ВДОСКОНАЛЕННЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ МАЩЕННЯ СУДНОВИХ ВИСОКООБЕРТОВИХ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

[1]Савчук В.П., [1]Курносенко Д.В., [2]Тулученко Г.Я., [1]Котов А.І.
[1]Херсонська державна морська академія, Україна
[2]Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна

Вступ. Суднові високообертові двигуни (ВОД) мають широке застосування в складі головних та допоміжних енергетичних установок сучасних суден. Виробниками таких двигунів є фірми Yanmar, Wärtsilä, Volvo Penta, Caterpillar, Mitsubishi Heavy Industries Engine & Turbocharger, Cummins, Scania та багато інших. Зображення суднового ВОД Yanmar 12AYM-WGT представлено на рис. 1. Загальною властивістю систем мащення таких двигунів є «мокрий» картер та привід шестеренного масляного насосу від колінчастого валу двигуна.

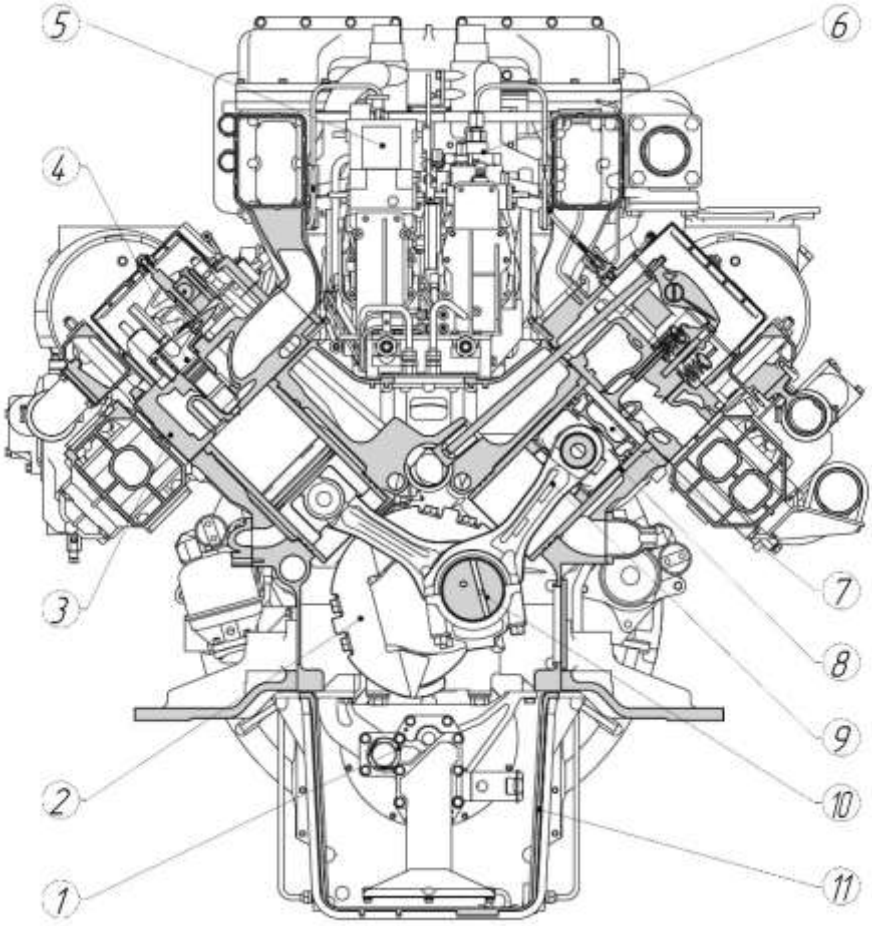

Рисунок 1 – Високообертовий двигун Yanmar 12AYM-WGT: 1 – насос масляний; 2 – противага колінчастого валу; 3 – кришка циліндра; 4 – паливна форсунка; 5 – регулятор гідравлічний; 6 – ПНВТ; 7 – поршень; 8 – циліндрова втулка; 9 – шатун; 10 – вал колінчастий; 11 – піддон масляний

Сучасний розвиток технологій надає можливості інтегрування систем безперервного моніторингу в суднові двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) з метою визначення відхилень робочих параметрів двигуна та на ранніх етапах попередження появи відмов. Також використання таких систем моніторингу надає можливості запровадження виконання технічного обслуговування за фактичним станом, що виключає перевитрату як матеріальних так і людських ресурсів без зниження експлуатаційної надійності СДВЗ.

Умови експлуатації таких двигунів, на відміну від малообертових (МОД) та середньообертових (СОД), є більш різноманітними, що пов'язано із їх широким застосуванням на різних типах суден та в якості головних, допоміжних двигунів та у складі аварійних дизель-генераторів. Цей факт вказує на те, що характер зміни технічного стану деталей, наприклад головних двигунів (ГД) однієї моделі, що працюють на різних типах суден та, й відповідно, в інших умовах експлуатації, сильно відрізняється та потребує окремого підходу до проведення як профілактичних, так і ремонтних заходів. Дещо подібний підхід до експлуатації ДВЗ можна побачити для автомобільного транспорту, де строки проведення регламентних робіт, в залежності від умов експлуатації транспортного засобу, можуть відрізнятися більше, ніж в 2 рази, а обладнання електронними системами діагностування технічного стану двигунів забезпечує високий рівень їх безвідмовності.

Деталі кривошипно-шатунного механізму (КШМ) всіх без виключення ДВЗ впливають на їх безвідмовність вцілому. Вартість відновлення КШМ є зазвичай високою, а пошкодження його деталей у двигуна, що виконує функції головного, може призвести до втрати ходу судна. Тому запровадження штатних систем діагностування та моніторингу технічного стану деталей КШМ є перспективним напрямком підвищення експлуатаційної надійності ВОД, зменшення експлуатаційних витрат та, відповідно, підвищення ефективності експлуатації судна вцілому.

Одним із можливих напрямків підвищення експлуатаційної надійності КШМ суднових ВОД є вдосконалення систем моніторингу за станом елементів систем мащення. Результати теоретичних та експериментальних досліджень вказують на існування взаємного зв'язку між технічним станом елементів систем мащення і підшипникових вузлів, що змащуються під тиском, та характером пульсацій моторного масла.

Основна частина. При дослідженні доцільно розділити системи мащення ВОД на функціональні контури: подачі та очищення (і охолодження) моторного масла та розподілу моторного масла. Перший контур в класичних системах мащення ВОД складається з маслоприймача, масляного насоса шестеренного типу, що приводиться в дію від колінчастого валу, масляного фільтра, водомасляного теплообмінника, перепускного та запобіжного клапанів.

Працездатність контуру подачі та очищення (і охолодження) моторного масла залежить від ступеня забруднення сітки маслоприймача, ступеня зносу масляного насоса, налаштування запобіжного клапана та його технічного стану, характеристик масляного фільтра, які залежать від його заводських налаштувань, характеристик фільтрувального елемента та ступеня забруднення. Також необхідно враховувати температуру та властивості моторного масла. Тому, при складанні структурних схем контурів систем мащення, необхідно володіти такими даними як

- в'язкісно-температурна характеристика (ВТХ) моторного масла;
- характеристики масляного насоса;
- конструктивні та гідравлічні параметри масляного фільтра;
- характеристики запобіжного клапана;
- геометрія масляних каналів.

Дослідження гідравлічних характеристик елементів контуру подачі та очищення моторного масла здійснені на прикладі стаціонарного ВОД Д246.4, що входить до складу дизель-генераторної установки. Для моделювання масляної системи ВОД Д246.4використовувався програмний комплекс GT-ISE. При виконанні дослідження було задано характеристики масляного насоса, масляного фільтра, запобіжного клапана та геометрії масляних каналів. Характеристики масляного фільтра, масляного насосу та запобіжного клапану було визначено за допомогою власних стендових випробувань.

При моделюванні характеристик *масляного насоса* використовується об'єкт *Pump-ExternalGear*, призначенням якого є визначення миттєвих пульсацій продуктивності шестеренного насоса зовнішнього зачеплення. Пульсація ідеального потоку розраховується на основі геометрії насоса та частоти обертання. Основні параметри зубчастого зачеплення масляного насоса двигуна Д246.4 приведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні параметри зубчастого зачеплення масляного насоса 240-1400010-Б-01

Параметр	Значення
Передаточне відношення i	1
Модуль m, мм	3,0
Міжцентрова відстань a_w, мм	35,75
Кут зачеплення α_w, град	29,84
Коефіцієнт перекриття ε	1,23
Кількість зубів шестерні/колеса z_1/z_2	11/11
Середній діаметр d, мм	33,0
Основний діаметр кола d_b, мм	31,01
Ширина зуба b, мм	28,0

Масляний фільтр розділено на 3 об'єми, які в GT-SUITE розглядаються як окремі частини гідравлічного потоку: вхідний, зовнішній та внутрішній об'єми. В роботі застосовано характеристики масляного фільтру М-019 виробництва компанії Промбізнес (Україна). Геометричні параметри масляного фільтра М-019 представлено в табл. 2.

Таблиця 2 – Геометричні параметри масляного фільтра М-019

Параметр	Значення
Діаметр/висота фільтра, мм	98/128
Зовнішній об'єм, см^3	244
Внутрішній об'єм, см^3	879
Вхідний об'єм, см^3	20
Кількість вхідних отворів	8
Діаметр вхідних отворів, мм	7

Більш складним при моделюванні є визначення характеристик *запобіжного клапана*. Найбільш розповсюдженими типами запобіжних клапанів в системах мащення тронкових ДВЗ є поршневі клапани. Моделювання їх дії в гідравлічних та пневматичних системах здійснюється шляхом представлення властивостей об'єктами, що визначають:

– характеристику циліндричних пружин стискування, які діють на поршень;

– масу та властивості контакту поршня та посадкової поверхні клапана;

– геометричні властивості напірного та дренажного отворів клапана.

Для представлення властивостей різноманітних клапанів в GT існує бібліотека шаблонів елементів пневматичних та гідравлічних систем. Запобіжний клапан в системі мащення двигунів Д245 (та їх модифікацій) виготовлено в корпусі масляного фільтра. В системі клапан встановлено безпосередньо після масляного насоса, що забезпечує можливість перепускати частину масла до масляного картера двигуна. Таким чином, на номінальному режимі навантаження на прогрітому двигунові підтримується нормоване значення тиску в головній масляній магістралі (0,25…0,35 МПа). Конструктивно клапан складається із безпосередньо запірного елемента – поршня, що перекриває зливний канал, циліндричної пружини стиснення, що забезпечує необхідне зусилля відкриття клапана та регулювального гвинта, яким здійснюється налаштування нормативного значення тиску в головній масляній магістралі. При моделюванні властивостей пружного елемента (циліндричної пружини), що контролює переміщення поршня клапана, зазвичай застосовується шаблон ***FluidPistonAndSpring***. Цей об'єкт використовується для моделювання взаємодії між гідравлічним потоком і механічною системою. Конкретно цей шаблон моделює наступне:

– зусилля на приєднану масу внаслідок дії тиску в камері;

– зміну об'єму камери внаслідок витіснення маси;

– силу пружини.

Робоча діаграма та загальний вигляд пружини клапана приведено на рис. 3.

Всі результати комп'ютерного моделювання представлені за один повний цикл роботи масляного насоса при температурі моторного масла 100 °С.

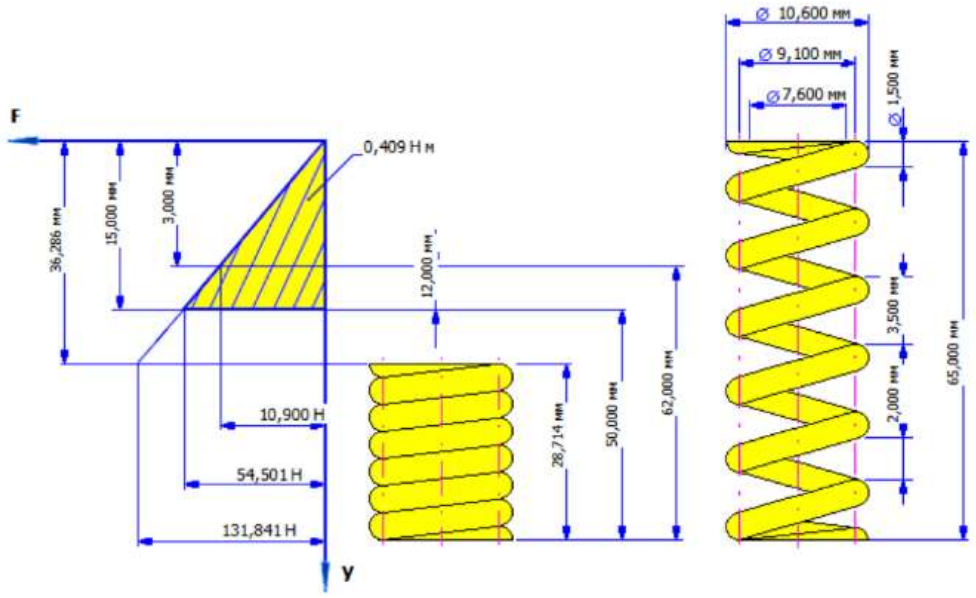

Рисунок 3 – Робоча діаграма пружини запобіжного клапана

Частотний аналіз результатів моделювання тиску перед масляним фільтром (об'єкт *FilterInlet*) вказує на те (рис. 4), що максимальна амплітуда тиску відповідає порядку гармоніки, що становить подвійну кількість зубів шестерні масляного насоса (22-й порядок).

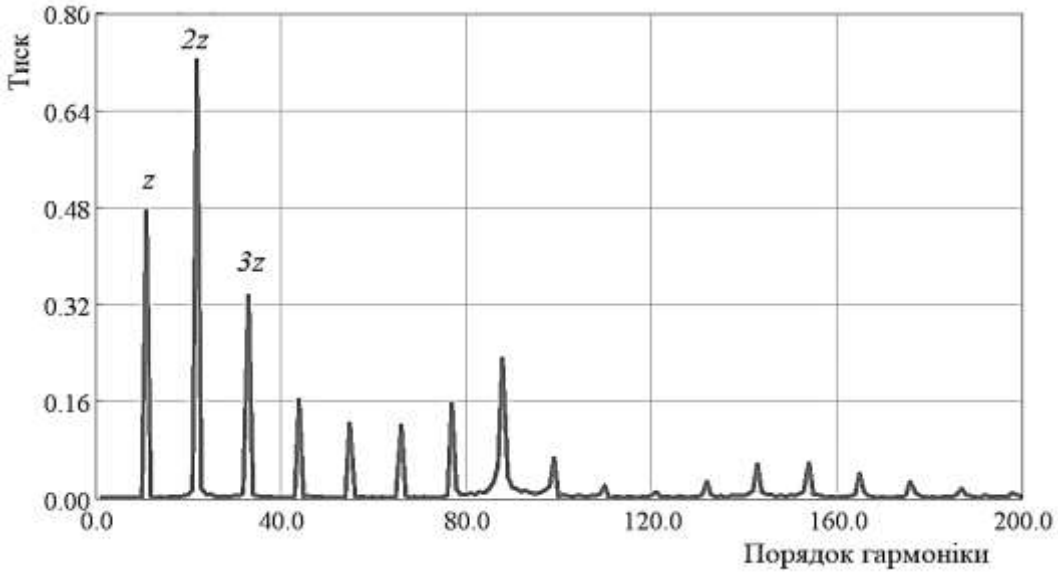

Рисунок 4 – Частотний аналіз пульсацій тиску в системі (об'єкт *FilterInlet*)

Результати дослідження витрати моторного масла через різні елементи контуру вказують на те, що, найбільша амплітуда досліджуваного показника має місце для на виході з масляного насоса, таким чином доцільним місцем встановлення діагностичних датчиків тиску, метою яких є визначення технічного стану масляного насоса та запобіжного клапана, є гідравлічна лінія перед масляним фільтром. При віддаленні від масляного насоса, амплітуда витрати та й, відповідно, амплітуда пульсацій тиску зменшуються та можуть стати неінформативним показником при діагностуванні даного масляного контуру.

У випадку заклинювання золотника запобіжного клапана, спектр пульсацій тиску на ділянці трубопроводу на виході з масляного насосу вказує на відсутність певної стабільної гармоніки для застосування при діагностуванні цієї відмови системи мащення (рис. 5).

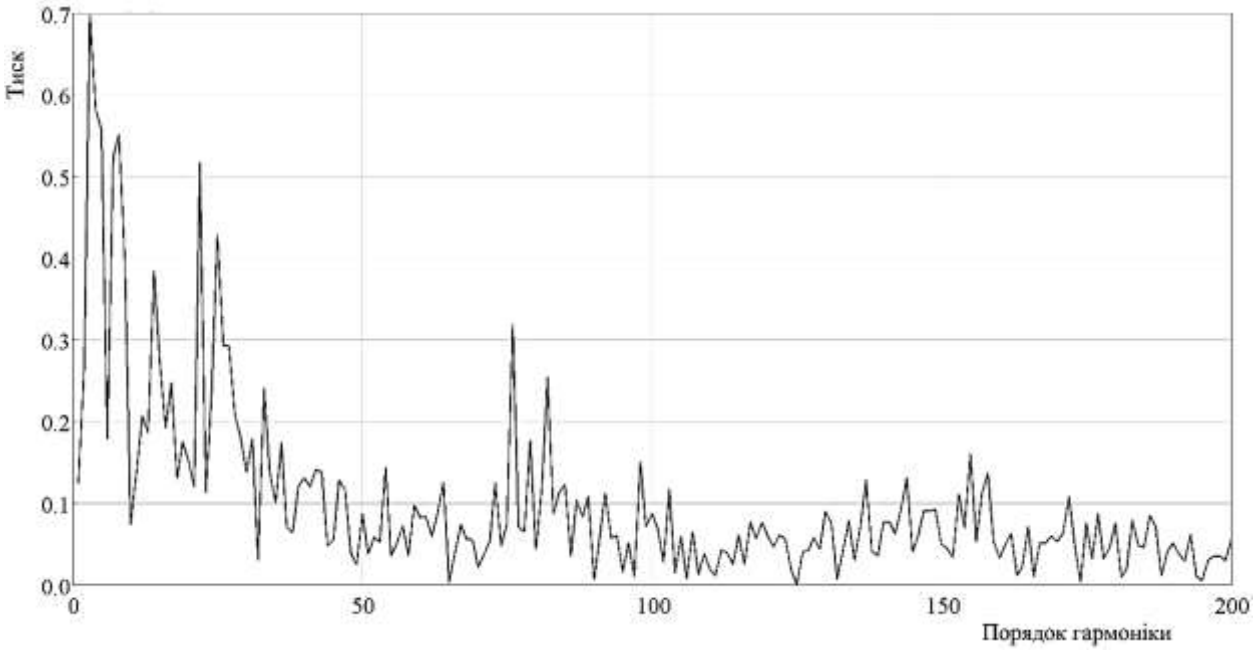

Рисунок 5 – Частотний аналіз пульсацій тиску в системі (об’єкт *FilterInlet*) для випадку заклинювання золотника запобіжного клапана у відкритому положенні

Висновки та перспективи подальших досліджень. Дослідження пульсацій тиску та зміни продуктивності в об’єктах контуру подачі та очищення моторного масла на прикладі дизельного двигуна Д246.4 дозволяє зробити наступні висновки:

- частотний аналіз пульсацій тиску є найбільш дієвим методом непрямого діагностування несправностей та відмов елементів системи мащення;
- для визначення працездатності масляного насоса та запобіжного клапана золотникового типу доцільно здійснювати безперервний моніторинг пульсацій тиску, що відповідають гармонікам порядку подвоєного числа кількості зубів масляного насоса;
- найбільш доцільним місцем встановлення датчика тиску є гідравлічна лінія між масляним насосом та фільтром.

З метою визначення зміни працездатності підшипників ковзання КШМ ВОД подальші дослідження необхідно проводити із урахуванням геометричних особливостей масляних каналів та відповідно підшипникових вузлів. Дослідження пульсацій моторного масла необхідно провести із урахуванням впливу забруднень маслоприймача, масляного фільтра, зносу підшипникових вузлів з метою виявлення їх впливу на параметри спектра.

ЛІТЕРАТУРА

1. Савчук, В. П., Кухаренок, Г. М., Курносенко, Д. В., Котов, А. І. (2020), 'Дослідження впливу конструктивних та експлуатаційних факторів системи мащення високообертових суднових двигунів внутрішнього згоряння на характер пульсацій тиску масла'. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування: Міжнар. наук.-практ. конференція. Херсон 08-10 вересня 2020 р. Херсон, 2020, с. 208-211.

2. Soltani, R., Ghorbanian, J. (2010), 'A New Approach to Flow Network Analysis of an Engine Lubrication System'. The Journal of Engine Research, 18, pp. 12-19.

3. Seth, B., Field, N. (1984), 'Oil Pressure Signatures for Engine Lubrication System Monitoring'. SAE Technical Paper, Letter 840063, pp. 364-371. https://doi.org/10.4271/840063.

6. Gritsenko, A. V., Zadorozhnaya, E. A., Shepelev, V. D. (2018), 'Diagnostics of Friction Bearings by Oil Pressure Parameters During Cycle-By-Cycle Loading'. Tribology in Industry, 2, pp. 300-310. doi: 10.24874/ti.2018.40.02.13.

7. Dhar, Sujan, et al. (2022), 'Transient, Three Dimensional CFD Model of the Complete Engine Lubrication System'. SAE International Journal of Engines, vol. 9, issue 3, pp. 54-62.

9. Курносенко, Д. В., Савчук, В. П., Білоусов, Є. В., Дзигар, А. К., Котов, А. І. (2021), 'Стенд для дослідження параметрів елементів систем мащення високообертових двигунів внутрішнього згоряння'. Двигуни внутрішнього згоряння,. № 2, с. 73-79.

10. Manring, N. D., Kasaragadda, S. B. (2003), 'The Theoretical Flow Ripple of an External Gear Pump', Transactions of the ASME, pp. 396-404.

11. Курносенко, Д. В., Савчук, В. П., Білоусов, Є. В. (2021), 'Дослідження впливу характеристик масляних фільтрів типу «spin-on» на робочі параметри масляної системи'. Розвиток транспорту, № 4(11), с. 52-64. https://doi.org/10.33082/td.2021.4-11.05

12. Курносенко, Д. В., Савчук, В. П., Акімов, О. В., Котов, А .І. 'Призначення параметрів повнопоточних масляних фільтрів типу «spin-on» при комп'ютерному моделюванні систем мащення двигунів внутрішнього згоряння'. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування: Міжнар. наук,-практ. конф., 06-08 вересня 2021 р. Херсон, 2021,с. 266-269.