомий тиск на юбку поршня, для сталі (0,6 МПа)
Тиск на опорну поверхню в бобишці

$$P_b = \frac{P_z \times (\pi \times \frac{D^2}{4})}{d_p \times (I_p - b)}$$

$$P_b = 38 \text{ МПа}$$

Допустимий питомий тиск для сталі (40 МПа), тому для виконання вимог міцності треба застосувати бронзові втулки.

Напруга від згинання

$$\sigma_u = P_z \times \frac{3}{16} \times (\frac{(d_g - S \times 2)}{\sigma \times 2})^2$$

Допустимі напруги згинання для сталюого днища без ребер (45МПа)

Температурні напруги в днищі

- Теплове навантаження

$$q = (71000 + 310 \times n) \times P_i$$

для сталі $a = 0.02$

P_i – середній індикаторний тиск

$$P_i = 0.3441$$

$$\sigma_t = q \times \delta \times a$$

Сумарні навантаження в днищі

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_u + \sigma_t$$

Допустиме значення сумарних навантажень для алюмінієвих поршнів 400 МПа

					КРМ.142.6221м.25.20.03.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		32

Наступним кроком має бути розрахунок поршньового пальця на міцність. На рис. 3.2 показана розрахункова схема пальця поршня за допомогою якого можна зробити розрахунок враховуючи вся допустимі значення.

3.2 Розрахунок поршньового пальця на міцність

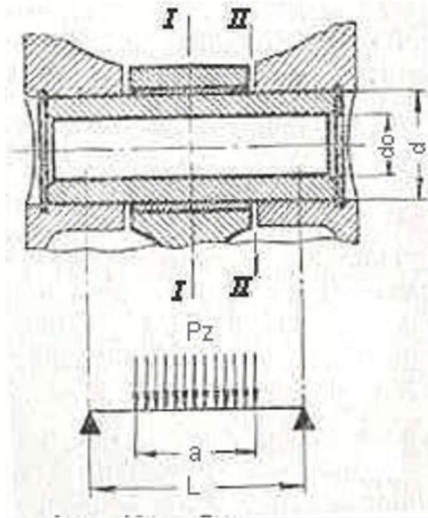


Рис. 3.2 Розрахункова схема пальця поршня

Згинаючий момент відносно небезпечного перетину I-I

-Відстань між серединами опор пальця

$$L = b + \frac{(I_p - b)}{2}$$

-Довжина підшипника верхньої голівки шатуна

$$a = 0.103 \text{ м}$$

$$M_u = \frac{P_z \times \left(\frac{\pi \times (D \times 1000)^2}{4} \right)}{2} \times \left(\frac{L}{2} - \frac{a}{4} \right)$$

Напруга згинання

-Момент опору перетину пальця I-I

Де:

$d = 138$ – зовнішній діаметр пальця, мм

$d_0 = 40$ – внутрішній діаметр пальця, мм

$$W = 0.1 \times \frac{d^3 - d_0^3}{d}$$

$$\sigma_u = \frac{M_u}{W}$$

Допустимі напруги згинання для пальців з вуглицевої сталі 120 МПа
Напруга зрізу

-Площа перетину пальця

$$F = \frac{\pi \times (d^2 - d_0^2)}{4}$$

$$\sigma_{зр} = \frac{P_z \times \left(\frac{\pi \times (D \times 1000)^2}{4} \right)}{2 \times F}$$

Допустимі напруги зрізу 50 - 60 МПа

Деформація перетину пальця

-Лінійне збільшення діаметру поршня

Де:

$E = 2 \times 10^5$ – Модуль пружності для вуглецевої сталі, МПа

$$\Delta d = \frac{0.09 \times P_z}{E \times I_p} \times \left(\frac{1 + \frac{d_0}{d}}{1 - \frac{d_0}{d}} \right)^3 \times (1.5 - 15 \times \left(\frac{d_0}{d} - 0.4 \right)^3)$$

-Відносна деформація пальця

$$\delta = \frac{\Delta d \times 1000}{d}$$

Відносна деформація, для забезпечення надійної роботи вузла "шатун-поршень", не повинна перевищувати (0,02 мм/мм)

На підставі проведених розрахунків поршня та поршневого пальця на міцність (таблиця 3.6) можна зробити висновок, що при частоті обертання 720 хв^{-1} напруга від згинання становить 14,994 МПа, що є нижчим за допустиме значення напруг згинання без ребер жорсткості (45 МПа). Загальні навантаження в днищі поршня складають 332,819 МПа, що також не перевищує допустиме значення сумарних напружень, яке становить 400 МПа.

Такі самі висновки можна зробити за результатами розрахунку поршневого пальця на міцність. Площа поперечного перерізу пальця дорівнює 53,638 мм², при цьому розрахункові напруги зрізу в межах допустимих значень (50–

60 МПа). Відносна деформація поршневого пальця становить 0,00283 мм/мм, що не перевищує гранично допустиме значення відносної деформації (0,02 мм/мм), необхідне для забезпечення надійної роботи вузла «шатун–поршень».

Тому за заданої частоти обертання всі основні розрахункові параметри поршня та поршневого пальця знаходяться та не перевищують допустимих значень, це свідчить про надійне функціонування вузла з достатнім запасом міцності.

3.3 Серія розрахунків робочого циклу, динаміки двигуна та побудова графіків залежності

У цьому розділі проводиться серія розрахунків для моделювання роботи двигуна.

Основна мета — визначити ключові параметри робочого циклу (як-от тиск, температура, об'єм) та динамічні характеристики руху основних деталей. Ці дані необхідні для подальшого аналізу та візуалізації процесів у двигуні за допомогою графіків.

Всі обчислення ґрунтуються на початкових характеристиках двигуна: його геометричних розмірах, умовах згоряння палива та заданому режимі роботи.

Щоб забезпечити точність результатів та наочно представити залежності, всі вихідні дані, використані для розрахунків, зібрані в таблиці нижче.

Вхідні дані для серії розрахунків Таблиця 3.4

Таблиця 3.4

Параметр	Познач.	Розм.	Значення				
			n = 550 хв ⁻¹	n = 650 хв ⁻¹	n = 750 хв ⁻¹	n = 850 хв ⁻¹	n = 950 хв ⁻¹
Ефективна потужність	N_e	кВт	4500	4500	4500	4500	4500
Частота обертання	n	хв ⁻¹	550	650	750	850	950
Тиск навколишнього середовища	P_0	МПа	0.103	0.103	0.103	0.103	0.103
Температура навколишнього середовища	T_0	К	298	298	298	298	298
Ступінь підвищення тиску в компресорі	Пк		3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
Коефіцієнт продувки	Φ_a		1.35	1.20	1.03	1.10	1.25
Коефіцієнт залишкових газів	Y_r		0.04	0.03	0.02	0.025	0.035
Коефіцієнт використання теплоти в точці Z	ξ_z		0.76	0.86	0.92	0.88	0.80
Коефіцієнт використання теплоти в точці b	ξ_b		0.86	0.92	0.98	0.94	0.90
Ступінь стиснення	ϵ		15.2	15.2	15.2	15.2	15.2
Ступінь підвищення тиску при згорянні	λ		1.2	1.24	1.30	1.36	1.44
Підігрів заряду від стінок циліндра	ΔT_a	К	11	11	11	11	11
Доля ходу поршня втраченого на продувку	Φ_n		0	0	0	0	0
Коефіцієнт скруглення індикаторної діаграми	ζ		0.90	0.94	0.96	0.94	0.92
Механічний ККД двигуна	η_m		0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Адіабатний ККД компресора	$\eta_{k,ad}$		0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
Зниження тиску в повітроохолоджувачі	$\Delta P_{ох.}$	МПа	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004

ККД системи охолодження наддув-ного повітря	η_o		0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Температура залишкових газів	T_r	К	900	720	600	760	880
Масовий склад палива	C	кг/кг	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
	H		0.126	0.126	0.126	0.126	0.126
	S		0	0	0	0	0
	O		0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
Нижча теплота згоряння палива	Q_H	кДж/кг	42664.4	42664.4	42664.4	42664.4	42664.4
Кількість циліндрів	i		9	9	9	9	9
Діаметр циліндру	D_c	м	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
Хід поршня	S_c	м	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Коефіцієнт тактності	z		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Коефіцієнт надлишку повітря для згоряння	α		2.0		2.30	1.90	1.95
Показник адіабати для повітря	k_v		1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
Механічний ККД турбіни	$\eta_{t.m}$		0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
Адіабатний ККД турбіни	$\eta_{t.ad}$		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75

На основі початкових даних ми виконали розрахунки робочого циклу двигуна для п'яти різних швидкостей його роботи: 550, 650, 750, 850 та 950 обертів за хвилину.

Метою було з'ясувати, як саме зміна частоти обертання колінчастого вала впливає на ключові параметри роботи двигуна.

Отримані результати для кожного режиму роботи зведено в таблиці (Таблиця 3.5). Ці дані лягли в основу побудови індикаторних діаграм. Візуалізація дозволить нам провести порівняльний аналіз і наочно оцінити вплив швидкості обертання двигуна на хід його робочого циклу.

Таблиця 3.5

Найменування величини	Численні величини				
	$n = 550 \text{ хв}^{-1}$	$n = 650 \text{ хв}^{-1}$	$n = 750 \text{ хв}^{-1}$	$n = 850 \text{ хв}^{-1}$	$n = 950 \text{ хв}^{-1}$
Результати розрахунку процесу наповнення					
P_k	0.381	0.381	0.381	0.381	0.381
T_k	475.939	475.939	475.939	475.939	475.939
T_s	315.794	315.794	315.794	315.794	315.794
T_a	348.84	338.246	332.151	337.36	345.501
P_s	0.377	0.377	0.377	0.377	0.377
P_a	0.366	0.366	0.366	0.366	0.366
η_H	0.904	0.941	0.968	0.948	0.917
Результати розрахунку процесу стиснення					
n_1	1.361	1.363	1.364	1.363	1.362
P_c	14.855	14.92	14.964	14.928	14.876
T_c	932.027	907.662	893.92	905.777	924.419
Результати розрахунку процесу згорання					
L	0.989	0.965	1.138	0.94	0.965
β_0	1.032	1.0328	1.0278	1.0337	1.0328
β	1.0307	1.0318	1.0273	1.0328	1.0317
x_z	0.884	0.935	0.939	0.936	0.889
β_z	1.027	1.03	1.026	1.031	1.028
T_z	1774.62	1885.832	1825.388	1952.004	1876.649
P_z	17.826	18.501	19.453	20.302	21.422
Результати розрахунку процесу розширення					
ρ	1.63	1.655	1.611	1.677	1.449
δ	9.326	8.81	9.435	9.306	10.487
n_2	1.249	1.262	1.271	1.258	1.248
T_b	1018.227	1068.41	993.17	1096.064	1048.511
P_b	1.097	1.19	1.122	1.225	1.141

Результати визначення індикаторних показників					
P_i'	2.483	2.859	2.727	3.045	2.76
P_i	2.235	2.688	2.618	2.863	2.539
b_i	0.211	0.188	0.168	0.182	0.193
η_i	0.399	0.45	0.503	0.463	0.436
Результати визначення ефективних показників					
P_e	2.123	2.553	2.487	2.72	2.412
η_e	0.38	0.427	0.477	0.44	0.414
b_e	0.2223	0.1975	0.1767	0.1917	0.2037
N_e	2819.498	4007.317	4503.785	5581.632	5532.47
ΔN	-59.603	-12.295	0.084	19.378	18.662
Результати визначення дійсного P_k компресора					
G	6.737	7.369	7.505	8.9	10.931
G_t	6.911	7.589	7.727	9.198	11.244
P_r	0.362	0.362	0.362	0.362	0.362
T_t	816.49	835.114	780.285	853.159	834.793
M_s	1.022	0.997	1.17	0.972	0.997
R_t	287.331	287.31	287.439	287.288	287.31
k_t	1.371	1.37	1.376	1.369	1.37
P_{kd}	3.894	4.015	3.714	4.133	4.008
ΔP_k	4.987	7.837	0.366	10.486	7.674

Отримані результати розрахунків дозволяють побудувати індикаторні діаграми (Рис. 3.4), які наочно ілюструють роботу двигуна в різних режимах.

Створено окремі діаграми для кожної з п'яти швидкостей обертання (550, 650, 750, 850 та 950 об/хв). Ці графіки візуально демонструють, як змінюється тиск у циліндрі залежно від його об'єму (або положення поршня).

Такий підхід дає можливість легко проаналізувати та візуально оцінити вплив частоти обертання двигуна на перебіг усього робочого циклу.

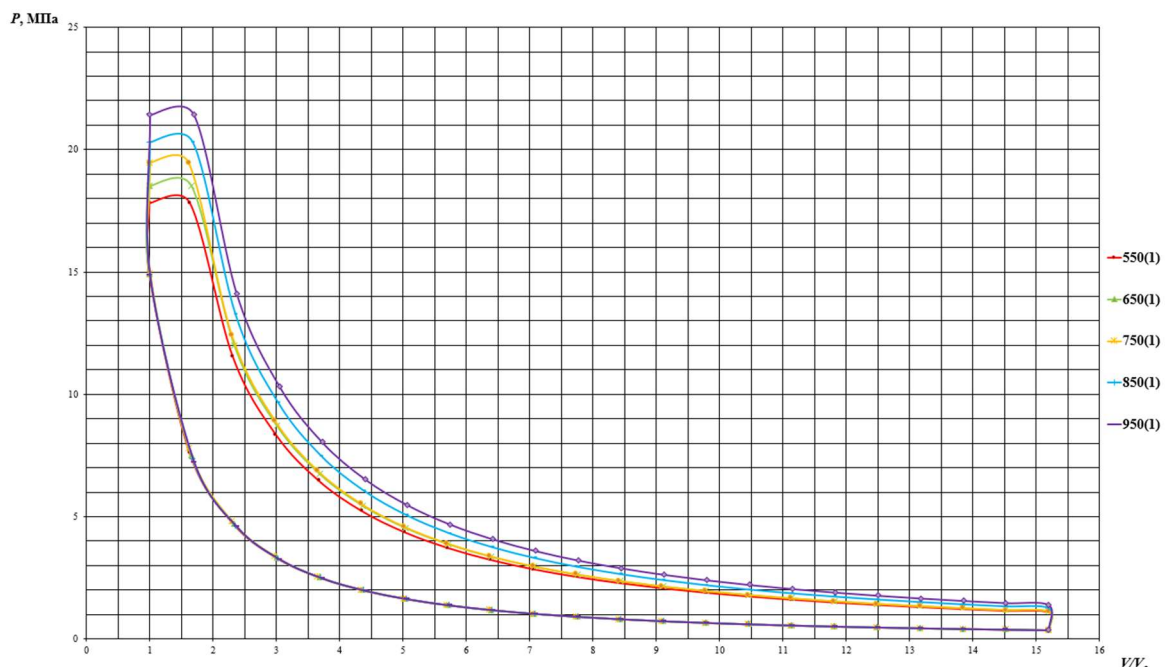


Рис. 3.4 Теоретична індикаторна діаграма двигуна типу Wärtsilä 9L32/40

На основі створених раніше індикаторних діаграм, а також результатів динамічних розрахунків, ми додатково побудували два графіки динаміки роботи двигуна (Рис. 3.5 та Рис. 3.6).

Ці графіки ілюструють, як змінюються ключові динамічні показники двигуна залежно від швидкості обертання колінчастого вала. Вони дають змогу детально проаналізувати роботу двигуна на різних режимах навантаження та швидкості.

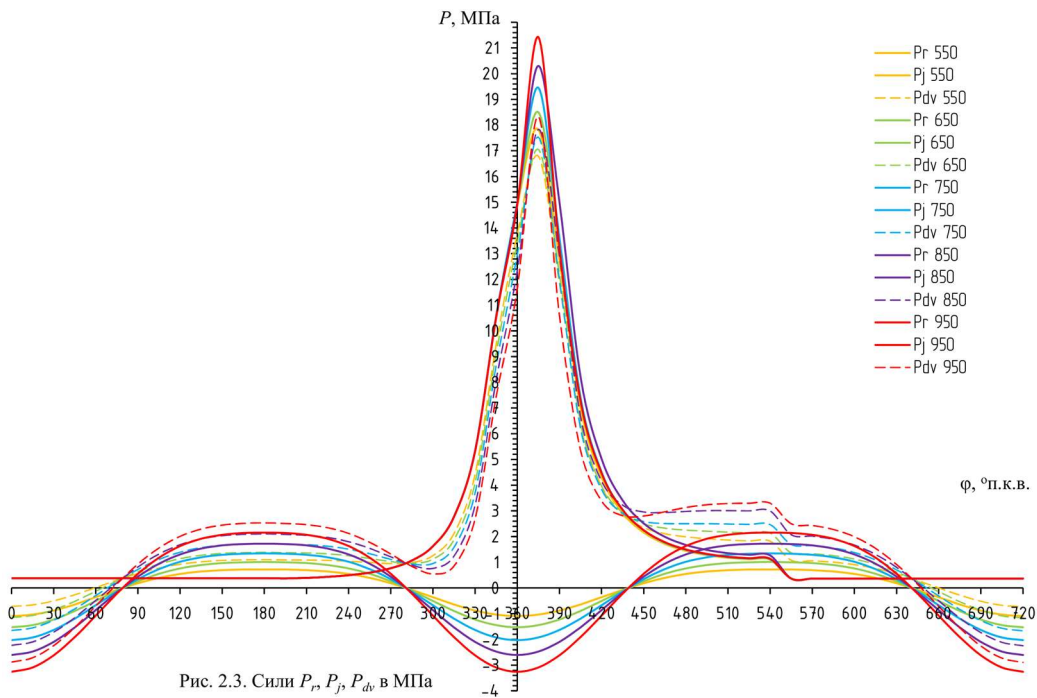


Рис. 2.3. Сили P_r , P_j , P_{dv} в МПа

Рис. 3.5 Сили P_r , P_j , P_{dv} в МПа

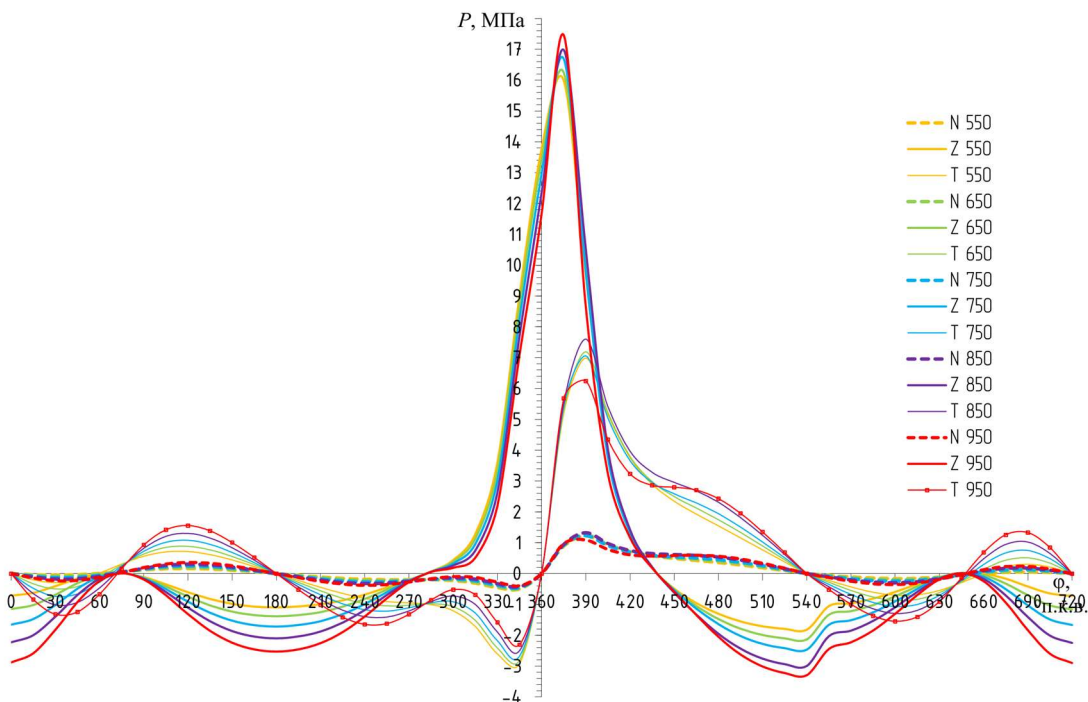


Рис. 3.6 Сили N , Z , T в МПа

3.4 Серія розрахунків поршня та пальця поршня двигуна на міцність при збільшенні частоти обертання

Далі наведено Таблицю 3.6, яка містить результати розрахунків міцності поршня та поршневого пальця. Ці розрахунки виконані для тих самих п'яти режимів роботи двигуна (від 550 до 950 об/хв), що використовувалися раніше для побудови індикаторних діаграм.

На основі цих даних були побудовані два ключові графіки:

1. Графік залежності міцності поршня (через сумарні навантаження) від частоти обертання (Рис. 3.7).
2. Графік залежності теплового навантаження поршня від частоти обертання (Рис. 3.8).

Побудовані графіки дають змогу візуально простежити, як збільшення швидкості обертання двигуна одночасно зменшує запас міцності поршня та підвищує його теплові навантаження. Це також дозволяє оцінити, чи відповідають отримані значення допустимим експлуатаційним параметрам.

Таблиця 3.6

Величина	Позн.	Розм.	550	650	750	850	950
Розрахунок поршня на міцність							
Напруга стиску	σ_c	МПа	51.621	53.576	56.332	58.791	62.034
Напруга від згинання	σ_u	МПа	13.74	14.26	14.994	15.648	16.511
Температурні напруги в днищі поршня							
Теплове навантаження	σ_t	МПа	215.901	292.992	317.825	365.069	382.173
Сумарні навантаження в днищі	σ_Σ	МПа	229.641	307.252	332.819	380.718	398.713
Розрахунок поршневого пальця на міцність							
Довжина підшипника верхньої голівки шатуна	M_u	Нм	39491.895	40987.297	43096.367	44977.25	47458.509
Момент опору перетину пальця	σ_u	МПа	19.8144	20.5647	21.6229	22.5666	23.8115
Напруга зрізу	$\sigma_{зр}$	МПа	49.152	51.013	53.638	55.979	59.067
Лінійне збільшення діаметру поршня	Δd	м	0.00037	0.00038	0.0004	0.00042	0.00045
Відносна деформація пальця	δ	мм\мм	0.00259	0.00269	0.00283	0.00295	0.00311

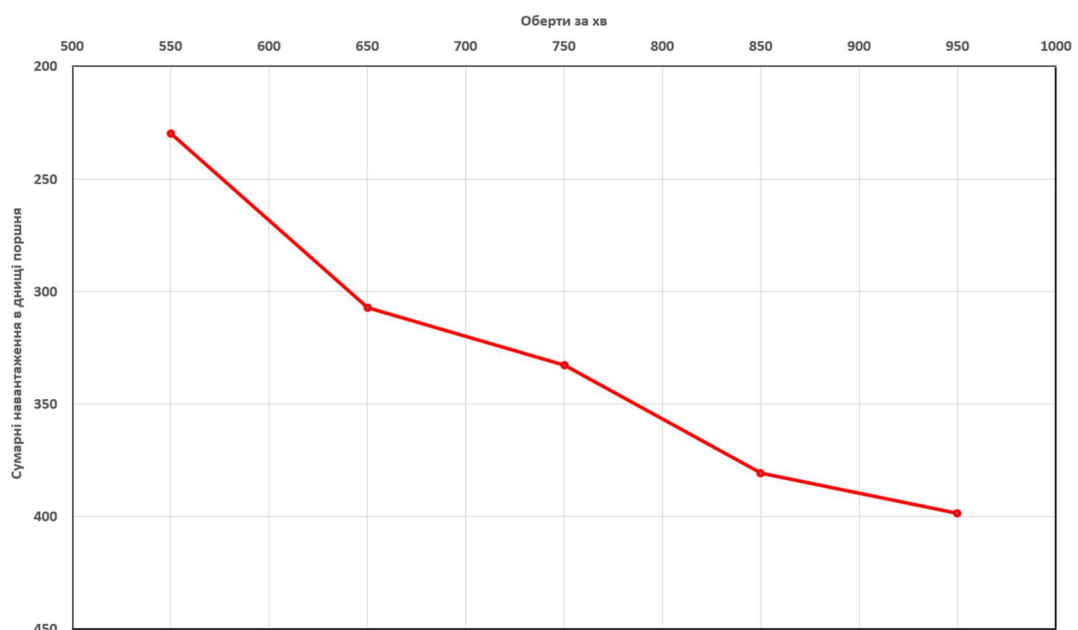


Рис. 3.7 Графік залежності сумарних навантажень в днищі поршня при різних обертах

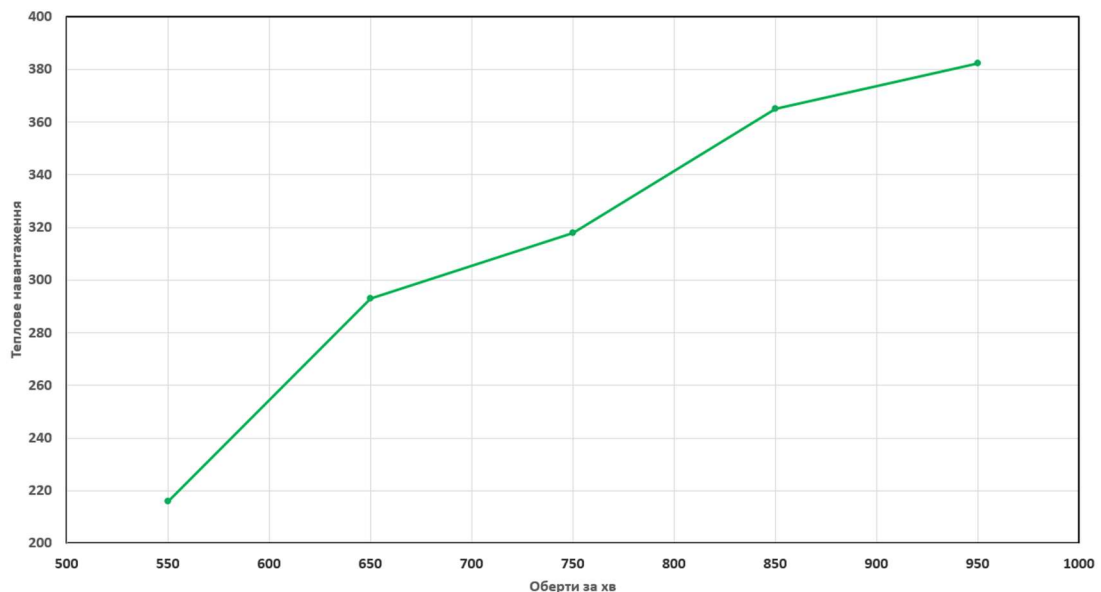


Рис. 3.8 Графік залежності теплових навантажень поршня при різних обертах

У цьому розділі була комплексно оцінена залежність запасу міцності поршня суднового двигуна від швидкості обертання колінчастого вала.

3.5 Висновки до розділу

Розрахунки міцності: На основі вихідних даних були розраховані напруження стиску, згинання та загальні навантаження в днищі поршня. Також був виконаний розрахунок міцності поршневого пальця з урахуванням напружень зрізу та деформацій.

Моделювання роботи двигуна: Проведено серію розрахунків робочого циклу та динамічних параметрів для різних режимів роботи. Це дозволило побудувати індикаторні діаграми та графіки динаміки двигуна, щоб проаналізувати зміну основних параметрів процесу залежно від швидкості обертання.

Побудова графіків залежностей: Створено графіки залежності сумарних механічних та теплових навантажень від частоти обертання двигуна.

Основні висновки:

Аналіз отриманих залежностей підтвердив, що зі зростанням частоти обертання двигуна механічні та теплові навантаження збільшуються, що, відповідно, зменшує запас міцності поршня.

Однак, результати показали, що для всіх розглянутих режимів роботи розрахункові напруження та деформації поршня і пальця залишаються в межах допустимих значень. Це гарантує достатню міцність і надійну роботу всього вузла «поршень–палець–шатун».

З усього дослідженого діапазону частот обертання режим 750 об/хв визначено як найбільш оптимальний. Він забезпечує найкращий баланс між динамічними/тепловими навантаженнями та необхідним запасом міцності поршня.

РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Визначення витрат на матеріали

Для ефективної організації роботи потрібно визначити, скільки часу та зусиль вона потребує, скласти чіткий графік виконання (календарний план) та оцінити загальну вартість. Мета — раціонально використати всі ресурси: людей, матеріали та гроші.

Для обрахунку фінансових витрат на науково-дослідні та конструкторські роботи складається детальний кошторис (перелік витрат). Він включає такі основні пункти:

- Матеріали: Вартість сировини та матеріалів (мінус гроші, отримані за відходи).
- Комплектуючі: Закупівля готових деталей та вузлів.
- Енергія: Оплата палива та електроенергії від постачальників.
- Обладнання: Витрати на спеціалізовану техніку та інструменти.
- Амортизація: Врахування зносу універсального обладнання.
- Зарплата: Оплата праці основного та допоміжного персоналу.
- Соціальні внески: Обов'язкові відрахування на соціальне страхування.
- Відрядження: Витрати, пов'язані з поїздками працівників.
- Послуги сторонніх фірм: Оплата робіт, виконаних підрядниками.
- Накладні витрати: Загальні адміністративні та господарські витрати.

Також окремо деталізуються витрати саме на ті основні матеріали, які потрібні для виконання конкретних запланованих робіт.

№	Матеріал	Од. виміру	Витрати матеріалу	Ціна за од.	Сума, грн.
1	Папір А4	кіпа	1	230	230
2	Канц. Товари	Грн.	1	400	400
Всього					630
Логістичні витрати		%	10	10	70
Разом					700

4.2 Розрахунок вартості палива та енергії

Визначаємо вартість палива, енергії та інш., виходячи з того, що робота проводилась протягом 3 місяців. Використовуємо тарифи для багатьох людей, тому що робота виконувалася дистанційно.

Устаткування	Вид енергоресурсів	Норма втрати, кВт*год\міс.	Фонд часу. Міс.	Ціна чи вартість, грн.	Вартість, грн.
Ноутбук	Ел. енергія	40	3	0,75	90,00
Освітлення	Ел. енергія	5	3	0,75	11,25
Всього					101,25

4.3 Розрахунок амортизації універсального устаткування

Ми розраховуємо, яка частина вартості нашого універсального обладнання (ноутбуки, інструменти, пристрої, які вважаються основними засобами компанії) має бути включена у вартість саме цієї роботи.

Принцип розрахунку зносу (амортизації):

Ми визначаємо загальний річний час, який обладнання може працювати. Виходячи з того, що стандартний робочий день триває 8 годин, ми вираховуємо, скільки часу фактично використовували техніку для цього конкретного завдання — а це було 8 годин щодня протягом трьох місяців.

Прилад	Вартість, грн.	Норма амортизації, грн.	Зайнятість устаткування, год	Річний ефективний фонд часу, год	Сума, грн
Ноутбук	15000	50	720	2920	1479,45
Всього					1479,45

4.4 Розрахунок заробітної плати

Далі визначаємо суму заробітної плати для таких посадових осіб як керівник, практикант, економіст, інженер з охорони праці та сумуємо загально. Розрахунок заробітної плати

Посада	Кількість працівників	Оклад за місяць, грн	Середньоденна зарплата, грн	Зайнятість НДР, днів	Сума заробітної плати, грн
Керівник	1	10000	500	20	10000
Практикант	1	2000	100	65	6500
Економіст	1	8000	400	5	2000
Інженер з охорони праці	1	8000	400	5	2000
	4	-	1400	165	20500

Після підсумкового розрахунку основної заробітної плати можна додати премію в розмірі 10 %:

$$ЗП = 20500,00 \cdot 0,1 = 2050,00 \text{ грн.}$$

Тому загальна сума становить

$$20500 + 2050,00 = 22550,00 \text{ грн.}$$

4.5 Внески на соціальні заходи

Також треба врахувати внески на соціальні заходи.

Внески розраховують у процентному відношенні від суми основної і додаткової зарплати з урахуванням премій:

$$B_{\text{сз}} = \frac{(3П_0 + 3П_д) * Y_{\text{сз}}}{100\%}$$

Де $Y_{\text{сз}}$ – питома вага внесків на соціальні заходи, за діючим законодавством 22%.

$$B_{\text{сз}} = \frac{(20500 + 2050) * 22\%}{100\%} = 4961 \text{ грн.}$$

4.6 Накладні витрати

Накладні витрати треба рахувати у відсотках від основної заробітної плати виконавців (50 %)

$$B_{\text{н}} = 3П_0 \cdot 0,5,$$
$$B_{\text{н}} = 20500 \cdot 0,5 = 10250 \text{ грн.}$$

Витрата	Сума, грн	Питома вага до підсумку, %
Матеріали за винятком зворотних відходів	700	1,75
Паливно-мастильні матеріали та енергія	101,25	0,25
Амортизація універсального устаткування	1479,45	3,69
Заробітна плата основна і додаткова	22550	56,32
Відрахування на соціальні заходи	4961	12,39
Накладні витрати	10250	25,60
Разом	40041,70	100

4.7 Розрахунок економічної ефективності роботи

Через те, що проведене дослідження має суто теоретичний характер, його економічну ефективність (техніко-економічну оцінку) ми визначаємо за спеціальними критеріями, а не за фінансовим прибутком.

Основні критерії:

- це дуже важливий аспект для економіки країни, та наскільки цінним є це дослідження для господарства;
 - складність виконання роботи;
 - на скільки ефективно впливає на досвід це;
- Значущість оцінюється за цілями:
- Чи допомагає воно вирішити наявні проблеми?
 - Чи відповідає технологічним вимогам?

-Чи пропонує принципово нові підходи в технологіях або конструктивних особливостях?

Складність визначається шляхом порівняння виконаної роботи з іншими схожими дослідженнями, враховуючи витрачений час, працю людей та фінансові ресурси.

Ефективність показує, наскільки повно ми досягли поставленої мети: задання може бути виконане повністю, частково або не виконане зовсім.

Аналізуючи взаємозв'язок між цими показниками та витратами на їх досягнення, ми можемо отримати кількісну оцінку техніко-економічної ефективності теоретичної роботи за допомогою спеціальної формули.

$$K_{\text{ндр}} = \frac{J^n * R * T}{B_{\text{ндр}} * t_{\text{ндр}}}$$

$$K_{\text{ндр}} = \frac{3^2 * 3 * 3}{32,44875 * 0,25} = 6,66$$

Де $K_{\text{ндр}}$ - рівень ефективності дослідження (коефіцієнт техніко-економічної ефективності робіт);

J^n – важливість роботи;

R – результативність роботи;

T – технічна складність виконання НДР;

$B_{\text{ндр}}$ - витрати на проведення НДР, тис грн;

n – показник використання результатів НДР:

$n = 0$ – результати НДР не використовуються;

$n = 1$ – результати НДР використовуються частково;

$n = 2$ – результати НДР використовуються в дослідно-конструкторських роботах (ДКР);

$n = 3$ – результати НДР можуть бути використані без проведення ДКР.

При значенні $K_{\text{ндр}} \geq 1$ робота вважається ефективною.

Наприклад, для НДР, у яких $B_{\text{ндр}} < 130$ тис. грн. і $t_{\text{ндр}} \leq 2$ років, можна застосовувати значення $J = 2...5$; $R = 2...5$; $T = 1...3$.

Фактори	J	R	T	C	t_{ϕ}	n
Припустимі значення	2 – 5	2 – 5	1 – 3	-	-	1 - 3
Прийняті значення	3	3	2	-	-	2

Розрахований показник техніко-економічної ефективності $K_{\text{ндр}}$ виявився більшим за одиницю. Це означає, що робота має економічний сенс та її проведення доцільне.

4.8 Висновки до розділу

Складено детальний кошторис витрат на виконання цієї роботи, і загальна сума склала 40041,70 грн.

Оскільки дослідження має теоретичний характер і не приносить прямого фінансового прибутку, оцінено його економічну ефективність за спеціальною комплексною методикою. Ця методика враховує три ключові показники:

1. Важливість дослідження для нашої галузі та економіки України.
2. Складність виконаної роботи.
3. Практична цінність та результативність отриманих даних.

За результатами проведених розрахунків, показник техніко-економічної ефективності ($K_{\text{ндр}}$) дорівнює 6,66. Це значення значно перевищує нормативну позначку 1, що підтверджує високу економічну ефективність нашої роботи.

Такий результат свідчить про те, що всі витрати на проведення дослідження повністю виправдані цінними результатами. Розроблені нами методи та підходи можна сміливо рекомендувати для використання в подальших наукових або практичних проєктах.

Таким чином теоретичне дослідження не тільки допомогло досягти поставлених наукових цілей, але й було виконане з раціональним використанням ресурсів, що значно підвищує його загальну цінність та значущість для галузі.

РОЗДІЛ 5. ОРГАНІЗАЦІЯ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

5.1 Конвенція СОЛАС 74

Конвенція СОЛАС (Міжнародна конвенція з охорони людського життя на морі, англ. International Convention for the Safety of Life at Sea, SOLAS) є одним з найважливіших міжнародних документів у сфері морської безпеки. Вперше прийнята у 1914 році після трагедії з «Титаніком», вона була спрямована на встановлення мінімальних стандартів для будівництва, обладнання та експлуатації суден, щоб забезпечити безпеку мореплавців та пасажирів.

Основні положення та вимоги Конвенції СОЛАС

1. *Конструкція та обладнання суден:* Конвенція встановлює вимоги до конструкції корпусу, силової установки та допоміжних механізмів, а також обов'язковість наявності засобів для боротьби з пожежами, рятувальних засобів та навігаційного обладнання.

2. *Безпека навігації:* Конвенція вимагає наявності сучасних навігаційних приладів і систем зв'язку на судах, а також дотримання правил, що сприяють безпечному плаванню, таких як Міжнародні правила запобігання зіткненням на морі (COLREG).

3. *Рятувальні засоби та пожежна безпека:* SOLAS передбачає обов'язкове оснащення суден рятувальними плотами, рятувальними жилетами, аварійними радіомаяками (EPIRB) та іншими засобами порятунку, а також вимагає наявності систем виявлення та гасіння пожеж.

4. *Безпека вантажів:* Конвенція регулює питання завантаження, перевезення та розміщення вантажів, включаючи небезпечні вантажі, щоб запобігти аваріям і забезпечити стабільність судна.

5. *Морська охорона:* Розділ XI-2 Конвенції СОЛАС вводить Міжнародний кодекс з охорони суден і портових засобів (ISPS Code), який встановлює заходи безпеки для захисту від терористичних загроз і актів незаконного втручання.

					KPM.142.6221м.25.20.05.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		46

6. *Управління безпекою та експлуатація суден*: Конвенція містить вимоги щодо управління безпекою на судах і в судноплавних компаніях, що включають впровадження Системи управління безпекою (SMS) відповідно до Міжнародного кодексу з управління безпекою (ISM Code).

Роль і значення Конвенції СОЛАС

Конвенція СОЛАС є фундаментальним документом для забезпечення безпеки на морі. Вона постійно оновлюється і доповнюється, враховуючи нові технологічні досягнення та виникаючі загрози. Впровадження положень СОЛАС є обов'язковим для всіх країн-членів Міжнародної морської організації (ІМО), що сприяє уніфікації стандартів безпеки на глобальному рівні.

Забезпечення дотримання вимог Конвенції СОЛАС є ключовим завданням для судновласників, капітанів суден і морських адміністрацій. Це дозволяє знизити ризики аварій, зберегти людські життя та захистити навколишнє середовище, що робить морські перевезення більш безпечними та надійними.

5.2 Конвенція МАРПОЛ 73/78

Конвенція МАРПОЛ 73/78 (Міжнародна конвенція з запобігання забрудненню з суден) є одним з найважливіших міжнародних документів, спрямованих на охорону морського середовища. Прийнята в 1973 році та доповнена протоколом у 1978 році, конвенція встановлює комплексні заходи щодо запобігання забрудненню морів і океанів шкідливими речовинами, що скидаються з суден.

Основні положення та вимоги Конвенції МАРПОЛ 73/78

Конвенція МАРПОЛ складається з загального тексту та шести додатків, кожен з яких стосується конкретного типу забруднення:

Додаток I: Запобігання забрудненню нафтою

-Встановлює вимоги щодо конструкції суден для мінімізації ризику розливу нафти, включаючи розділення танків, подвійні борти і днища.

-Регулює скидання нафтовмісних вод з суден, забороняючи такі скиди у певних зонах та встановлюючи обмеження на концентрацію нафти у воді, що скидається.

					KPM.142.6221м.25.20.05.ПЗ	Лист
						47
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Додаток II: Контроль забруднення шкідливими рідкими речовинами, що перевозяться наливом

-Визначає категорії шкідливих речовин і встановлює вимоги щодо їх перевезення та скидання залишків після очищення танків.

Додаток III: Запобігання забрудненню шкідливими речовинами, що перевозяться у фасованому вигляді

-Регулює упаковку, маркування, перевезення і зберігання шкідливих речовин у контейнерах і пакунках.

Додаток IV: Запобігання забрудненню стічними водами із суден

-Встановлює вимоги щодо збору, обробки і скидання стічних вод з суден, включаючи наявність очисних споруд на борту.

Додаток V: Запобігання забрудненню сміттям із суден

-Забороняє скидання більшості видів сміття у море, включаючи пластик, і регулює скидання інших видів сміття в залежності від відстані до берегу.

Додаток VI: Запобігання забрудненню повітря із суден

-Встановлює обмеження на викиди шкідливих речовин в атмосферу, таких як оксиди сірки (SO_x) та оксиди азоту (NO_x), а також регулює використання озоноруйнуючих речовин.

Роль і значення Конвенції МАРПОЛ 73/78

Конвенція МАРПОЛ 73/78 є ключовим інструментом міжнародного права для захисту морського середовища від забруднення, спричиненого судноплавством. Вона постійно оновлюється, щоб враховувати нові технологічні досягнення та змінюватися відповідно до нових викликів і загроз.

Дотримання вимог МАРПОЛ є обов'язковим для всіх країн-членів Міжнародної морської організації (ІМО) та суден, що плавають під їх прапорами. Це сприяє глобальній уніфікації стандартів охорони довкілля та забезпечує високий рівень захисту морських екосистем від забруднення нафтою, хімічними речовинами, сміттям, стічними водами та викидами в атмосферу.

Завдяки Конвенції МАРПОЛ морське судноплавство стає більш екологічно відповідальним, а заходи, які впроваджуються на міжнародному рівні,

сприяють збереженню здоров'я океанів та морського середовища для майбутніх поколінь.

5.3. Техніка безпеки при несенні вахти та виконанні робіт у машинному відділенні

Для цілодобової безперервної роботи морського судна необхідна чітка організація служби технічної експлуатації. Ще недавно для цієї мети застосовувалася добре організована система вахтової служби. Але через введення автоматизації, а потім систем централізованого і дистанційного контролю та управління відбулися істотні зміни в традиційній організації вахтової служби. Організаційна структура машинної команди, несення умовної вахтової служби та методи організації роботи з використанням дистанційних постів управління розглядаються в цій статті.

Машинна команда. Старший механік підпорядковується персонально тільки капітану і несе повну відповідальність за задовільну роботу всіх механізмів і пристроїв судна, а також є головним радником і консультантом з усіх питань, пов'язаних із технічною експлуатацією судна. Зазвичай старший механік вахти не несе.

Другий механік відповідає за підтримання в належному технічному стані головного двигуна і всієї машинної установки, а також керує роботою інших механіків. На деяких суднах другий механік несе вахту.

Третій і четвертий механіки, як правило, є вахтовими механіками або входять до складу вахти з виконанням певних обов'язків. Кожен механік може нести персональну відповідальність за технічний стан певної групи механізмів і систем, наприклад котлів або генераторів.

П'ятий і шостий механіки або всі механіки, нижчі за четвертий, класифікуються як молодші механіки або стажери. Вони додатково входять до складу вахти і працюють у складі денної ремонтної бригади або можуть працювати разом із рефрижераторним механіком.

Електромеханік входить до складу команди тільки на великотоннажних суднах або за приписом компанії. У всіх інших випадках виконання обов'язків електромеханіка покладається на одного з механіків.

Машинні відділення залежно від призначення суден укомплектовують різним обладнанням, через що доводиться змінювати склад вахтової служби. Наприклад, кочегар обслуговує допоміжний котел під час стоянки судна в порту. У рейсах же кочегар працює в ремонтній бригаді. До складу машинної команди додатково може бути введений комірник, а на танкерах - помповий машиніст, який відповідає за технічне обслуговування і роботу вантажних насосів. Залежно від технічної оснащеності машинного відділення до складу вахти можуть, наприклад, входити пожежник, змащувач тощо, які надають допомогу під час усіх робіт, що проводяться на вахтах.

Організація вахтової служби. Система вахт, прийнята на суднах, включає 4-годинний період роботи з 8-годинним відпочинком. Таким чином 12-годинний період на судні розбито на три вахти:

- 0-4;
- 4-8;
- 8-12 ч.

Слово "вахта" визначає проміжок часу роботи при персональній відповідальності за виконувану роботу.

Кількісний склад вахти визначається старшим механіком. Багато в чому склад вахти залежить від:

- типу судна;
- типу головної енергетичної установки і ступеня автоматизації;
- кваліфікації та практичного досвіду обслуговуючого персоналу;
- а також від умов плавання судна, наприклад від сили вітру;
- обладнання РЛС;
- міжнародних і місцевих правил плавання тощо.

Вахтовий механік як керівник вахти з технічного погляду підпорядковується старшому механіку і відповідає за безпечну й ефективну роботу обладнання та всієї машинної техніки для забезпечення безпеки мореплавства.

Несення вахтової служби. Вахтовий механік, молодший механік і один-два рядових члени екіпажу утворюють склад вахти. Кожен член екіпажу, що несе вахту, повинен добре знати і виконувати свої обов'язки, знати правила техніки безпеки, прийоми і методи боротьби за живучість установки на машинних постах. Він повинен знати принцип роботи системи пошуку і виявлення пожеж, уміти розрізняти сигнали і за ними визначати вогнища пожежі, повинен уміти вживати заходів для запобігання і гасіння пожеж, сповіщати про виникнення вогнищ пожежі та знати всі шляхи евакуації людей з машинного відділення.

Із заступленням на вахту проводиться перевірка і запис у машинному журналі всіх основних параметрів роботи суднової електростанції і всієї машинної установки. Вахтовий механік може також записати зауваження, накази або розпорядження в графі "Особливі відмітки", що стосуються роботи головного двигуна і допоміжних механізмів. Вахтовий механік повинен не допускати роботи механізмів у режимі перевантаження або, якщо перевантаження необхідне, воно повинно бути обмежене за часом. У машинний журнал записують значення:

рівнів в основних танках зберігання палива;

рівня води в зливному танку;

у баластних танках тощо;

а також рівень води в суднових льялах.

У журнал також записується робота різних пристроїв, за допомогою яких забезпечується надійна робота обладнання. Через певні інтервали часу повинен здійснюватися обхід персоналом працюючого обладнання головної енергетичної установки, допоміжних механізмів і рульового пристрою. При цьому вносяться зміни в режими роботи механізмів і систем, реєструються та усуваються відмови в роботі й аварійні ситуації, все це фіксується у вахтовому

журналі і про це доповідається в установленому порядку. Під час обходу заміряється рівень води в льялах, проводиться огляд усіх суднових систем для визначення того, чи немає в них протікань, перевіряється справна робота контрольно-вимірювальних приладів.

На місток має надходити вся необхідна інформація про основні параметри роботи енергетичної установки і про всі дії зі збереження необхідної швидкості судна і напрямку руху. Якщо під час переходу на маневровий режим або для збільшення надійності в роботі вводиться ручне керування енергетичною установкою, то склад вахти може бути збільшено.

Впевнене і чітке виконання своїх обов'язків персоналом вахти становить основну умову забезпечення надійної роботи обладнання. Але, крім цього, персонал вахти повинен проводити роботи з профілактичних оглядів і ремонтів обладнання згідно з планами. Будь-які дії рядового складу повинні проводитися під керівництвом командного складу і не повинні торкатися роботи головної машини і обладнання, що працює.

До журналу записують значення рівнів і температур палива для танків важкого палива і для обох відстійних і витратного танків, температуру опорно-упорного підшипника, забортної води тощо. Для працюючих дизель-генераторів записують у машинному журналі значення:

- температур випускних газів;
- охолоджувальної води;
- тиску і температури мастила.

Особливо слід відзначити ведення обліку загального часу роботи механізмів, оскільки від цього залежить термін перебирання механізму. Інші допоміжні механізми та установки, такі як:

- теплообмінники;
- випарник;
- котел;
- установка кондиціонування повітря;
- рефрижераторна установка тощо;

мають параметри контролю, які також фіксуються в журналі. За минулу добу на 12 год поточного дня складається загальне зведення по витраті:

важкого палива;

дизельного палива;

мастила;

живильної води котлів.

Робота провізійних камер реєструється в розділі "Зауваження" і записується за підсумками за вахту.

Якщо журнал заповнений повністю, то його відсилають у пароплавну компанію для реєстрації та використання за призначенням.

Питання про середню швидкість судна і максимально можливу швидкість залежить від режимів роботи циліндрів головного двигуна, а навантаження циліндрів визначають за різними контрольованими параметрами, за показниками приладів, особливо в тих випадках, коли на гвинт працюють кілька двигунів. При цьому в журнал записуються параметри роботи редуктора.

Для турбоходів головними параметрами будуть параметри, що характеризують роботу котла і турбіни. Для котла реєструються такі параметри, як:

тиск пари;

тиск повітря, що подається для згоряння палива;

температура палива тощо.

Для турбіни фіксується:

температура опорно-упорного підшипника;

тиск і температура пари;

вакуум у конденсаторі тощо.

Усі записи мають відповідати дійсним значенням параметрів.

Якщо виникла необхідність вжити заходів, які можуть вплинути на швидкість судна, його маневреність, потужність енергетичної установки та інші параметри, що впливають на безпеку мореплавства, то про це необхідно доповісти насамперед на місток, і тільки після одержання дозволу з містка можна вживати відповідних заходів.

					KPM.142.6221м.25.20.05.ПЗ	Лист
						53
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Про всі вимушені зміни в режимах роботи і послідовності виконуваних дій повинен бути попереджений старший механік. Це може відбуватися в разі аварійного пошкодження механізму або за появи ознак, що передують серйозній аварії, тобто негайні самостійні дії механіків допускаються за наявності загрози безпеці судну і членам екіпажу. Після закінчення вахти здійснюються останні записи значень параметрів і запис про здавання - приймання вахти новою зміною за підписом вахтового механіка.

Особливості організації служби за наявності системи централізованого управління

Якщо судно побудоване на певний клас автоматизації, то черговий механік систематично повинен обходити діюче обладнання. Це повинен виконувати один із трьох вахтових механіків, який працює добу через дві. Під час чергування він здійснює обхід працюючого обладнання один раз за 4 год, починаючи з сьомої або восьмої години ранку.

Обходи обладнання є процесом умовного несення вахти і призначені для уважного огляду обладнання, що працює без постійного спостереження. При цьому виявляють відхилення від нормальної програми роботи або нестійку роботу механізмів і систем і вносять відповідні зміни в режими роботи. Записи за встановленою формою можуть бути зроблені за кілька відвідувань. На період між обходами система сигналізації та захисту перемикається на каюту чергового механіка або дистанційні пульти кімнат відпочинку. У разі спрацьовування системи сигналізації та захисту на містку можна отримати інформацію про місце спрацьовування, що допоможе прийняти необхідне рішення.

5.4. Загальні питання забезпечення охорони судна

Для організації роботи та здійснення заходів з охорони судна створюється судовий комітет безпеки у складі капітана і осіб командного складу, які мають обов'язки з охорони (старшого помічника, старшого механіка). Основними завданнями судового комітету безпеки серед інших є:

1. організація виконання судовим персоналом ефективних заходів з безпеки та охорони судна;

					KPM.142.6221м.25.20.05.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		54

2.вироблення у екіпажу навичок загальної пильності, уміння вивчати навколишнє оточення, оцінювати його і вживати необхідних заходів безпеки;

3.відпрацювання методів протидії загрозам захоплення судна терористами, вибуху судна, захоплення заручників. Безпосередньо організаційна структура охорони судна наведена на рис 5.1.

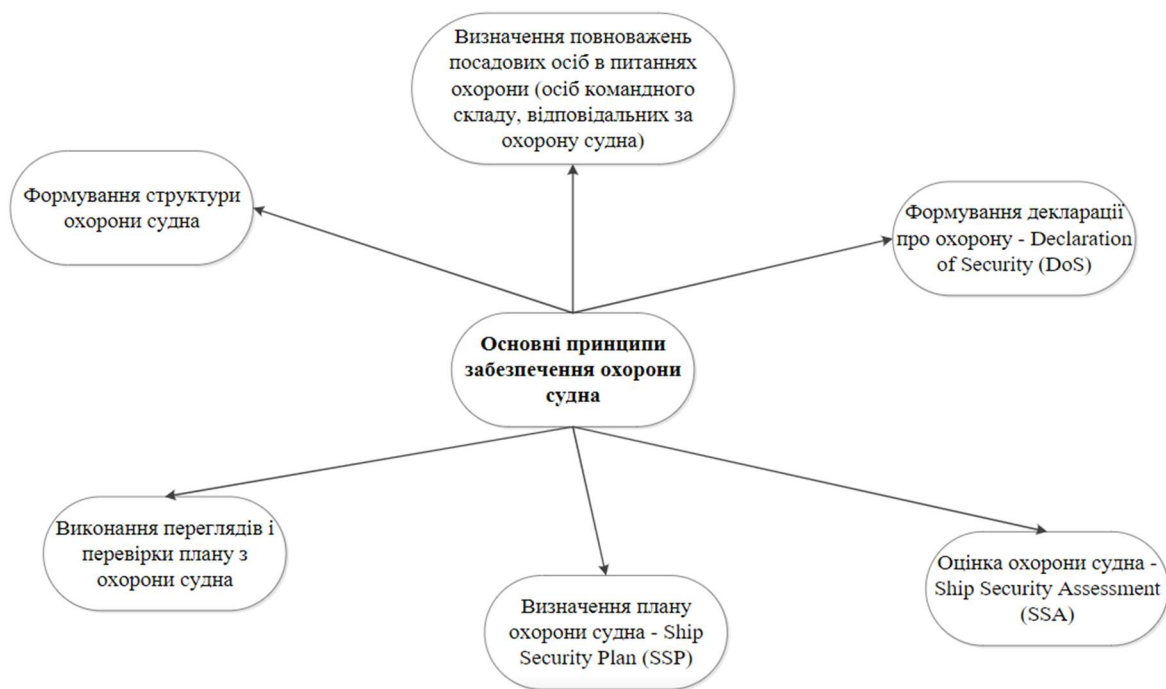


Рис 5.1 –Основні принципи забезпечення охорони судна

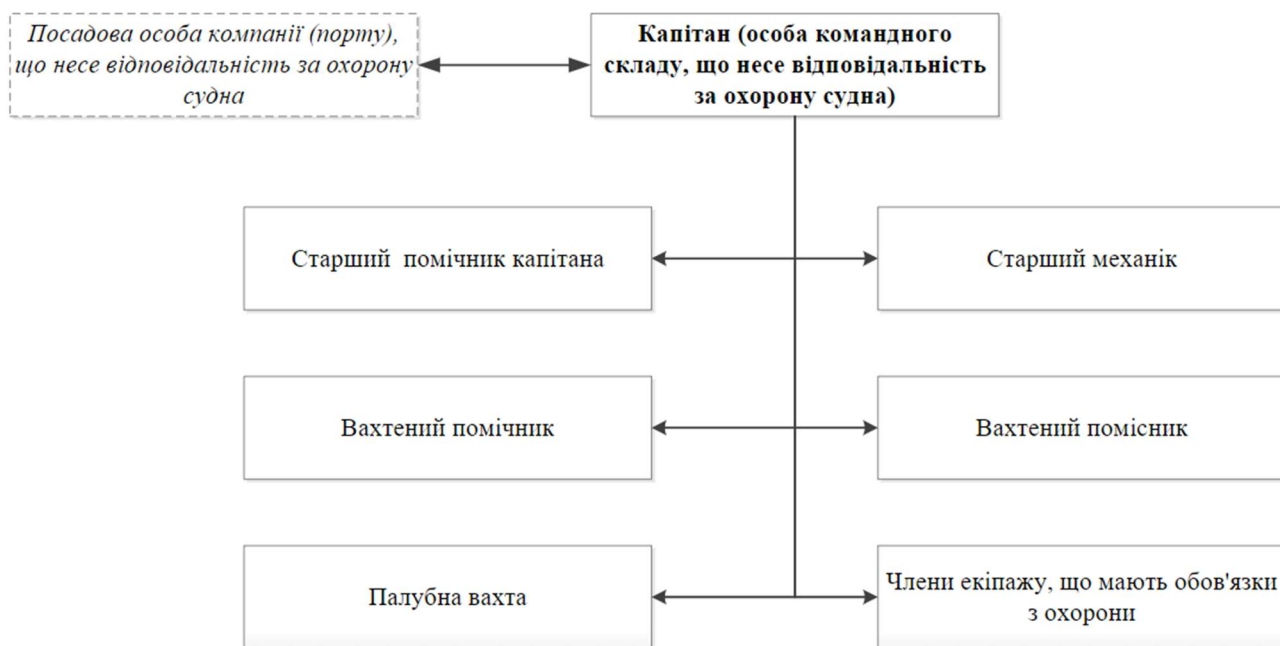


Рис 5.2 –Організаційна структура охорони судна

Оцінка охорони судна повинна оформлятися документом, розглядатися, прийматися і зберігатися у компанії. Кожне судно повинно мати на борту схвалений адміністрацією план охорони судна (Ship Security Plan (SSP)). План повинен містити положення, що стосуються трьох рівнів охорони. Подання на схвалення плану охорони судна або поправок до раніше схваленого плану повинно супроводжуватися оцінкою охорони, на підставі якої були вироблені план або поправки до нього. Такий план повинен розроблятися, беручи до уваги керівництво, наведене у частині В Кодексу, він повинен бути на мові чи мовах, які є робочими на судні. Якщо використовувана мова або мови не є англійською, французькою або іспанською, то до плану додається переклад на одну з цих мов.

План повинен відображати таке:

1) заходи щодо запобігання того, щоб на судні не опинилися призначені для застосування проти людей, суден або портів зброя, небезпечні речовини і пристрої, на перевезення яких немає дозволу;

2) визначення ділянок обмеженого доступу і заходів щодо запобігання несанкціонованого доступу до них;

3) заходи щодо запобігання несанкціонованого доступу на судно;

4) процедури дій у випадку загрози події або порушення охорони, включаючи положення з підтримки критично важливих операцій на судні або у взаємодії судно / порт;

5) процедури виконання будь-яких інструкцій з охорони, які можуть віддавати при рівні охорони 3;

6) порядок евакуації у випадках загрози або при порушенні захисту;

7) обов'язки персоналу судна, що має відповідальність у галузі охорони, а також іншого персоналу судна з питань охорони;

8) процедури аудиторської перевірки діяльності з охорони;

9) процедури проведення процесу навчання, тренувань та навчань за планом;

					KPM.142.6221м.25.20.05.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		56

10)процедури взаємодії з охороною портового засобу; процедури періодичного перегляду плану і приведення його на рівень сучасності;

11)процедури повідомлень про події, пов'язані з охороною;

12)відомості про особу командного складу, відповідальну за охорону судна;

13)відомості про посадову особу компанії з охорони, включаючи його контактну адресу, який доступний цілодобово;

14)процедури проведення перевірки, випробувань, калібрування і технічного обслуговування всього суднового обладнання охорони, якщо воно є;

15)частота проведення випробувань, калібрування і технічного обслуговування всього суднового обладнанняохорони, якщо воно є;

16)вказівка місць запуску суднової системи оповіщення;

17)процедури, інструкції і керівництво з використання суднової системи оповіщення, включаючи випробування, вмикання, вимикання і повернення в початкове положення, і з обмеження хибних сигналів тривоги.

План охорони судна піддається регулярним на плановій основі переглядам і внутрішнім аудиторським перевіркам не рідше одного разу на рік. Метою перегляду та внутрішньої аудиторської перевірки є:

1)перевірка відповідності плану своєму призначенню, а також вимогам міжнародних і національних стандартів, норм і правил;

2)оцінка правильності та ефективності передбачених заходів з охорони судна;

3)виявлення недоліків і невідповідностей плану і вироблення пропозицій щодо їх усунення;

4)вироблення пропозицій щодо вдосконалення плану і приведення його на рівень сучасності на підставі досвіду експлуатації або обставин, що змінилися;

5)прийняття рішень щодо коригування плану.

5.5 Висновки до розділу

1.Розглянуті загальні положення Міжнародної конвенції з охорони людського життя на морі та Кодексу з охорони суден і портових споруд, які є основою для формування основних принципів забезпечення охорони судна.

2.Систематизовано основні принципи забезпечення охорони судна відповідно до вимог Міжнародної конвенції з охорони людського життя на морі та Кодексу з охорони суден і портових споруд, здійснена класифікація принципів та їх змістовна деталізація з метою подальшої формалізації моделей охорони судна, наприклад, у складі інформаційно-аналітичних моделей систем підтримки прийняття рішення.

					КРМ.142.6221м.25.20.05.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		58

ВИСНОВОК ДО РОБОТИ

В кваліфікаційній роботі було досліджено, як працює судновий дизельний двигун Wärtsilä 9L32/40 та наскільки міцними є його основні деталі. Двигун поширений на різних типах морських суден. Актуальність роботи полягає в тому, щоб забезпечити його надійну та ефективну роботу за будь-яких умов експлуатації.

У першому розділі детально розглянуто будову двигуна, його системи (паливну, змащення, охолодження, запуск) та правила обслуговування. Зроблено висновок, що конструкція двигуна дуже надійна, має довгий термін служби та може працювати на важких видах палива, при цьому відповідаючи сучасним екологічним нормам.

У другому розділі змодельовано робочий цикл двигуна при номінальній потужності, використовуючи метод Гріневецького–Мазінга. Визначили ключові параметри процесів усередині циліндра, побудували індикаторну діаграму та розрахували показники ефективності. Ці дані стали основою для динамічного розрахунку, який допоміг визначити сили, що діють на деталі кривошипно-шатунного механізму, та крутний момент на колінчастому валу.

Третій розділ присвячений аналізу того, як запас міцності поршня та поршневого пальця залежить від швидкості обертання двигуна. Ми провели серію розрахунків для різних режимів роботи та побудували відповідні графіки. Встановлено: чим вища швидкість обертання, тим сильніші механічні та теплові навантаження, що зменшує запас міцності. При цьому всі навантаження знаходяться в межах допустимих норм для всього діапазону швидкостей, що підтверджує надійність вузла. Режим роботи на 750 об/хв виявився найбільш збалансованим з точки зору навантажень і міцності.

У четвертому розділі оцінено економічну сторону дослідження та складено кошторис витрат. Розрахований показник ефективності роботи значно перевищив нормативне значення, що підтверджує доцільність та виправданість виконаної роботи.

					KPM.142.6221m.25.20.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		59

Таким чином, результати роботи підтверджують, що отримані дані можна використовувати для аналізу, оптимізації режимів роботи суднових дизелів та оцінки міцності їхніх основних компонентів. Матеріали дослідження можуть бути корисними як у навчанні, так і на практиці під час експлуатації суднових енергетичних установок.

					КРМ.142.6221м.25.20.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		60

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Горбов В.М. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Суднові енергетичні установки» за спеціальністю “Суднові енергетичні установки та устаткування” [Текст]:/ В.М.Горбов, І.П. Єсін, А.А. Андреев. – Миколаїв НУК, 2016. – 53 с.
2. Marine Engine IMO Tier II and Tier III Programme 2nd edition 2017 –252 с
3. Wärtsilä 32 Product Guide.
4. Артемов Г.А. Горбов В.М. Суднові енергетичні установки [Текст]: навчальний посібник/ Г.А. Артемов, В.М. Горбов – Миколаїв: УДМТУ, 2002.- 356 с.
5. Горбов В.М. Енциклопедія суднової енергетики [Текст]: підручник/ В.М.Горбов. – Миколаїв: НУК, 2010. – 624 с.
6. Горбов В.М. Суднова енергетика та Світовий океан [Текст]: Підручник за ред. В.М. Горбова. – Миколаїв: НУК, 2007. – 596 с.
7. Експлуатація та ремонт двигунів внутрішнього згорання. Навчальний посібник / Маркович С.І., Бевз О.В.– Кропивницький: ЦНТУ, 2022. – 315 с.
8. Єпіфанов О. А. Конструкції суднових котлів : навчальний посібник / О.А. Єпіфанов. – Миколаїв : НУК, 2016. – 198 с.
9. Марченко А.П., Шеховцов А.Ф. Двигуни внутрішнього згорання: Серія підручників у 6 томах. Т.6. Надійність ДВЗ.– Харків: Видавничий центр НТУ «ХП», 2004. – 425 с.
10. Наливайко В.С. Суднові двигуни внутрішнього згорання. Підручник. /В.С. Наливайко, Б.Г. Тимошевський, С.Г. Ткаченко.– Миколаїв: видавець Торубара В.В. 2015. – 332 с.
11. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене. /За ред. К.Н. Ткачука і М.О. Халімовського. – К.: Основа, 2006 – 448 с.

ДОДАТОК А – Результати розрахунку робочого процесу двигуна Wärtsilä 9L32/40

Результат розрахунку робочого процесу №1 (550 хв⁻¹)

V/V_c	$p_{ст}$	$p_{розш}$
1,00	17,83	
1,00	14,86	17,83
1,63	7,64	17,83
2,31	4,76	11,54
2,99	3,35	8,37
3,67	2,54	6,48
4,34	2,01	5,24
5,02	1,65	4,37
5,70	1,39	3,73
6,38	1,19	3,24
7,06	1,04	2,86
7,74	0,92	2,55
8,42	0,82	2,29
9,09	0,74	2,08
9,77	0,67	1,90
10,45	0,61	1,75
11,13	0,56	1,62
11,81	0,52	1,50
12,49	0,48	1,40
13,16	0,45	1,31
13,84	0,42	1,23
14,52	0,39	1,16
15,20	0,37	1,10
15,20	0,37	0,37

Показник політропи стиснення n_1	1,361
Показник політропи розширення n_2	1,249
Тиск кінця стиснення p_c , МПа	14,855
Максимальний тиск згоряння p_z , МПа	17,826
Ступінь попереднього розширення ρ	1,63
Ступінь стиснення ϵ	15,2

Результат розрахунку робочого процесу №2 (650 хв^{-1})

V/V_c	$p_{ст}$	$p_{розш}$
1,00	18,50	
1,00	14,92	18,50
1,66	7,51	18,50
2,33	4,70	12,00
3,01	3,32	8,70
3,69	2,52	6,73
4,36	2,00	5,44
5,04	1,65	4,54
5,72	1,39	3,87
6,40	1,19	3,36
7,07	1,04	2,96
7,75	0,92	2,64
8,43	0,82	2,37
9,10	0,73	2,15
9,78	0,67	1,97
10,46	0,61	1,81
11,14	0,56	1,67
11,81	0,52	1,55
12,49	0,48	1,44
13,17	0,44	1,35
13,85	0,42	1,27
14,52	0,39	1,19
15,20	0,37	1,13
15,20	0,37	0,37

Показник політропи стиснення n_1	1,363
Показник політропи розширення n_2	1,262
Тиск кінця стиснення p_c , МПа	14,92
Максимальний тиск згоряння p_z , МПа	18,501
Ступінь попереднього розширення ρ	1,655
Ступінь стиснення ϵ	15,2

Результат розрахунку робочого процесу №3 (750 хв⁻¹)

V/V_c	$p_{ст}$	$p_{розш}$
1,00	19,45	
1,00	14,96	19,45
1,61	7,81	19,45
2,29	4,83	12,44
2,97	3,39	8,94
3,65	2,56	6,88
4,33	2,03	5,54
5,01	1,66	4,60
5,69	1,40	3,91
6,37	1,20	3,39
7,05	1,04	2,98
7,73	0,92	2,65
8,41	0,82	2,38
9,08	0,74	2,16
9,76	0,67	1,97
10,44	0,61	1,81
11,12	0,56	1,67
11,80	0,52	1,55
12,48	0,48	1,44
13,16	0,44	1,35
13,84	0,42	1,26
14,52	0,39	1,19
15,20	0,37	1,12
15,20	0,37	0,37

Показник політропи стиснення n_1	1,364
Показник політропи розширення n_2	1,271
Тиск кінця стиснення p_c , МПа	14,964
Максимальний тиск згоряння p_z , МПа	19,453
Ступінь попереднього розширення ρ	1,611
Ступінь стиснення ε	15,2

Результат розрахунку робочого процесу №4 (850 хв^{-1})

V/V_c	$p_{ст}$	$p_{розш}$
1,00	20,30	
1,00	14,93	20,30
1,68	7,38	20,30
2,35	4,65	13,26
3,03	3,30	9,65
3,71	2,50	7,49
4,38	1,99	6,06
5,06	1,64	5,06
5,73	1,38	4,32
6,41	1,19	3,76
7,09	1,03	3,31
7,76	0,91	2,95
8,44	0,82	2,66
9,11	0,73	2,41
9,79	0,67	2,21
10,47	0,61	2,03
11,14	0,56	1,87
11,82	0,52	1,74
12,50	0,48	1,62
13,17	0,44	1,52
13,85	0,42	1,43
14,52	0,39	1,34
15,20	0,37	1,27
15,20	0,37	0,37

Показник політропи стиснення n_1	1,363
Показник політропи розширення n_2	1,258
Тиск кінця стиснення p_c , МПа	14,928
Максимальний тиск згоряння p_z , МПа	20,302
Ступінь попереднього розширення ρ	1,677
Ступінь стиснення ϵ	15,2

Результат розрахунку робочого процесу №5 (950 хв^{-1})

V/V_c	$p_{ст}$	$p_{розш}$
1,00	21,42	
1,00	14,88	21,42
1,70	7,24	21,42
2,37	4,59	14,11
3,05	3,26	10,32
3,72	2,48	8,04
4,40	1,98	6,53
5,07	1,63	5,47
5,75	1,37	4,68
6,42	1,18	4,07
7,10	1,03	3,60
7,77	0,91	3,21
8,45	0,81	2,89
9,12	0,73	2,63
9,80	0,66	2,41
10,47	0,61	2,21
11,15	0,56	2,05
11,82	0,51	1,90
12,50	0,48	1,78
13,17	0,44	1,66
13,85	0,41	1,56
14,52	0,39	1,47
15,20	0,37	1,39
15,20	0,37	0,37

Показник політропи стиснення n_1	1,362
Показник політропи розширення n_2	1,247
Тиск кінця стиснення p_c , МПа	14,876
Максимальний тиск згоряння p_z , МПа	21,422
Ступінь попереднього розширення ρ	1,697
Ступінь стиснення ϵ	15,2

Результати динамічного розрахунку двигуна 9L32/40

Результат динамічного розрахунку двигуна №1 (550 хв⁻¹)

j°	Pr	Pj	Pdv	N	Z	T
0	0,3770	-1,0920	-0,7150	0,0000	-0,7150	0,0000
15	0,3770	-1,0363	-0,6593	-0,0349	-0,6278	-0,2043
30	0,3770	-0,8780	-0,5010	-0,0514	-0,4082	-0,2950
45	0,3770	-0,6413	-0,2643	-0,0385	-0,1597	-0,2142
60	0,3770	-0,3610	0,0160	0,0029	0,0055	0,0153
75	0,3770	-0,0745	0,3025	0,0608	0,0196	0,3079
90	0,3770	0,1850	0,5620	0,1171	-0,1171	0,5620
105	0,3770	0,3950	0,7720	0,1552	-0,3497	0,7055
120	0,3770	0,5460	0,9230	0,1657	-0,6050	0,7165
135	0,3770	0,6413	1,0183	0,1484	-0,8250	0,6151
150	0,3770	0,6930	1,0700	0,1097	-0,9815	0,4400
165	0,3770	0,7158	1,0928	0,0578	-1,0706	0,2270
180	0,3770	0,7220	1,0990	0,0000	-1,0990	0,0000
195	0,3724	0,7158	1,0883	-0,0575	-1,0661	-0,2261
210	0,3928	0,6930	1,0858	-0,1113	-0,9960	-0,4465
225	0,4309	0,6413	1,0722	-0,1563	-0,8687	-0,6476
240	0,4940	0,5460	1,0400	-0,1867	-0,6817	-0,8074
255	0,5967	0,3950	0,9917	-0,1993	-0,4492	-0,9063
270	0,7672	0,1850	0,9522	-0,1984	-0,1984	-0,9522
285	1,0643	-0,0745	0,9897	-0,1989	0,0640	-1,0075
300	1,6209	-0,3610	1,2599	-0,2262	0,4341	-1,2042
315	2,7633	-0,6413	2,1220	-0,3093	1,2817	-1,7192
330	5,3017	-0,8780	4,4237	-0,4536	3,6043	-2,6047
345	10,5016	-1,0363	9,4653	-0,5005	9,0133	-2,9332
360	14,8583	-1,0920	13,7663	0,0000	13,7663	0,0000
375	17,8260	-1,0363	16,7897	0,8877	15,9878	5,2030
390	12,7454	-0,8780	11,8674	1,2168	9,6691	6,9875
405	7,0090	-0,6413	6,3677	0,9282	3,8463	5,1590
420	4,2959	-0,3610	3,9349	0,7063	1,3558	3,7609
435	2,9199	-0,0745	2,8454	0,5719	0,1840	2,8965
450	2,1624	0,1850	2,3474	0,4892	-0,4892	2,3474
465	1,7171	0,3950	2,1121	0,4245	-0,9567	1,9302
480	1,4438	0,5460	1,9898	0,3572	-1,3042	1,5447
495	1,2735	0,6413	1,9148	0,2791	-1,5513	1,1566
510	1,1699	0,6930	1,8629	0,1910	-1,7088	0,7660
525	1,1140	0,7158	1,8299	0,0968	-1,7926	0,3802
540	1,0964	0,7220	1,8183	0,0000	-1,8183	0,0000
555	0,3620	0,7158	1,0778	-0,0570	-1,0559	-0,2239
570	0,3620	0,6930	1,0550	-0,1082	-0,9677	-0,4338
585	0,3620	0,6413	1,0033	-0,1463	-0,8129	-0,6060
600	0,3620	0,5460	0,9080	-0,1630	-0,5951	-0,7049
615	0,3620	0,3950	0,7570	-0,1521	-0,3429	-0,6918
630	0,3620	0,1850	0,5470	-0,1140	-0,1140	-0,5470
645	0,3620	-0,0745	0,2875	-0,0578	0,0186	-0,2927
660	0,3620	-0,3610	0,0010	-0,0002	0,0004	-0,0010
675	0,3620	-0,6413	-0,2793	0,0407	-0,1687	0,2263
690	0,3620	-0,8780	-0,5160	0,0529	-0,4204	0,3038
705	0,3620	-1,0363	-0,6743	0,0357	-0,6421	0,2090
720	0,3620	-1,0920	-0,7300	0,0000	-0,7300	0,0000

Результат динамічного розрахунку двигуна №2 (650 хв⁻¹)

j°	Pr	Pj	Pdv	N	Z	T
0	0,3770	-1,5252	-1,1482	0,0000	-1,1482	0,0000
15	0,3770	-1,4474	-1,0704	-0,0566	-1,0193	-0,3317
30	0,3770	-1,2263	-0,8493	-0,0871	-0,6919	-0,5000
45	0,3770	-0,8957	-0,5187	-0,0756	-0,3133	-0,4203
60	0,3770	-0,5042	-0,1272	-0,0228	-0,0438	-0,1215
75	0,3770	-0,1041	0,2729	0,0549	0,0177	0,2778
90	0,3770	0,2584	0,6354	0,1324	-0,1324	0,6354
105	0,3770	0,5517	0,9287	0,1867	-0,4206	0,8487
120	0,3770	0,7626	1,1396	0,2045	-0,7469	0,8846
135	0,3770	0,8957	1,2727	0,1855	-1,0312	0,7688
150	0,3770	0,9678	1,3448	0,1379	-1,2336	0,5530
165	0,3770	0,9998	1,3768	0,0728	-1,3487	0,2860
180	0,3770	1,0083	1,3853	0,0000	-1,3853	0,0000
195	0,3724	0,9998	1,3722	-0,0726	-1,3443	-0,2851
210	0,3929	0,9678	1,3607	-0,1395	-1,2482	-0,5595
225	0,4310	0,8957	1,3267	-0,1934	-1,0749	-0,8014
240	0,4943	0,7626	1,2569	-0,2256	-0,8238	-0,9757
255	0,5972	0,5517	1,1488	-0,2309	-0,5204	-1,0499
270	0,7680	0,2584	1,0265	-0,2139	-0,2139	-1,0265
285	1,0659	-0,1041	0,9619	-0,1933	0,0622	-0,9791
300	1,6245	-0,5042	1,1203	-0,2011	0,3860	-1,0707
315	2,7715	-0,8957	1,8758	-0,2734	1,1330	-1,5198
330	5,3226	-1,2263	4,0963	-0,4200	3,3375	-2,4119
345	10,5536	-1,4474	9,1062	-0,4815	8,6713	-2,8219
360	14,9394	-1,5252	13,4142	0,0000	13,4142	0,0000
375	18,5010	-1,4474	17,0536	0,9017	16,2391	5,2847
390	13,4375	-1,2263	12,2113	1,2521	9,9492	7,1900
405	7,3438	-0,8957	6,4480	0,9400	3,8948	5,2241
420	4,4782	-0,5042	3,9740	0,7133	1,3693	3,7982
435	3,0316	-0,1041	2,9276	0,5884	0,1893	2,9801
450	2,2381	0,2584	2,4965	0,5202	-0,5202	2,4965
465	1,7729	0,5517	2,3246	0,4672	-1,0530	2,1245
480	1,4881	0,7626	2,2507	0,4040	-1,4752	1,7472
495	1,3108	0,8957	2,2066	0,3217	-1,7877	1,3328
510	1,2032	0,9678	2,1710	0,2226	-1,9915	0,8927
525	1,1451	0,9998	2,1449	0,1134	-2,1012	0,4456
540	1,1268	1,0083	2,1351	0,0000	-2,1351	0,0000
555	0,3620	0,9998	1,3618	-0,0720	-1,3340	-0,2829
570	0,3620	0,9678	1,3298	-0,1364	-1,2199	-0,5468
585	0,3620	0,8957	1,2577	-0,1833	-1,0190	-0,7597
600	0,3620	0,7626	1,1246	-0,2019	-0,7371	-0,8730
615	0,3620	0,5517	0,9137	-0,1836	-0,4139	-0,8350
630	0,3620	0,2584	0,6204	-0,1293	-0,1293	-0,6204
645	0,3620	-0,1041	0,2579	-0,0518	0,0167	-0,2626
660	0,3620	-0,5042	-0,1422	0,0255	-0,0490	0,1359
675	0,3620	-0,8957	-0,5337	0,0778	-0,3224	0,4324
690	0,3620	-1,2263	-0,8643	0,0886	-0,7042	0,5089
705	0,3620	-1,4474	-1,0854	0,0574	-1,0336	0,3364
720	0,3620	-1,5252	-1,1632	0,0000	-1,1632	0,0000

Результат динамічного розрахунку двигуна №3 (750 хв⁻¹)

j°	Pr	Pj	Pdv	N	Z	T
0	0,3770	-2,0306	-1,6536	0,0000	-1,6536	0,0000
15	0,3770	-1,9270	-1,5500	-0,0820	-1,4760	-0,4803
30	0,3770	-1,6326	-1,2556	-0,1287	-1,0230	-0,7393
45	0,3770	-1,1926	-0,8156	-0,1189	-0,4926	-0,6607
60	0,3770	-0,6712	-0,2942	-0,0528	-0,1014	-0,2812
75	0,3770	-0,1385	0,2385	0,0479	0,0154	0,2427
90	0,3770	0,3441	0,7211	0,1503	-0,1503	0,7211
105	0,3770	0,7345	1,1115	0,2234	-0,5034	1,0158
120	0,3770	1,0153	1,3923	0,2499	-0,9126	1,0808
135	0,3770	1,1926	1,5696	0,2288	-1,2716	0,9481
150	0,3770	1,2885	1,6655	0,1708	-1,5278	0,6849
165	0,3770	1,3311	1,7081	0,0903	-1,6733	0,3549
180	0,3770	1,3425	1,7195	0,0000	-1,7195	0,0000
195	0,3724	1,3311	1,7035	-0,0901	-1,6688	-0,3539
210	0,3929	1,2885	1,6814	-0,1724	-1,5424	-0,6914
225	0,4310	1,1926	1,6236	-0,2367	-1,3154	-0,9807
240	0,4944	1,0153	1,5097	-0,2710	-0,9895	-1,1719
255	0,5974	0,7345	1,3318	-0,2677	-0,6033	-1,2172
270	0,7684	0,3441	1,1125	-0,2318	-0,2318	-1,1125
285	1,0668	-0,1385	0,9282	-0,1866	0,0600	-0,9449
300	1,6262	-0,6712	0,9550	-0,1714	0,3291	-0,9128
315	2,7757	-1,1926	1,5831	-0,2308	0,9562	-1,2826
330	5,3330	-1,6326	3,7004	-0,3794	3,0150	-2,1788
345	10,5796	-1,9270	8,6526	-0,4575	8,2394	-2,6814
360	14,9801	-2,0306	12,9496	0,0000	12,9496	0,0000
375	19,4530	-1,9270	17,5260	0,9266	16,6890	5,4311
390	13,6222	-1,6326	11,9896	1,2293	9,7686	7,0594
405	7,4127	-1,1926	6,2201	0,9067	3,7571	5,0395
420	4,5043	-0,6712	3,8330	0,6880	1,3207	3,6635
435	3,0408	-0,1385	2,9023	0,5833	0,1877	2,9544
450	2,2400	0,3441	2,5841	0,5385	-0,5385	2,5841
465	1,7715	0,7345	2,5060	0,5037	-1,1351	2,2902
480	1,4851	1,0153	2,5004	0,4488	-1,6389	1,9410
495	1,3070	1,1926	2,4995	0,3644	-2,0251	1,5098
510	1,1989	1,2885	2,4874	0,2551	-2,2817	1,0228
525	1,1406	1,3311	2,4717	0,1307	-2,4213	0,5135
540	1,1222	1,3425	2,4647	0,0000	-2,4647	0,0000
555	0,3620	1,3311	1,6931	-0,0895	-1,6586	-0,3517
570	0,3620	1,2885	1,6505	-0,1692	-1,5140	-0,6787
585	0,3620	1,1926	1,5546	-0,2266	-1,2595	-0,9390
600	0,3620	1,0153	1,3773	-0,2472	-0,9027	-1,0692
615	0,3620	0,7345	1,0965	-0,2204	-0,4967	-1,0021
630	0,3620	0,3441	0,7061	-0,1471	-0,1471	-0,7061
645	0,3620	-0,1385	0,2235	-0,0449	0,0145	-0,2275
660	0,3620	-0,6712	-0,3092	0,0555	-0,1065	0,2956
675	0,3620	-1,1926	-0,8306	0,1211	-0,5017	0,6729
690	0,3620	-1,6326	-1,2706	0,1303	-1,0352	0,7481
705	0,3620	-1,9270	-1,5650	0,0827	-1,4903	0,4850
720	0,3620	-2,0306	-1,6686	0,0000	-1,6686	0,0000

Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата

KPM.142.6221м.25.20.ПЗ

Лист

69

Результат динамічного розрахунку двигуна №4 (850 хв⁻¹)

j°	Pr	Pj	Pdv	N	Z	T
0	0,3770	-2,6082	-2,2312	0,0000	-2,2312	0,0000
15	0,3770	-2,4751	-2,0981	-0,1109	-1,9979	-0,6502
30	0,3770	-2,0970	-1,7200	-0,1764	-1,4014	-1,0127
45	0,3770	-1,5318	-1,1548	-0,1683	-0,6975	-0,9356
60	0,3770	-0,8622	-0,4852	-0,0871	-0,1672	-0,4637
75	0,3770	-0,1780	0,1990	0,0400	0,0129	0,2026
90	0,3770	0,4419	0,8189	0,1706	-0,1706	0,8189
105	0,3770	0,9434	1,3204	0,2654	-0,5981	1,2067
120	0,3770	1,3041	1,6811	0,3017	-1,1019	1,3050
135	0,3770	1,5318	1,9088	0,2782	-1,5465	1,1530
150	0,3770	1,6551	2,0321	0,2084	-1,8640	0,8356
165	0,3770	1,7097	2,0867	0,1103	-2,0442	0,4335
180	0,3770	1,7243	2,1013	0,0000	-2,1013	0,0000
195	0,3724	1,7097	2,0822	-0,1101	-2,0397	-0,4326
210	0,3929	1,6551	2,0479	-0,2100	-1,8786	-0,8421
225	0,4310	1,5318	1,9627	-0,2861	-1,5902	-1,1856
240	0,4943	1,3041	1,7983	-0,3228	-1,1787	-1,3960
255	0,5972	0,9434	1,5405	-0,3096	-0,6978	-1,4079
270	0,7680	0,4419	1,2099	-0,2521	-0,2521	-1,2099
285	1,0659	-0,1780	0,8880	-0,1785	0,0574	-0,9039
300	1,6245	-0,8622	0,7623	-0,1368	0,2627	-0,7286
315	2,7715	-1,5318	1,2398	-0,1807	0,7489	-1,0045
330	5,3226	-2,0970	3,2256	-0,3307	2,6281	-1,8992
345	10,5536	-2,4751	8,0784	-0,4271	7,6926	-2,5034
360	14,9394	-2,6082	12,3313	0,0000	12,3313	0,0000
375	20,3020	-2,4751	17,8269	0,9426	16,9755	5,5244
390	15,0078	-2,0970	12,9109	1,3238	10,5192	7,6019
405	8,2177	-1,5318	6,6859	0,9746	4,0385	5,4168
420	5,0189	-0,8622	4,1568	0,7461	1,4322	3,9729
435	3,4019	-0,1780	3,2240	0,6480	0,2085	3,2818
450	2,5139	0,4419	2,9558	0,6159	-0,6159	2,9558
465	1,9929	0,9434	2,9363	0,5902	-1,3300	2,6835
480	1,6737	1,3041	2,9777	0,5345	-1,9517	2,3116
495	1,4749	1,5318	3,0066	0,4383	-2,4359	1,8161
510	1,3541	1,6551	3,0092	0,3085	-2,7603	1,2374
525	1,2890	1,7097	2,9987	0,1585	-2,9375	0,6230
540	1,2684	1,7243	2,9927	0,0000	-2,9927	0,0000
555	0,3620	1,7097	2,0717	-0,1095	-2,0295	-0,4304
570	0,3620	1,6551	2,0171	-0,2068	-1,8502	-0,8294
585	0,3620	1,5318	1,8938	-0,2761	-1,5343	-1,1439
600	0,3620	1,3041	1,6661	-0,2990	-1,0920	-1,2933
615	0,3620	0,9434	1,3054	-0,2624	-0,5913	-1,1930
630	0,3620	0,4419	0,8039	-0,1675	-0,1675	-0,8039
645	0,3620	-0,1780	0,1840	-0,0370	0,0119	-0,1873
660	0,3620	-0,8622	-0,5002	0,0898	-0,1723	0,4780
675	0,3620	-1,5318	-1,1698	0,1705	-0,7066	0,9477
690	0,3620	-2,0970	-1,7350	0,1779	-1,4136	1,0216
705	0,3620	-2,4751	-2,1131	0,1117	-2,0122	0,6548
720	0,3620	-2,6082	-2,2462	0,0000	-2,2462	0,0000

Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата

KPM.142.6221м.25.20.ПЗ

Лист

70

Результат динамічного розрахунку двигуна №5 (950 хв⁻¹)

φ°	P_r	P_f	P_{dv}	N	Z	T
0	0,3770	-3,2579	-2,8809	0,0000	-2,8809	0,0000
15	0,3770	-3,0918	-2,7148	-0,1435	-2,5851	-0,8413
30	0,3770	-2,6194	-2,2424	-0,2299	-1,8270	-1,3203
45	0,3770	-1,9134	-1,5364	-0,2240	-0,9280	-1,2448
60	0,3770	-1,0770	-0,7000	-0,1256	-0,2412	-0,6690
75	0,3770	-0,2223	0,1547	0,0311	0,0100	0,1575
90	0,3770	0,5520	0,9290	0,1936	-0,1936	0,9290
105	0,3770	1,1784	1,5554	0,3126	-0,7045	1,4215
120	0,3770	1,6290	2,0060	0,3601	-1,3148	1,5572
135	0,3770	1,9134	2,2904	0,3339	-1,8556	1,3835
150	0,3770	2,0674	2,4444	0,2506	-2,2422	1,0051
165	0,3770	2,1357	2,5127	0,1329	-2,4614	0,5220
180	0,3770	2,1539	2,5309	0,0000	-2,5309	0,0000
195	0,3724	2,1357	2,5081	-0,1326	-2,4570	-0,5211
210	0,3929	2,0674	2,4603	-0,2523	-2,2568	-1,0117
225	0,4309	1,9134	2,3443	-0,3417	-1,8993	-1,4160
240	0,4942	1,6290	2,1231	-0,3811	-1,3916	-1,6481
255	0,5970	1,1784	1,7754	-0,3568	-0,8042	-1,6225
270	0,7676	0,5520	1,3196	-0,2750	-0,2750	-1,3196
285	1,0651	-0,2223	0,8428	-0,1694	0,0545	-0,8579
300	1,6227	-1,0770	0,5457	-0,0980	0,1880	-0,5216
315	2,7674	-1,9134	0,8540	-0,1245	0,5159	-0,6919
330	5,3121	-2,6194	2,6927	-0,2761	2,1939	-1,5855
345	10,5276	-3,0918	7,4358	-0,3932	7,0807	-2,3043
360	14,8988	-3,2579	11,6409	0,0000	11,6409	0,0000
375	21,4220	-3,0918	18,3302	0,9692	17,4548	5,6804
390	13,2275	-2,6194	10,6081	1,0877	8,6430	6,2460
405	7,2776	-1,9134	5,3642	0,7820	3,2402	4,3460
420	4,4623	-1,0770	3,3853	0,6076	1,1664	3,2356
435	3,0339	-0,2223	2,8117	0,5651	0,1819	2,8621
450	2,2473	0,5520	2,7994	0,5833	-0,5833	2,7994
465	1,7849	1,1784	2,9633	0,5956	-1,3423	2,7082
480	1,5011	1,6290	3,1300	0,5618	-2,0516	2,4298
495	1,3241	1,9134	3,2375	0,4719	-2,6230	1,9555
510	1,2165	2,0674	3,2839	0,3367	-3,0123	1,3504
525	1,1584	2,1357	3,2941	0,1742	-3,2269	0,6843
540	1,1401	2,1539	3,2940	0,0000	-3,2940	0,0000
555	0,3620	2,1357	2,4977	-0,1321	-2,4467	-0,5189
570	0,3620	2,0674	2,4294	-0,2491	-2,2285	-0,9990
585	0,3620	1,9134	2,2754	-0,3317	-1,8435	-1,3744
600	0,3620	1,6290	1,9910	-0,3574	-1,3050	-1,5455
615	0,3620	1,1784	1,5404	-0,3096	-0,6977	-1,4078
630	0,3620	0,5520	0,9140	-0,1905	-0,1905	-0,9140
645	0,3620	-0,2223	0,1397	-0,0281	0,0090	-0,1422
660	0,3620	-1,0770	-0,7150	0,1283	-0,2463	0,6833
675	0,3620	-1,9134	-1,5514	0,2262	-0,9371	1,2569
690	0,3620	-2,6194	-2,2574	0,2315	-1,8392	1,3292
705	0,3620	-3,0918	-2,7298	0,1443	-2,5994	0,8459
720	0,3620	-3,2579	-2,8959	0,0000	-2,8959	0,0000