

**Ткаченко В.В., Будолак С.Ю., Гуменніков Р.В., Батуєв Д.Ю.**

## **ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СУДНОВОГО ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ В ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ УМОВАХ**

*В статті приведена класифікація засобів діагностування двигуна внутрішнього згорання. Розглянуті методи, які застосовуються для оцінки технічного стану двигунів в експлуатаційних умовах.*

*Проаналізовано основні відмови, які зустрічаються при експлуатації двигунів внутрішнього згорання. З аналізу відмов встановлено, що переважають зносіві відмови і механічні ушкодження, віднесені до циліндропоршневої групи. Доведено, що наслідком подібного виду відмов найчастіше є відсутність запалення в одному з циліндрів двигуна, що стає причиною порушення робочого циклу та істотної втрати потужності в номінальному режимі. Встановлено, що потужність є одним з діагностичних параметрів стану двигуна, який пов'язаний з обертальним моментом і кутовою швидкістю колінчастого валу, обертання якого забезпечується роботою розширення газів у камері згорання.*

*Зроблений висновок, що обертальний момент є діагностичною ознакою, що повною мірою описує технічний стан двигуна, але його важко вимірити. Тому для визначення технічного стану двигуна внутрішнього згорання запропоновано використовувати кутове прискорення колінчастого валу як оцінний діагностичний показник. Оскільки кутове прискорення колінчастого валу є функцією збільшення кутової швидкості, то характер зміни кутового прискорення може виступити мірою оцінки обертального моменту двигуна, а виходить, і технічного стану.*

*Теоретично обґрунтовано та підтверджене застосування величини кутового прискорення як діагностичного показника для безрозбірної, безнавантажувальної оцінки технічного стану двигуна внутрішнього згорання в експлуатаційних умовах. Результатом визначення технічного стану суднового двигуна є графіки залежності величини кутового прискорення від кута повороту колінчастого валу всіх циліндрів двигуна, що дозволяють за допомогою експрес-оцінки значень екстремумів кутового прискорення, середньої лінії кутового прискорення визначити наявність несправного циліндра і всього двигуна в цілому.*

**Ключові слова:** *двигун внутрішнього згорання, обертальний момент, поршнева група, експлуатаційні умови, кутове прискорення, технічний стан.*

**Постановка проблеми.** Ефективність роботи двигунів внутрішнього згорання судів залежить від технічного стану (ТС) механізмів і систем. Вихідними показниками, що описують частково або цілком технічний стан, є ефективна потужність обертального моменту, часова та питома витрата палива в номінальному режимі, вібраційне прискорення та вібраційна швидкість елементів судових енергетичних установок. Теоретичний і практичний досвід експлуатації дизельних двигунів у різних галузях транспорту і промисловості показує, що одним з найбільш перспективних способів попередження відмов дизелів є безрозбірна діагностична оцінка технічного стану в режимі експлуатації.

Проектування і впровадження діагностичних комплексів дозволяє покращити економічність судових дизелів, підвищити надійність суден у цілому за рахунок своєчасного виявлення виходу робочих параметрів судових енергетичних установок за межі нормованих значень. Оскільки двигун внутрішнього згорання забезпечує надійність і безаварійну експлуатацію машини або судна в цілому, то важливо визначати технічний стан

---

у процесі експлуатації. Тим більше що доля відмов, яка приходяться на двигун, складає від 25 до 40 %.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розробці методів оцінки технічного стану суднових енергетичних установок і транспортних дизелів присвячений значний ряд досліджень, що провели С.П. Глушков, С.В. Викулова, В.І. Бельських, И.П. Терских, В.М. Лівшиць, И.П. Добролюбов, В.В. Альт, С.С. Куков, В.Н. Жеглов, Ю.В. Гармаш, А.А. Отставнов, А.С. Гребенніков, С.А. Пальтов, А.Ю. Коників і інші вчені. Однак оцінка загального технічного стану судового дизельного двигуна внутрішнього згорання в експлуатаційних умовах не отримала в цих роботах широкого висвітлення. Велика частина виконаних робіт спрямована на оцінку технічного стану шляхом часткового розбирання дизельного двигуна і найчастіше вимагає виконання тестових впливів.

**Метою статті** є розкриття основних положень методу оцінки технічного стану судового двигуна за нерівномірністю частоти обертання колінчастого валу в експлуатаційних умовах.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Поршневі двигун внутрішнього згорання є найбільш розповсюдженим автономним пристроєм, у якому хімічна енергія палива перетворюється в механічну роботу [1]. В даний час практично всі самохідні судна мають у своєму складі мінімум один двигун внутрішнього згорання (ДВЗ). Деякі типи судів мають кілька ДВЗ, один із яких є допоміжним (запуск основного двигуна, резервний або основний генератор, мотопомпа, лебідка і т.д.). Вихідним параметром будь-якого ДВЗ, які цікавить споживача, є потужність у номінальному режимі роботи, а також зміна питомої і годинної витрати палива в широкому діапазоні кутової швидкості – від мінімально стійкого холостого ходу до номінальної (при максимальній потужності).

Попередження відмов, їх оперативне усунення знижує простої суден з технічних причин, збільшує продуктивність робіт, що впливає на скорочення термінів виконання робіт і сприяє отриманню прибутку експлуатуючими організаціями. Тому діагностування використовується практично при всіх видах технічного обслуговування і ремонту (ТЕ і Р) ДВЗ. Таким чином, оцінка ТС ДВЗ дозволяє попереджати відмови, скорочувати час простоїв судів і, як наслідок, впливати на продуктивність машин і якість роботи.

Процеси діагностування складаються з операцій поточного визначення технічного стану об'єкта і прогнозування технічного стану, в якому об'єкт знаходився в минулому. Основним завданням діагностування є поточне виявлення справності об'єкта. Прогнозування ТС дозволяє визначати періодичність діагностування і гарантувати справність об'єкта в майбутньому періоді. Прогнозування дає можливість визначати залишковий ресурс. Діагностування також дозволяє виявити причини аварійних відмов і запобігти їх у майбутньому. Існує досить багато методів діагностування систем ДВЗ і ДВЗ у цілому. Основні, які застосовуються в даний час, класифіковані за типом засобу діагностування [7–14] і наведені на рис. 1.

Для оцінки ТС двигунів в експлуатаційних умовах застосовуються такі методи як:

- оцінка компресії в циліндропоршневій групі;
- оцінка температури вихлопних газів;
- оцінка кількості картерних газів;
- вимір витрати палива;
- вимір тиску в паливній системі;
- вимір тиску в системі змащення;
- вимір зазору в сполученні шатун–шейка;
- вимір різниці тиску в камерах згорання;
- аналіз моторної олії та інші методи.

Наведені методи не дозволяють проводити безперервний моніторинг ТС ДВЗ, вимагають зупинки двигуна і не виключають прогресування несправності, а значить й можливих відмов.



Рисунок 1 – Класифікація засобів діагностування двигуна внутрішнього згоряння

Аналіз робіт з визначення технічного стану ДВЗ дозволяє виділити кілька методик, представлених у таблиці 1.

Таблиця 1– Короткий огляд методів по визначенню технічного стану двигуна внутрішнього згоряння

Автор методу	Назва методики
А.Ю. Понізовський[9]	Оцінка технічного стану циліндропоршневої групи автотракторних дизелів по різниці витрат повітря на впуску і на випуску в пусковому режимі
А.А. Бабошин [10]	Методика діагностування поршневих двигунів внутрішнього згоряння за результатами їх непрямої індикації
Р.В. Іванов [11]	Діагностування ДВЗ по параметру потужності механічних втрат
С.М. Ольшевський [12]	Комплексний контроль технічного стану ДВЗ по параметрах перехідних режимів
А.В. Єгоров [13]	Спосіб визначення моменту інерції двигуна внутрішнього згоряння
С.А. Пальтов [14]	Контроль робочих процесів судових двигунів з використанням електронних систем індикації

На рисунку 2 представлені основні відмови, які зустрічаються при експлуатації ДВЗ.

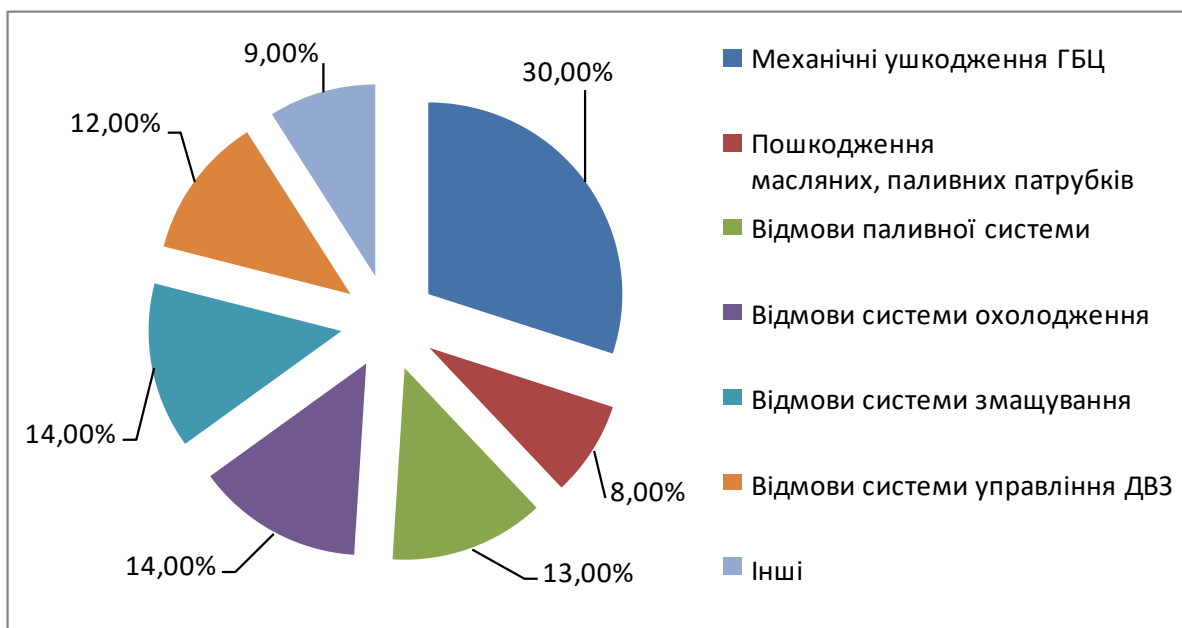


Рисунок 2 – Типовий розподіл відмов дизеля по системах

У результаті аналізу відмов встановлено, що переважають зносіві відмови і механічні uszkodження, віднесені до циліндропоршневої групи (ЦПГ). Наслідком подібного виду відмов найчастіше є відсутність запалення в одному з циліндрів двигуна, що стає причиною порушення робочого циклу та істотної втрати потужності в номінальному режимі. Встановлено, що діагностичними параметрами, які свідчать про передвідмовний стан ДВЗ (або укрупненого вузла), його неправильній роботі, можуть служити інтегральні параметри [8]:

- потужність;
- обертальний момент ДВЗ;
- витрата палива;
- склад газів, що відпрацювали.

Деякі з перерахованих параметрів, наприклад, потужність, пов'язані з обертаючим моментом і кутовою швидкістю колінчастого вала, обертання якого забезпечується роботою розширення газів у камері згорання.

У процесі згорання хімічна енергія палива перетворюється у теплову енергію робочого тіла. Основні вимоги до процесу згорання можуть бути сформульовані трьома положеннями:

- найбільш повне згорання палива;
- найкраще використання кисню повітря;
- оптимальне протікання згорання в часі.

Приведені вимоги викликані тим, що протікання згорання в часі, впливаючи на максимальний тиск і швидкість наростання тиску газів у циліндрі двигуна, визначає також максимальну величину і ступінь динамічності механічного навантаження деталей кривошипно–шатунного механізму (КШМ). На рис. 3 показана залежність наростання тиску в циліндрі двигуна від кута повороту колінчастого вала  $\alpha$ .

Здійснюваний у двигуні характер протікання процесу згорання в часі повинний забезпечити найменші величину і ступінь динамічності механічного навантаження на деталі від дії газів при високому коефіцієнті корисної дії ККД.

Максимальна швидкість наростання тиску газів визначається по формулі, МПа/град ПКВ:

$$W_{p \max} = \left( \frac{dP}{d\alpha} \right)_{\max} = \mu \times tg\beta, \quad (1)$$

де  $\mu$  – масштабний коефіцієнт;

$\left(\frac{dP}{d\alpha}\right)_{\max}$  – прирощення тиску від кута повороту колінчастого валу.

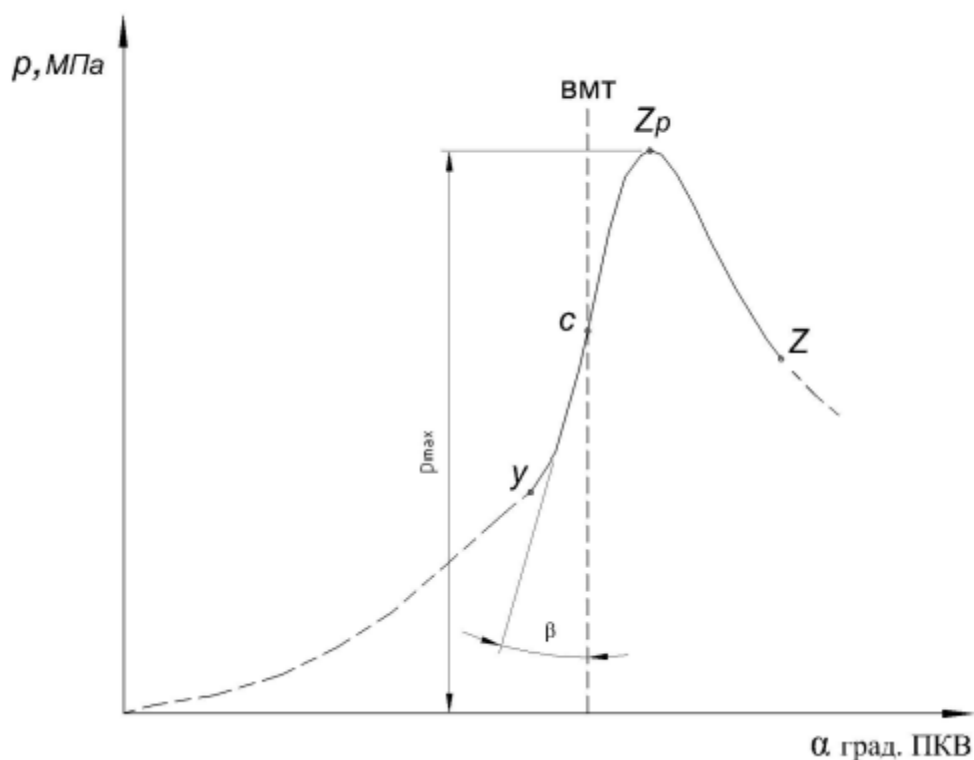


Рисунок 3 – Залежність наростання тиску в камері згоряння від кута повороту колінчастого валу (ПКВ)

Відповідно до вищевикладеного, конструктивними особливостями сучасних дизельних двигунів є застосування палива з цетановим числом 47 – 51. Але ця не єдина умова, від якої залежить процес горіння і наростання тиску в камері згоряння. Затримка samozapalювання палива в циліндрах дизельного двигуна залежить від зміни герметичності ЦПГ унаслідок зносу її елементів, і газорозподільного механізму, що приводить до зниження абсолютних параметрів робочого циклу (тиску і температури в момент упорскування палива). При розрахунку періоду затримки samozapalювання палива в циліндрі  $\tau_3$  дизельного двигуна в залежності від температури і тиску повітря в камері згоряння використовується емпірична формула:

$$\tau_3 = \left(\frac{T_{BII}}{P_{BII}}\right)^m \times C \times e^{\frac{E}{RT_{BII}}}, \quad (2)$$

де  $T_{BII}$ ,  $P_{BII}$  – абсолютні значення температури та тиску повітря в камері згоряння в момент впорскування палива;  $m=0,5$  – показник ступеня стиску для дизельних двигунів;  $C$  – постійне число;  $E$  – коефіцієнт, що залежить від енергії активізації та властивості випаровування палива;  $R$  – універсальна газова стала.

Постійне число  $C$  залежить від частоти обертання  $n$  та визначається за формулою:

$$C = C_o \times (I - dn), \quad (3)$$

де  $C_o = 2 \times 10^{-4}$ ;  $d = 1,6 \times 10^{-4}$ .

---

Енергія дизельного палива характеризується коефіцієнтом:  $E=5000\dots6000$ .

Кут затримки самозаймання палива  $\varphi_3$  визначається за формулою

$$\varphi_3 = 6 \times \pi \times \tau_3 \quad . \quad (4)$$

З урахуванням (4) формула (2) перетворюється так:

$$\varphi_3 = 6 \times \pi \times C \times \left( \frac{T_{ВП}}{P_{ВП}} \right)^m \times C \times e^{\frac{E}{RT_{ВП}}} \quad (5)$$

Оскільки  $T_{ВП}$  знаходиться в чисельнику, а  $P_{ВП}$  у знаменнику, то неможливо однозначно зробити висновок, що кут затримки самозаймання палива в циліндрах двигуна залежить від зносу елементів, оскільки при зносі одночасно зменшуються обидві величини. З урахуванням рівняння стану газу  $P_{ВП} \times V_{ВП} = R \times T_{ВП} \times G_{ВП}$  формули (2) та (5) можуть бути перетворені для аналітичного дослідження:

$$\tau_3 = C \times \left( \frac{V_{ВП}}{R \times G_{ВП}} \right)^m \times C \times e^{\frac{E}{RT_{ВП}}} \quad ; \quad (6)$$

$$\varphi_3 = 6 \times \pi \times C \times \left( \frac{V_{ВП}}{R \times G_{ВП}} \right)^m \times C \times e^{\frac{E}{RT_{ВП}}} \quad , \quad (7)$$

де  $V_{ВП}$  – об'єм повітря у камері згоряння в момент впорскування палива;  $G_{ВП}$  – ваговий заряд палива в момент впорскування.

З представленого вище можна зробити висновок, що основною причиною збільшення періоду і кута затримки самозапалювання палива є зменшення вагового заряду повітря і його температури відповідно до зносу ЦПГ та газорозподільного механізму, тобто втрата герметичності замкнутого простору камери згоряння. Крім зміни кута затримки запалення, змінюються й інші параметри циклу при зменшенні компресії. Усі теоретичні розрахунки побудовані на деяких допущеннях, таких як відсутність тертя між поршнем і гільзою, а отже, між поршневими кільцями і гільзою, також не враховується рідинне тертя колінчастого вала, розподільного вала.

Відповідно до першого закону термодинаміки робота розширення газів дорівнює добутковій силі на переміщення:

$$A = F \times \Delta L \times \cos \alpha \quad , \quad (8)$$

де  $F$  – сила, яка діє на поршень;  $\Delta L$  – переміщення поршня.

У ДВЗ величина ходу поршня  $\Delta L$  постійна, тому що хід дорівнює двом радіусам кривошипа. Відповідно, на величину потужності, або ж здійснення корисної роботи буде найбільшою мірою впливати величина сили, що діє на поршень.

Сила, що діє на поршень, буде залежати від площі поршня і тиску, що діє на днище поршня. Площа поршня є величиною постійною. Відповідно, найбільш важливою умовою для здійснення корисної роботи газу, що розширюється, буде тиск, який діє на поршень, величина якого, буде залежати від режиму роботи (від холостого ходу до максимальної потужності).

У режимі холостого ходу корисна робота витрачається на подолання сил тертя, передачу тепла в систему охолодження і т.п. У випадку перевищення значення сил опору силам від корисної роботи при такті розширення відбудеться зупинка двигуна. У свою чергу, залежно від тиску, що створюється в циліндрі двигуна, скоротиться або збільшиться час ходу поршня, як наслідок, зміниться і прискорення поршня [6].

$$V_n = \omega \times R \times \left( \sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right); \quad (9)$$

$$j_n = \omega^2 \times R \times \left( \sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right), \quad (10)$$

де  $V_n$  та  $j_n$  – швидкість та прискорення поршня відповідно;  $\omega$  – кутова швидкість колінчастого валу;  $R$  – радіус кривошипа;  $\varphi$  – кут повороту колінчастого валу.

Швидкість і прискорення поршня в ДВЗ завжди будуть величинами змінними, тому що при конструкції ДВЗ із КШМ неминуче поява точок, в яких швидкість поршня буде дорівнює нулю, і при цьому будуть досягатися максимальні значення прискорень поршня. У момент збільшення прискорення колінчастого валу зростає тиск на поршень і відбувається збільшення обертового моменту. Відповідно до пульсацій обертового моменту, відбувається і зміна швидкості обертання колінчастого валу, що частіше усього прийнято оцінювати нерівномірністю обертання. Зміна обертового моменту і кутової швидкості обертання колінчастого валу для одного циліндра шестициліндрового чотиритактного ДВЗ показані на рис. 4 [7].

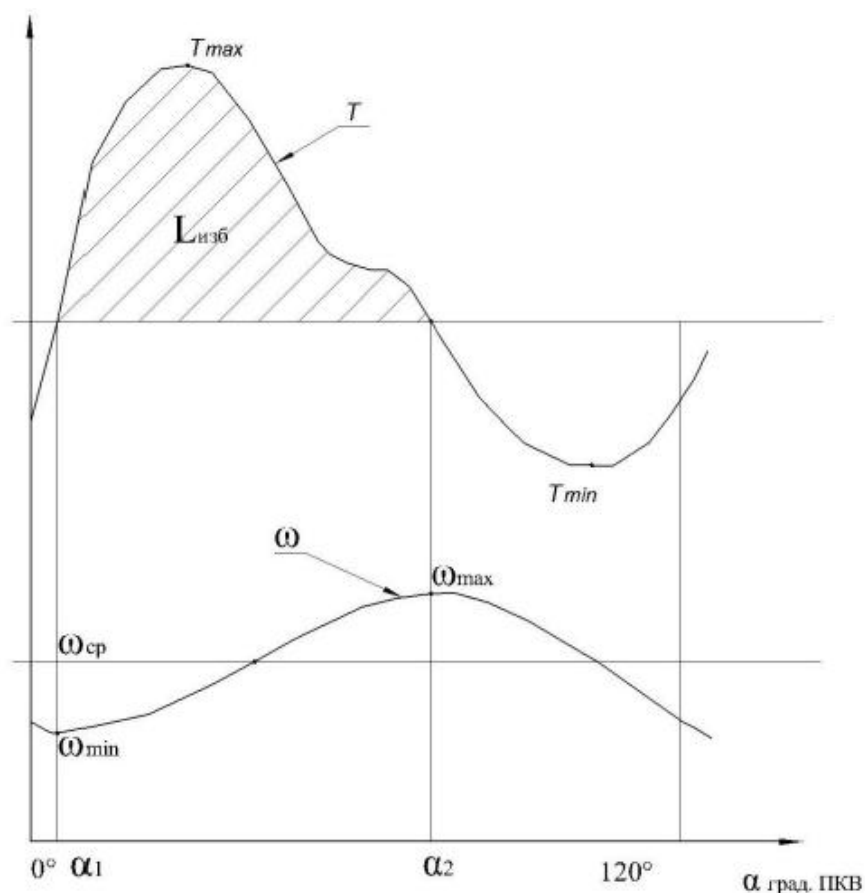


Рисунок 4 – Зміна обертового моменту і кутової швидкості колінчастого валу при сталому режимі роботи ДВЗ

Відповідно до графіка на рис.4 обертальний момент, який створюється одним циліндром, є змінною величиною, з періодом зміни для чотиритактних двигунів два обороти колінчастого вала.

Обертаючі моменти від циліндрів зрушені по фазі відповідно до порядку роботи. При цьому в сталому режимі роботи обертаючий момент, врівноважується моментом сил опору, у випадку його перевищення над моментом від сил опору кутова швидкість буде зростати.

Надлишкову роботу обертального моменту можна визначити за формулою:

$$L_H = J_{IP} \times \frac{\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2}{2}, \quad (11)$$

де  $J_{IP}$  – приведений до колінчастого вала момент інерції рухових мас ДВЗ.

Оцінка ступеня нерівномірності обертання колінчастого вала виконується за формулою:

$$\delta_{об} = \frac{L_H}{J_{IP} \times \omega_{ср}^2}, \quad (12)$$

де  $\omega_{ср}$  – середня кутова швидкість колінчастого вала.

Найбільшою інформативністю володіє обертальний момент, створюваним кожним циліндром, а нерівномірність обертального моменту є причиною нерівномірності кутової швидкості, (рис.5) [8].

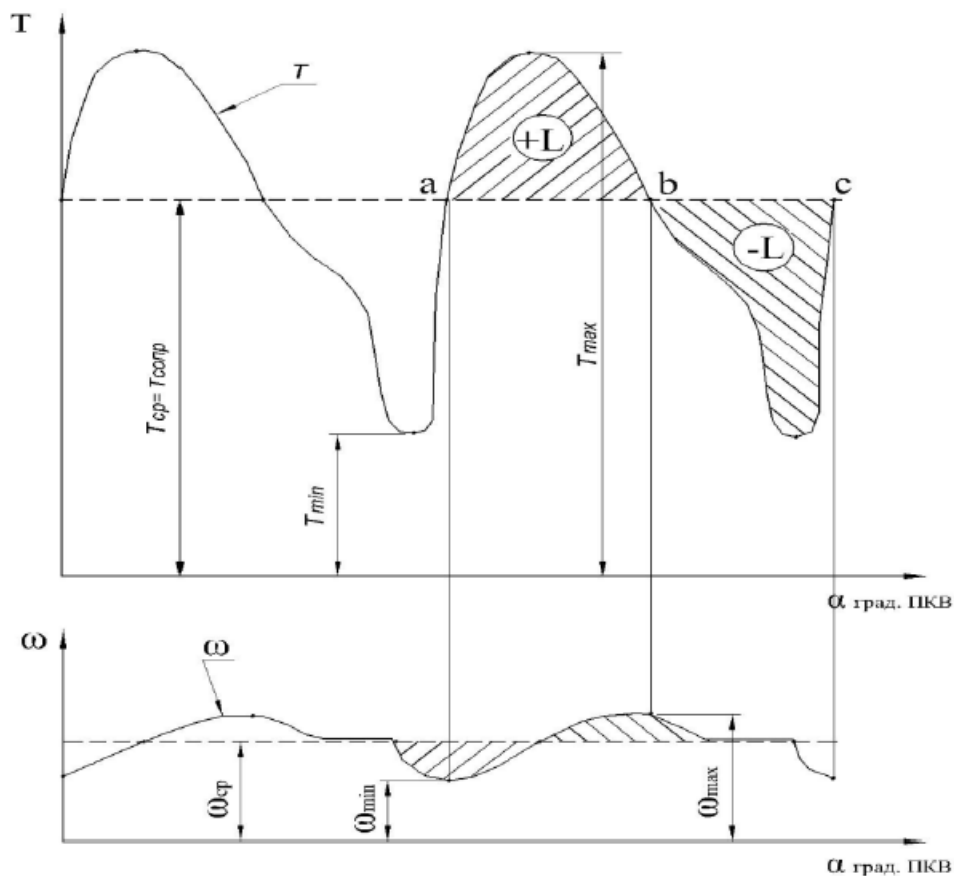


Рисунок 5 – Залежність обертального моменту і кутової швидкості від кута повороту колінчастого вала

---

Величина нерівномірності обертання колінчастого вала характеризує коливання кутової швидкості, що є результатом періодичного зростання та убування оберտального моменту за робочий цикл двигуна. Зменшення ступеня нерівномірності обертання для двигунів з числом циліндрів не більш чотирьох можливо шляхом збільшення моменту інерції маховика. Також величину нерівномірності можна зменшити шляхом збільшення кількості циліндрів. При експлуатації двигунів величина нерівномірності обертання колінчастого вала може збільшуватися через природний знос пар тертя ДВЗ, нерівномірності паливоподачі та ін.

Таким чином, оберտальний момент є діагностичною ознакою, що повною мірою описує технічний стан двигуна, але його важко вимірити. Тому для визначення технічного стану ДВЗ пропонується використовувати кутове прискорення колінчастого вала як оцінний діагностичний показник. Оскільки кутове прискорення колінчастого вала є функцією збільшення кутової швидкості, то характер зміни кутового прискорення може виступити мірою оцінки оберտального моменту двигуна, а виходить, і технічного стану.

**Висновки.** Таким чином, на кутове прискорення колінчастого вала максимально впливають процеси, які відбуваються в камері згоряння, у першу чергу, ефективний тиск газів. У процесі зносу двигуна порушується герметичність камери згоряння, погіршуються умови для горіння палива, збільшуються втрати тиску в підпоршневому просторі, відповідно, знижується кутове прискорення колінчастого вала і оберտальний момент на вихідному валу двигуна. Маючи в розпорядженні величини нерівномірності, можна встановити, що мається несправність, однак нерівномірність частоти обертання не характеризує складову від тиску газів у циліндрі. Параметр – “кутове прискорення колінчастого вала” задовольняє усім вимогам, висунутим до діагностичних ознак, і має невизначений зв’язок. Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що величина кутового прискорення може виступити як діагностичний параметр для декількох структурних параметрів, таких як тиск упорскування, величина компресії ЦПГ. Для оцінки оберտального моменту як показника технічного стану ДВЗ у цілому за допомогою кутового прискорення необхідно розробити пристрій, здатний записувати та обробляти показники швидкозмінюваних процесів, що відбуваються в кожному такті робочого ходу суднового двигуна.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Шароглазов Б.А. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов/ Б.А. Шароглазов, М.Ф. Фарафонов, В.В. Клементьев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2014. – 170 с.
2. Манаков А.Л. Использование внутрицикловых параметров вращения колінчатого вала для оценки технического состояния двигателей внутреннего сгорания / А. Л. Манаков, В.И. Кочергин, А.С. Алехин// Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока.– 2014. – № 3. – С. 178–182.
3. Ядрошніков О. В. Управління технічним станом парків транспортних і технологічних машин на основі діагностування / О. В. Ядрошніков // Прогресивні технології в транспортних системах. Матеріали VII Міжнародної науково–практичної конференції. – 2015. – С. 415–421.
4. Нікітін Є.О. Діагностування дизелів / Є.О. Нікітін [та ін.]; під ред. Є.О. Нікітіна. – К. : Експо–М, 2017. – 209 с.
5. Кочергін В.І. Вибір діагностичних параметрів при безперервному моніторингу технічного стану машин / В. І. Кочергін, О.С. Алехін, А.Л. Манаков.; під ред. В.П. Артем'єва, Є.О. Чуфистова, В.М. Малишева // XI міжнародна науково–практична конференція «Сучасні технології в машинобудуванні: зб. праць наук.–практич. конф.». – 2010. – С. 222–224.
6. Пунда А.С. Численное моделирование рабочих процессов судовых дизелей: учебное пособие / А.С. Пунда. – М. : МорТех, 2015. – 64 с.

7. Разлейцев Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях / Н.Ф. Разлейцев. – Х. : ХНДАУ, 2008. – 169 с.
8. Кирпичников А.Ю. Обеспечение надежности технической эксплуатации машинных парков в транспортном строительстве: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Кирпичников Антон Юрьевич; Сибир. гос. ун–т путей сообщ–я. – Новос., 2013. – 16 с.
9. Понизовский А.Ю. Оценка технического состояния автотракторных дизелей по разности расходов воздуха на впуске и выпуске в пусковом режиме: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Понизовский Алексей Юрьевич; Новосиб. гос. агр. ун–т. – Новосибирск, 2010. – 19 с.
10. Бабошин А.А. Методика диагностирования поршневых двигателей внутреннего сгорания по результатам их косвенного индицирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10/ Бабошин Андрей Александрович; Мурманс. гос. техн. ун–т. – СПб, 2013. – 23 с.
11. Иванов Р.В. Диагностирование ДВС по параметру мощности механических потерь: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / Иванов Роман Валерьевич; Сарат. гос. тех. ун–т. – Волгоград, 2010. – 16 с.
12. Ольшевский С.Н. Комплексный контроль технического состояния ДВС по параметрам переходных режимов: автореф. дис. ... степени канд. техн. наук: 05.20.03 / Ольшевский Сергей Николаевич; Новосиб. гос. агр. ун–т. – Новосибирск, 2005. – 20 с.
13. Пат. 2408000 Российская Федерация, МПК G01M1/10. Метод определения момента инерции двигателя внутреннего сгорания / Егоров А.В., Егоров В.Н., Машкин А.В.; Заявитель и патентообладатель А.В. Егоров, В.Н. Егоров., А.В. Машкин.–№ 2008110456; заявл. 18.03.2008 ; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 36.
14. Пальтов С.А. Контроль рабочих процессов судовых двигателей с использованием электронных систем индицирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.08.05 / Пальтов Сергей Алексеевич; Гос. морс. ак–я им. адм. С.О. Макарова. – СПб., 2010. – 23 с.
15. Калявин В.П. Основи теорії надійності: Підручник / В.П. Калявин. – К. : Елмор, 2018. – 277 с.

## REFERENCES

1. Sharoglazov, B.A. Farafontov, M.F., Klement'ev, V.V. (2014), *"Dvigateli vnutrennego sgoraniya: teoriya, modelirovaniye raschet protsessov"* [Internal combustion engines: theory, modeling and calculation of processes], Chelyabinsk, 170 p.
2. Manakov, A.L., Kochergin, V.I., Alekhin, A.S. (2014), "Ispol'zovanie vnutritsiklovykh parametrov vrashcheniya kolenchatogo vala dlya otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya dvigatelei vnutrennego sgoraniya" [Using in–cycle parameters of crankshaft rotation to assess the technical condition of internal combustion engines], *Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*, pp. 178–182.
3. Yadroshnikov, O. V. (2015), "Upravlinnia tekhnichnym stanom parkiv transportnykh i tekhnolohichnykh mashyn na osnovi diahnostuvannia" [Management of the technical condition of fleets of transport and technological vehicles based on diagnostics], *Advanced technologies in transport systems. Materials of the VII International Scientific and Practical Conference*, pp. 415–421.
4. Nikitin, Ye.O. etc. (2017), *"Diahnostuvannia dyzeliv"* [Diagnosis of diesels], Kyiv, 209 p.
5. Kocherhin, V.I., Alekhin, O.S., Manakov, A.L., Artemiev V.P, Chufystova, Ye.O., Malysheva, V.M. (2010), "Vybir diahnostychnykh parametrov pry bezperernomu monitorynhu tekhnichnoho stanu mashyn" [The choice of diagnostic parameters for continuous monitoring of the technical condition of machines], *XI International Scientific and Practical Conference "Modern Technologies in Mechanical Engineering: comp. works of scientific and practical. conf."*, pp. 222–224.

- 
6. Punda, A.S. (2015), *"Chislennoe modelirovanie rabochikh protsessov sudovykh dizelei: uchebnoep osobie"* [Numerical simulation of marine diesel engine work processes], Moscow, 64 p.
  7. Razleitsev, N.F. (2008), *"Modelirovanie i optimizatsiya protsessas goraniya v dizelyakh"* [Modeling and optimization of the combustion process in diesel engines], Kharkiv, 169 p.
  8. Kirpichnikov, A.Yu. (2013), Ensuring the reliability of the technical operation of machine parks in transport construction, Abstract of Ph.D. dissertation, Road, construction and lifting transport vehicles, Siberian State University of Railway Engineering, Novosibirsk, Russian Federation.
  9. Ponizovsky, A.Yu. (2010), Assessment of the technical condition of automotive diesel engines based on the difference in air flow rates at the inlet and outlet in the starting mode, Abstract of Ph.D. dissertation, Technologies and technical means agricultural services, Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, Russian Federation.
  10. Baboshin, A.A. (2013), A technique for diagnosing piston internal combustion engines based on the results of their indirect indexing, Abstract of Ph.D. dissertation, Road transport operation, Murmansk State Technical University, St. Petersburg, Russian Federation.
  11. Ivanov, R.V. (2010), Diagnosis of internal combustion engines by the parameter of the power of mechanical losses, Abstract of Ph.D. dissertation, Road transport operation, Saratov State Technical University, Volgograd, Russian Federation.
  12. Olshevsky, S.N. (2005), Integrated control of the technical condition of the internal combustion engine according to the parameters of transient conditions, Abstract of Ph.D. dissertation, Agriculture technologists and facilities, Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, Russian Federation.
  13. Russian Federation (2008), 2008110456: Metod opredeleniya momenta inertsii dvigatelya vnutrennego sgoraniya. Patent 2408000 [2008110456: A method for determining the moment of inertia of an internal combustion engine. Patent 2408000], IPC G01M1, Moscow, Russian Federation.
  14. Paltov, S.A. (2010), Monitoring the work processes of marine engines using electronic display systems, Abstract of Ph.D. dissertation, Marine power plants and their elements (main and auxiliary), Admiral S.O. Makarov State Maritime Academy, St. Petersburg, Russian Federation.
  15. Kaliavyn, V.P. (2018), *"Osnovy teorii nadiinosti: Pidruchnyk"* [Fundamentals of Reliability Theory], Kyiv, 277 p.

**Ткаченко В.В., Будолак С.Е., Гуменников Р.В, Батуев Д.Ю.**  
**ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ**  
**ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ**

*В статье приведена классификация средств диагностирования двигателя внутреннего сгорания. Рассмотрены методы, применяемые для оценки технического состояния двигателей в эксплуатационных условиях.*

*Проанализированы основные отказы, которые встречаются при эксплуатации двигателей внутреннего сгорания. Из анализа отказов установлено, что преобладают отказы в результате износа и механические повреждения, отнесенные к цилиндропоршневой группе. Доказано, что следствием подобного вида отказов зачастую является отсутствие воспламенения в одном из цилиндров двигателя, что становится причиной нарушения рабочего цикла и существенной потери мощности в номинальном режиме. Установлено, что мощность является одним из диагностических параметров состояния двигателя, который связан с крутящим моментом и угловой скоростью коленчатого вала, вращение которого обеспечивается работой расширения газов в камере сгорания.*

*Сделан вывод что крутящий момент является диагностическим признаком, который в полной мере описывает техническое состояние двигателя, но его трудно измерить, поэтому для определения технического состояния двигателя внутреннего сгорания*

---

предложено использовать угловое ускорение коленчатого вала в качестве оценочного диагностического показателя. Поскольку угловое ускорение коленчатого вала является функцией увеличения угловой скорости, то характер изменения углового ускорения может выступить мерой оценки крутящего момента двигателя, а значит, и технического состояния.

Теоретически обосновано и подтверждено применение величины углового ускорения в качестве диагностического показателя для безразборной, безнагрузочной оценки технического состояния двигателя внутреннего сгорания в эксплуатационных условиях. Результатом определения технического состояния судового двигателя являются графики зависимости величины углового ускорения от угла поворота коленчатого вала всех цилиндров двигателя, позволяющие с помощью экспресс-оценки значений экстремумов углового ускорения, средней линии углового ускорения определить наличие неисправного цилиндра и всего двигателя в целом.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, крутящий момент, поршневая группа, эксплуатационные условия, угловое ускорение, техническое состояние.

**Tkachenko V., Budolak S., Gumennikov R., Batuev D.**

### **EVALUATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF A SHIPBOARD INTERNAL COMBUSTION ENGINE IN OPERATING CONDITIONS**

*The article provides a classification of means for diagnosing an internal combustion engine. The methods used to assess the technical condition of engines in operating conditions are considered.*

*The main failures that occur during the operation of internal combustion engines are analyzed. From the analysis of failures, it was found that failure due to wear and mechanical damage attributable to the cylinder–piston group prevail. It is proved that the consequence of this type of failure is often the absence of ignition in one of the engine cylinders, which causes a disruption of the duty cycle and a significant loss of power in the nominal mode. It is established that power is one of the diagnostic parameters of the state of the engine, which is associated with the torque and angular velocity of the crankshaft, the rotation of which is ensured by the work of expanding the gases in the combustion chamber.*

*It is concluded that the torque is a diagnostic sign that fully describes the technical condition of the engine, but it is difficult to measure, therefore, it is proposed to use the angular acceleration of the crankshaft as an estimated diagnostic indicator to determine the technical condition of the internal combustion engine. Since the angular acceleration of the crankshaft is a function of increasing the angular velocity, the nature of the change in angular acceleration can be a measure of the torque of the engine, and therefore the technical condition.*

*The use of angular acceleration as a diagnostic indicator for a collapsible, without a load assessment of the technical condition of an internal combustion engine under operating conditions is theoretically justified and confirmed. The result of determining the technical condition of a marine engine is a graph of the dependence of the magnitude of the angular acceleration on the angle of rotation of the crankshaft of all engine cylinders, allowing using the express evaluation of the extrema of the angular acceleration, the midline of the angular acceleration to determine the presence of a faulty cylinder and the entire engine as a whole.*

**Keywords:** internal combustion engine, torque, piston group, operating conditions, angular acceleration, technical condition.