

Рибальченко М.Є., Білоусов Є.В.

ВИКОРИСТАННЯ ЧИСЛОВИХ ПРОФІЛІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СУДНОВОГО МАЛООБЕРТОВОГО ДВИГУНА В УМОВАХ СУЧАСНОЇ ТЕНДЕНЦІЇ ЩОДО ЗНИЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ШВИДКОСТІ СУДЕН

Під час експлуатації головних суднових малооберткових двигунів, згідно вимог нормативної документації, є необхідність регулярно перевіряти та оцінювати велику кількість параметрів робочого процесу. Такі вимоги необхідні для того, щоб стежити за змінами в умовах протікання основних процесів на окремих етапах здійснення робочого циклу двигуна, що надає змогу виявити будь-які порушення в його роботі пов'язані зі зміною технічного стану його окремих елементів, та двигуна в цілому. Це дозволяє вживати необхідних експлуатаційних заходів на ранній стадії виникнення проблем, щоб запобігти їх подальшого розвитку. Такий підхід також дозволяє забезпечити оптимальне використання двигуна та загальну економічність установки в цілому, що дуже важливо при сучасній тенденції щодо подорожчання палива, та посилення екологічних вимог. Однак, щоб оцінити зміни в параметрах робочого процесу потрібно порівняти результати планового індиціювання з попередніми даними та з результатами, отриманими під час стендових випробувань двигуна, або еталонними діаграмами та параметрами, отриманими розрахунковим шляхом. Сучасні тенденції до зниження експлуатаційної швидкості суден, пов'язані з намаганням судновласників зменшити витрати на паливну складову, унеможливають проведення індиціювання та діагностики двигунів на номінальних режимах. Як наслідок, виникає потреба в визначенні параметрів робочого процесу на режимах часткових навантажень які суттєво відрізняються від номінальних. Для вирішення цієї проблеми, авторами було запропоновано методуку, яка дозволяє отримувати аналітичним шляхом еталонні індикаторні діаграми для будь якого режиму роботи двигуна, базуючись на результатах його стендових випробувань. Аналіз таких діаграм дозволяє розширити перелік параметрів, що характеризують перебіг робочого процесу та виявити закономірності змін цих параметрів. Визначенню розширеного переліку параметрів робочого процесу у всьому діапазоні робочих режимів суднового малооберткового двигуна оснований на аналізі розрахункових індикаторних діаграм присвячено дослідження, результати якого викладено в даній статті.

Ключові слова: судновий малообертковий двигун, індиціювання, індикаторна діаграма, параметри робочого процесу, режим роботи.

Постанова проблеми. Ефективність експлуатації суднових головних малооберткових двигунів суттєво залежить від правильності вибору режимів їх роботи з урахуванням поточного технічного стану. Як правило двигунобудівні компанії надають дуже обмежений набір параметрів, що характеризують нормальний перебіг робочого процесу у обмеженому діапазоні робочих режимів, і ще менший набір параметрів, які характеризують зміни у перебігу робочого процесу пов'язані зі зміною технічного стану двигуна. Найбільш поширеним методом представлення таких параметрів є графічні залежності для діапазону від 50% до 100% від максимальної експлуатаційної потужності (Maximum continuous rating – MCR) (рис. 1) [1].

У той же час, основним методом контролю технічного стану суднових двигунів є саме контроль параметрів робочого процесу, який здійснюється шляхом індиціювання, що

виконується відповідно до правил з технічної експлуатації та ремонту [2]. Саме цими правилами встановлені періодичність та режими на яких повинно здійснюватися індиціювання і, в більшості випадків, ці режими є наближеними до MCR. У реальній експлуатації в багатьох випадках двигуни працюють поза межами зазначеного діапазону робочих режимів, що пояснюється тенденціями щодо зменшення комерційної швидкості багатьох типів суден з метою скорочення витрат на паливну складову [3]. Жорсткий графік руху, призводить до того, що здійснювати індиціювання можливо тільки на режимі строго лімітованому судновласником.[4].

Якщо під час експлуатації виникає потреба в оцінюванні параметрів робочого процесу, що лежать поза межами цієї області, постає проблема пов'язана з отриманням еталонних даних для порівняння з результатами вимірювань одержаних під час планового обстеження та індиціювання. Найчастіше, у цьому випадку, згідно рекомендацій виробника двигунів.[5], судновий персонал в якості бази для порівняння використовує данні попередніх вимірювань, що не є коректним, оскільки дійсний стан двигуна на момент попереднього вимірювання не є визначеним.

Основні результати дослідження. Для вирішення проблеми визначення параметрів робочого процесу на режимах поза межами специфікаційних діапазонів, авторами була розроблена методологія побудови цифрових профілів робочих процесів за результатами стендових випробувань заводу-виробника, які поставляються разом з двигуном у комплекті технічної документації. Саме ці результати характеризують початковий стан двигуна та найбільш коректно можуть бути використані для визначення щодо змін у його технічному стані під час експлуатації.

Але застосування аналітично отриманих індикаторних діаграм не вичерпується тільки їх використанням в якості бази для порівняння з індикаторними діаграмами отриманими вже під час експлуатації двигуна в складі енергетичної установки судна. Процедура порівняльного аналізу індикаторних діаграм досить складна і потребує відповідних навичок від персоналу машинної команди, який зазвичай не вдається сформувати під час їх підготовки. Однак розширений аналіз цифрового профілю дозволяє отримати окремі залежності зміни параметрів робочого процесу як функції навантаження двигуна, які значно простіше пов'язати зі змінами його технічного стану.

Performance Curves

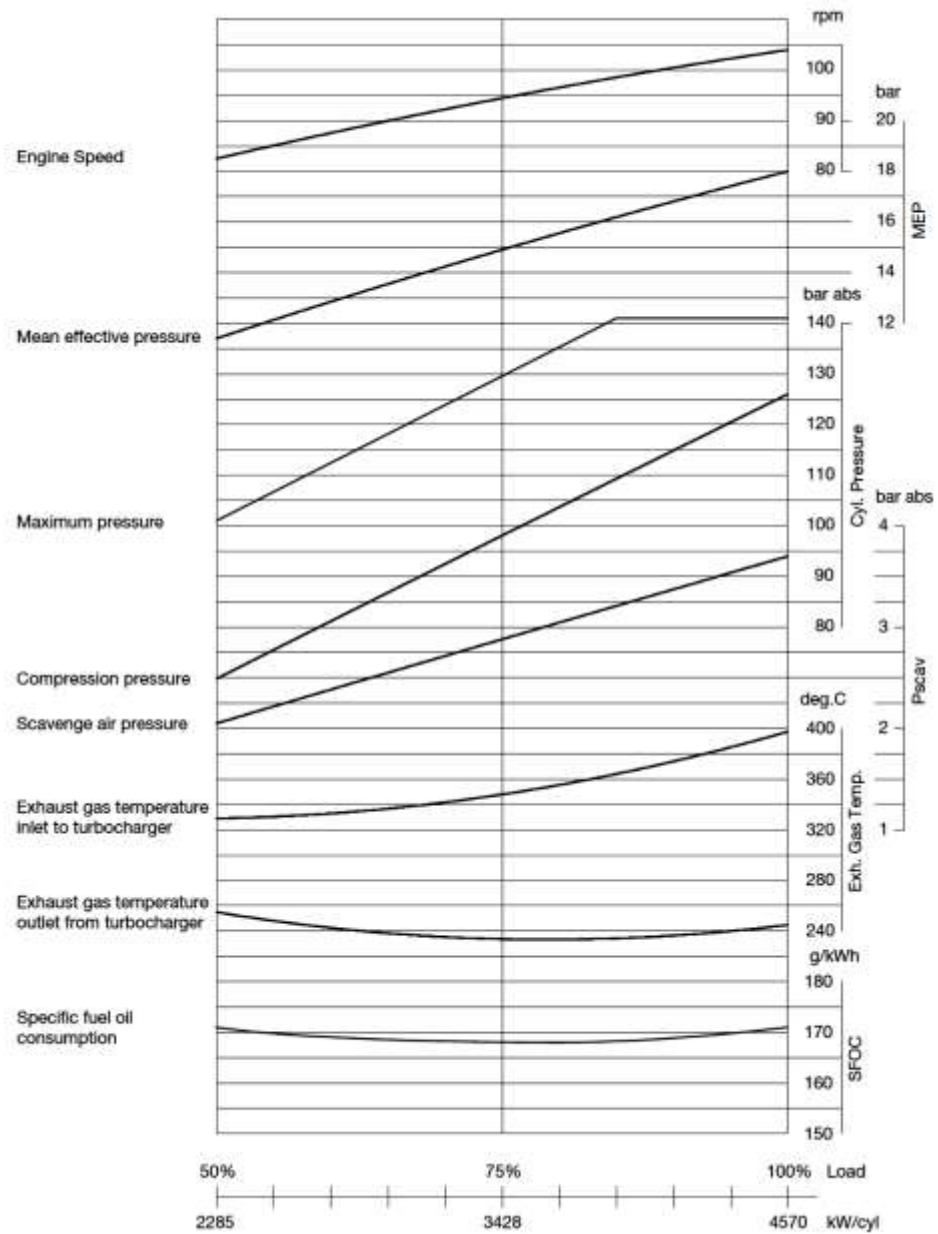


Рисунок 1 – Приклад графічного подання основних характеристик головного малооборотного двигуна MAN V&W K90MC-C6, як функція його навантаження [1]

Для формування такого набору параметрів з цифрового профілю виділяються окремі діаграми, що відповідають різним режимам роботи двигуна з заданим кроком. На рис. 2 представлено набір таких діаграм у $r\phi$ -координатах які виокремленні з цифрового профілю з кроком навантаження 10% для діапазону 20...100% від MCR.

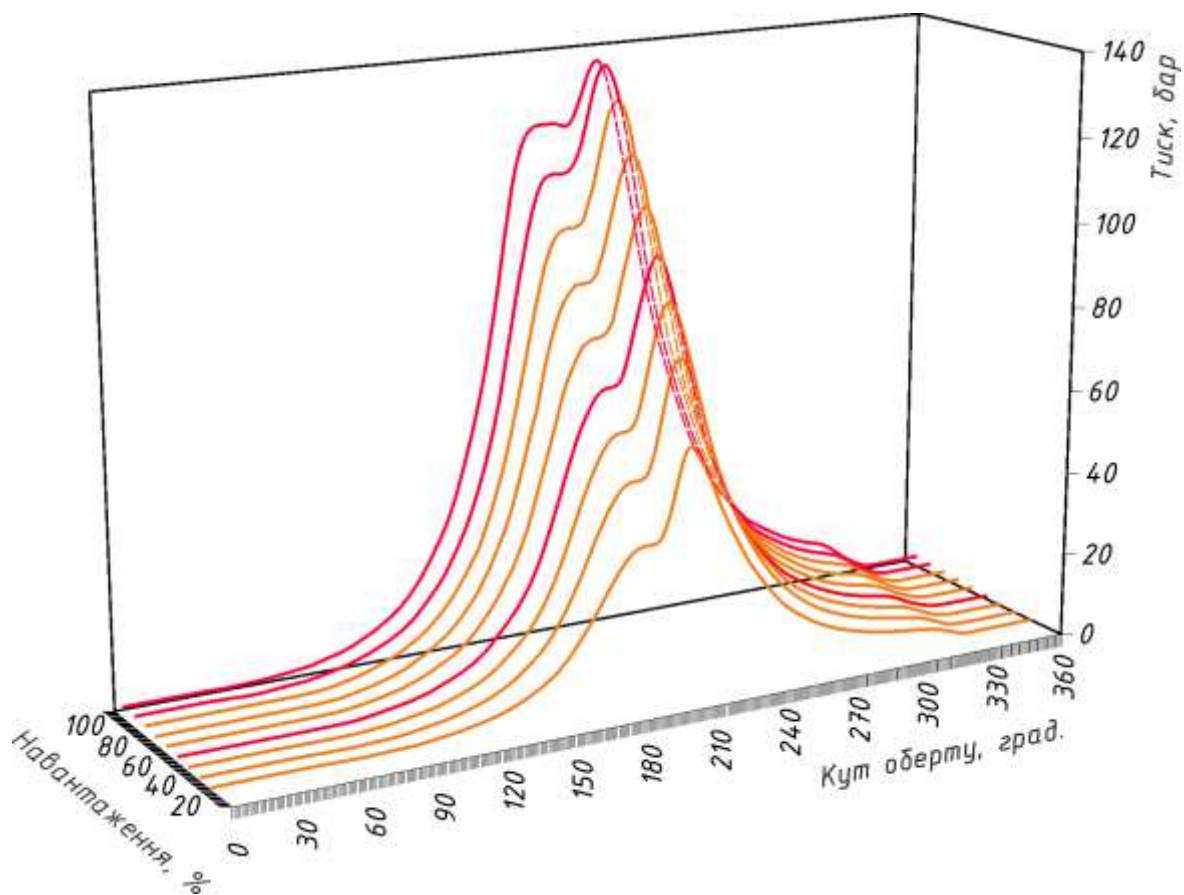


Рисунок 2 – Набір діаграм у $r\phi$ -координатах виокремлення з цифрового профілю з кроком навантаження 10% для діапазону 20...100% від MCR (базові криві зображені червоним кольором, а криві отримані аналітичним шляхом відповідно помаранчевим [4])

Для розширеного аналізу виокремлених індикаторних діаграм використовується розроблений авторами розрахунковий комплекс [6], який дозволяє визначити ряд параметрів робочого процесу як тих, що входять до основної номенклатури (рис. 1), так і інших параметрів, які можна використовувати у якості діагностичних для оцінки технічного стану двигуна, для всього діапазону його робочих режимів.

Як вхідні дані, окрім еталонних індикаторних діаграм, до розрахункового комплексу вводяться геометричні параметри двигуна. Приклад цих параметрів для двигуна MAN B&W 8K90MC-C наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Геометричні параметри головного малообертового двигуна MAN B&W 8K90MC-C № DML1-2046, побудованого фірмою Doosan Engine Co., LTD у 2008 році [7]

Параметр	Знач.	Параметр	Знач.
Діаметр циліндра, м	0,9	Кут закриття вікон, ° після НМТ	31
Хід поршня, м	2,3	Кут початку стиснення, ° після НМТ	65

Кількість циліндрів, од	8	Ступінь стиснення дійсна	12,12
Довжина шатуна, м	3,5	Втрата ходу на газообмін	0,356
Постійна КШМ (λ)	0,329	Втрата об'єму на газообмін, м ³	0,521
Висота продувних вікон, м	0,21	Робочий об'єм, м ³	1,463
Площа поршня, м ²	0,636	Об'єм камери згоряння, м ³	0,131
Кут відкриття вікон, ° після НМТ	31	Кут початку випуску, ° до НМТ	48

Окрім геометричних параметрів, для розрахунку показників робочого процесу необхідно визначити ряд залежностей, які можуть бути отримані шляхом побудови трендів за результатами стендових випробувань двигуна. Основним джерелом цієї інформації є протоколи випробувань двигуна MAN V&W 8K90MC-C [7]. Результат обробки даних випробувань наведено на рис. 3.

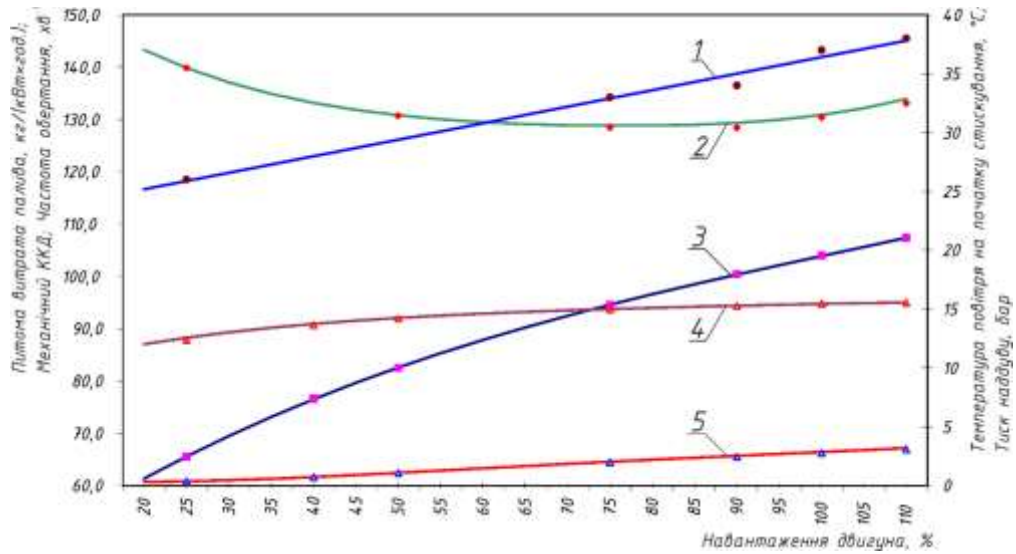


Рисунок 3 – Визначення вхідних розрахункових параметрів двигуна за результатами стендових випробувань в розширеному діапазоні робочих режимів (двигун MAN V&W 8K90MC-C6, табл. 1). Маркерами позначено дані отримані експериментально на стенді, кривими – лінії тренду: 1 – температура повітря на початку стискування; 2 – питоме витрата палива; 3 – частота обертання; 4 – механічний ККД; 5 – тиск наддуву

Для більш коректного аналізу характеристик зміни параметрів робочого процесу у всьому діапазоні робочих режимів в подальших розрахунках було використано крок за навантаженням у 5 % від MCR. В інших випадках крок можна адаптувати до вимог замовника.

За результатами обчислень для двигуна взятого у якості прикладу було отримано розширену номенклатуру параметрів робочих процесів які зведено до табл. 2.

Навантаження	Навантаження	
	100	110
103,9	105,6	107,4
94,73	94,86	95
36,4	37,11	37,81
2,840	3,000	3,181
177,8	179,6	182,0
4,322	4,492	4,685
4,439	4,75	5,373
8,086	7,95	7,429
3,133	3,066	2,815
12,37	12,87	13,37
1034	1027	923
2031	2133	2229
0,12	0,125	0,13
2,5	2,5	2,5
13,72	13,78	13,89
20,5	20,5	19,5
0,185	0,191	0,192
1665	1633	1438
32,65	33,87	34
34,5	35,5	36
3881	3873	3041
4590	4766	4944
48	49	49,5
47,5	47,5	46,5
0,968	1,008	1,043
765,0	744,0	692,1
4432	4634	4860
35460	37075	38883
1,75	1,8	1,856
2560	2633	2715
0,502	0,496	0,491
0,476	0,471	0,466

Параметр	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
Частота обертання, хв ⁻¹	61,3	65,5	69,5	73,1	76,5	79,6	82,5	85,5	87,8	90,2	92,4	94,6	96,6	98,5	100,4	102,1
Механічний ККД двигуна	87	88,25	89,29	90,17	90,91	91,52	92,05	92,49	92,86	93,19	93,48	93,73	93,97	94,18	94,38	94,56
Температура повітря на вході, °С	25,2	25,9	26,6	27,3	28,0	28,7	29,4	30,1	30,8	31,5	32,2	32,9	33,6	34,3	35	35,7
Тиск наддуву, бар	0,300	0,350	0,440	0,566	0,718	0,889	1,073	1,263	1,455	1,646	1,832	2,013	2,188	2,356	2,520	2,680
Питома витрата палива, кг/(кВт×год)	194,7	190,0	186,3	183,3	180,9	179,1	177,7	176,7	175,9	175,4	175,1	175,1	175,0	175,2	175,7	176,5
Щільність повітря на вході, кг/м ³	1,518	1,573	1,674	1,816	1,988	2,181	2,387	2,6	2,814	3,026	3,232	3,43	3,621	3,803	3,98	4,151
Маса заряду циліндра, кг	1,558	1,616	1,719	1,865	2,042	2,239	2,45	2,671	2,89	3,108	3,32	3,523	3,719	3,906	4,088	4,264
Питома витрата повітря кг/(кВт×год)	9,622	10,61	10,88	10,67	10,25	9,71	9,289	8,926	8,644	8,404	8,295	8,204	8,265	8,168	8,146	8,11
Коефіцієнт надлишку повітря	3,403	3,851	4,035	4,02	3,904	3,741	3,599	3,478	3,387	3,312	3,269	3,233	3,227	3,219	3,192	3,185
Тиск у ВМТ, МПа	3,64	4,36	4,97	5,49	5,96	6,40	6,86	7,35	7,88	8,43	9,01	9,59	10,18	10,77	11,33	11,86
Температура в кінці стиснення, T _c , °С	1067	1222	1284	1280	1241	1181	1136	1111	1088	1073	1064	1058	1055	1052	1047	1040
Робота стиснення, кДж	508	618	718	810	899	987	1078	1174	1275	1377	1477	1574	1621	1712	1810	1920
Циклова подача, кг	0,046	0,054	0,06	0,065	0,069	0,072	0,076	0,08	0,084	0,089	0,094	0,098	0,104	0,108	0,112	0,116
Кут початку горіння, ° після ВМТ	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	2
Максимальний тиск p _{max} , МПа	5,73	6,81	7,63	8,24	8,80	9,27	9,71	10,20	10,72	11,31	11,83	12,40	12,95	13,43	13,68	13,71
Кут досягнення p _{max} , ° після ВМТ	15	15,5	16	16,5	17	17,5	17,8	18,2	18,5	18,5	18,1	17,77	17,5	17,5	18	19
Швидкість dp/dφ, МПа/°	0,106	0,122	0,127	0,126	0,122	0,117	0,112	0,111	0,111	0,115	0,124	0,131	0,136	0,148	0,161	0,172
Максимальна температура T _{max} , °С	1952	2238	2359	2358	2290	2183	2091	2021	1957	1905	1864	1832	1807	1780	1745	1703
Кут досягнення T _{max} , ° після ВМТ	21,5	21,5	22	22,5	23,7	24,48	25	25,14	25,23	25,33	25,33	25,5	26,2	27	28,5	30
Кут закінчення горіння, ° після ВМТ	21,5	22	23	24,5	25,5	26	26,5	26,5	26,5	26,5	27	27,5	28	29	30	31,5
Теплота за цикл реальна, кДж	2291	3542	43811	4741	4742	4508	4341	4198	4082	4038	4041	4025	4177	4154	4089	3965
Робота розширення, кДж	1478	1770	2014	2220	2402	2574	2748	2935	3133	3336	3536	3729	3907	4079	4248	4418
Точка балансу L _{ст.} =L _{роз.} , ° після ВМТ	35,5	36	36,5	37,5	38,5	39,5	40,5	41,5	42	43	43,5	43,5	44	44,5	45,5	46,5
Кут початку випуску, ° до НМТ	46	45,5	47,5	47,5	48,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	48,5	49	48,5	48
Тиск на початку випуску, МПа	0,224	0,264	0,332	0,39	0,452	0,513	0,557	0,602	0,649	0,697	0,745	0,791	0,828	0,867	0,899	0,933
Температура на початку випуску, °С	702,0	782,0	880,0	913,9	927,3	923,9	895,9	874,0	859,0	847,2	837,2	827,0	811,0	799,4	783,9	773,4
Індикаторна потужність цил., кВт	991	1257	1501	1718	1917	2105	2296	2509	2720	2945	3171	3398	3680	3887	4080	4251
Індикаторна потужність двигуна, кВт	7927	1005	12011	13743	15337	16843	18372	20076	21757	23559	25366	27182	29440	31094	32639	3401
Середній індикаторний тиск, МПа	0,663	0,787	0,886	0,964	1,028	1,085	1,142	1,204	1,27	1,339	1,407	1,473	1,562	1,618	1,667	1,708
Робота за цикл, кДж	970	1152	1296	1410	1504	1587	1670	1761	1858	1959	2059	2155	2286	2368	2438	2498
Індикаторний ККД робочого процесу	0,496	0,502	0,508	0,51	0,513	0,517	0,517	0,518	0,519	0,518	0,518	0,517	0,517	0,516	0,512	0,507
Ефективний ККД робочого процесу	0,432	0,443	0,454	0,46	0,466	0,473	0,476	0,479	0,483	0,483	0,483	0,485	0,486	0,486	0,483	0,479

Конкретна таблиця параметрів, або аналогічна їй таблиця для інших двигунів – це кінцевий продукт, який містить розширений список еталонних параметрів, необхідний для порівняльної діагностики в судових умовах. Під час планового процесу перевірки технічного стану судового двигуна за допомогою індиціювання персоналу необхідно лише занести його результати до розрахункового комплексу та отримати номенклатуру з 32 параметрів, які порівнюються з еталонними даними наведеними у таблиці для відповідного

режиму. На підставі цього порівняння робляться висновки про перебіг робочих процесів у циліндрах двигуна та відхилення цього перебігу від нормального. За допомогою широкого списку базових величин можна зробити цей аналіз більш ґрунтовним.

Використання результатів розширеного аналізу дозволяє дослідити як змінюються основні параметри робочих процесів двигуна в залежності від його навантаження. Це дає змогу отримати уявлення про те, як ці параметри поведуть себе на ділянках, які лежать за межами протокольних випробувань двигуна. Найбільш доцільно групувати характеристики зміни окремих параметрів відповідно до етапів робочого процесу, представивши їх як функцію навантаження двигуна у всьому діапазоні можливих режимів роботи.

Суттєвий вплив на ефективність робочого циклу оказують процеси газообміну робочого циліндру з навколишнім середовищем, які залежать від правильного функціонування газообмінних органів та системи наддуву [8]. Правильність їх функціонування впливає на якість очищення і наповнення циліндрів двигуна; роботу, що витрачається на газообмін; температурний рівень деталей циліндропоршневої групи. Особливо це стосується роботи двигуна на режимах малих навантажень для яких характер зміни параметрів суттєво відрізняється від режимів середніх та високих навантажень. Залежності параметрів цих процесів від навантаження, представлені на рис. 4, на якому наочно показано характерні зміни таких параметрів як питома витрата і коефіцієнт надлишку повітря, маса заряду і щільність повітря на вході до робочого циліндру, на різних режимах навантаження двигуна

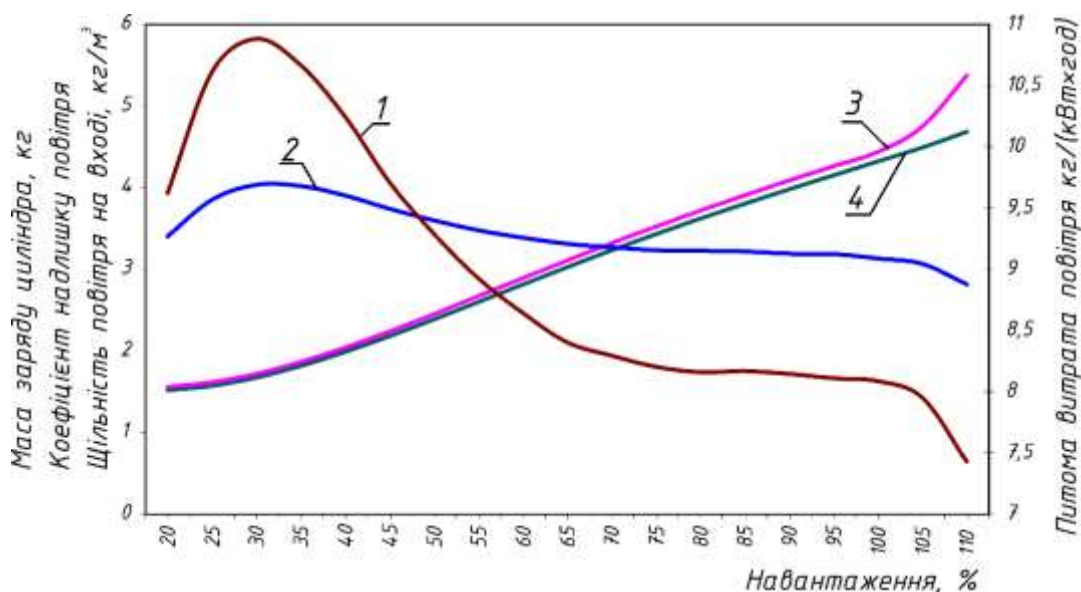


Рисунок 4 – Параметри процесу газообміну: 1 – питома витрата повітря; 2 – коефіцієнт надлишку повітря; 3 – маса заряду циліндра; 4 – щільність повітря на вході до циліндр

Аналіз наведених залежностей показує, що в діапазоні навантажень 30...105% відстежується чіткий тренд зміни розглянутих параметрів, однак за межами цього діапазону характер їх зміни суттєво відрізняється. Таким чином, якщо під час експлуатації орієнтуватися на тренди побудовані для діапазону 50...100% від MCR, тобто на ділянку, яка представлена в усіх формулярах протоколів випробувань, неможливо отримати об'єктивні дані для виконання порівняльного аналізу, і як наслідок для визначення дійсного технічного стану двигуна. В той же час, запропонований авторами метод визначення параметрів

процесу газообміну шляхом аналізу розрахункових «еталонних» індикаторних діаграм дає таку змогу, незалежно від режиму навантаження двигуна.

Аналіз параметрів, що характеризують процес стиснення вказує на те, що для них також характерна суттєва зміна трендів при роботі двигуна на режимах навантажень відмінних від номенклатурних. З рис. 5 видно, що характер зміни температури робочого тіла наприкінці стиснення у діапазонах навантажень 20...50% та 104...110% значно відрізняється від основного робочого діапазону. Це також підтверджує тезу про те, що некоректно робити висновки стосовно перебігу параметрів робочого процесу як функцій навантажень двигуна на всьому інтервалі робочих режимів, спираючись лише на данні наведені в формулярах виробника.

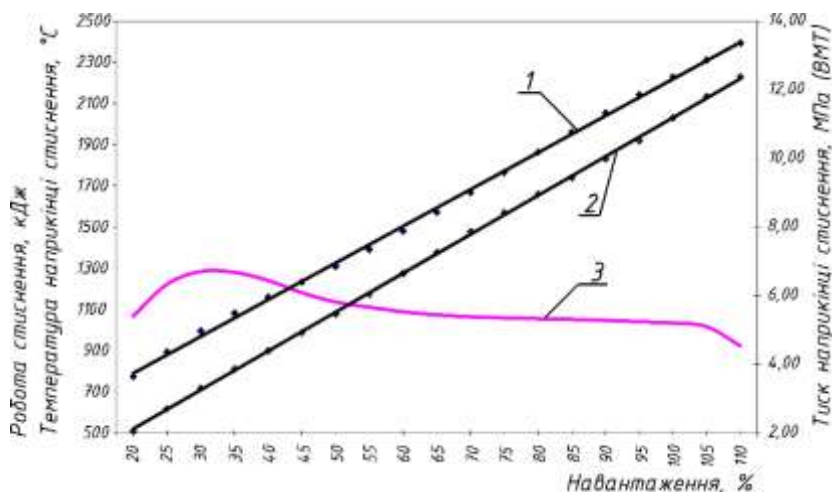


Рисунок 5 – Параметри процесу стиску: 1 – тиск наприкінці стиснення; 2 – робота стиснення; 3 – температура наприкінці стиснення

Згоряння палива поданого до робочого циліндру є основним етапом, що визначає ефективність перебігу робочого процесу двигуна в загалом. На характер його протікання суттєво впливають як стан робочого тіла, параметри якого формуються на етапах газообміну та стискування, так і параметри процесу вприскування палива, його кількості та розподілу по об'єму камери згоряння. В загалом, параметри вприскування палива (кут випередження, циклова подача, тривалість подачі) суттєво залежать від роботи та налаштувань паливної апаратури [9]. В розглянутому випадку системою яка впливає на параметри вприскування палива є система Variable Injection Timing (VIT), яка змінює кут подачі палива в залежності від режиму роботи двигуна. Саме роботою цієї системи пояснюється складний характер зміни кутів початку згоряння, досягнення максимального тиску та температури і закінчення згоряння (рис. 6).

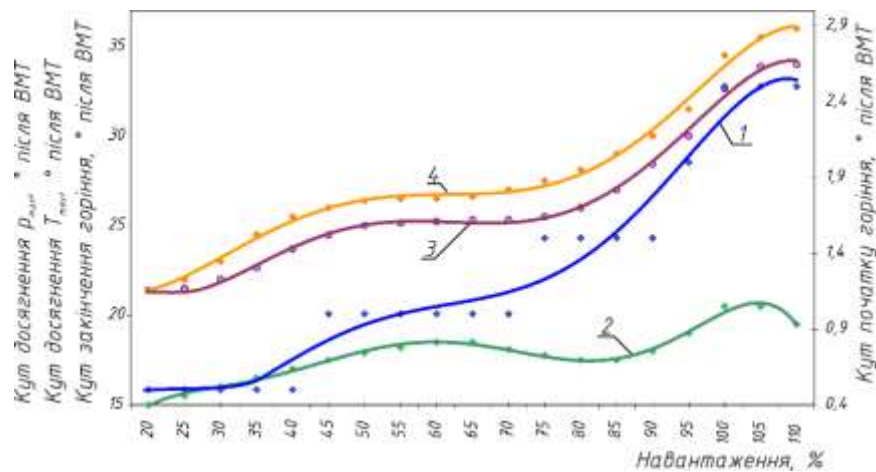


Рисунок 6 – Кути досягнення характерних ділянок робочого процесу: 1 – кут початку горіння; 2 – кут досягнення p_{\max} ; 3 – кут досягнення T_{\max} ; 4 – кут закінчення горіння

Таким чином, зазначені кути можуть бути використані як діагностичні параметри для контролю за роботою системи ВІТ, шляхом порівняння фактичних кутів визначених за результатами індиціювання під час експлуатації з кутами отриманими за результатами стендових випробувань двигуна.

Роботою системи ВІТ також пояснюються характеристики процесу згоряння наведені на рис. 7. Збільшення кута випередження вприскування палива дозволяє підтримувати приблизно постійний максимальній тиск циклу (p_{\max}) в діапазоні навантажень 90...110% від MCR. Пов'язане з випередженням кута вприскування палива зростання коефіцієнту збільшення тиску (λ) у робочому циклі, призводить до збільшення максимальної температури циклу (T_{\max}) у діапазоні навантажень 30...105% від MCR. Однак подальше зменшення швидкості наростання тиску призводить до того, що значення T_{\max} починає зменшуватися. Саме цей діапазон (20...30% від MCR) співпадає з підключенням до системи повітропостачання електричних повітродувок (air blowers). Таким чином параметри процесу згоряння в діапазоні 20...30% від MCR можна використовувати для оцінки ефективності роботи повітродувок.

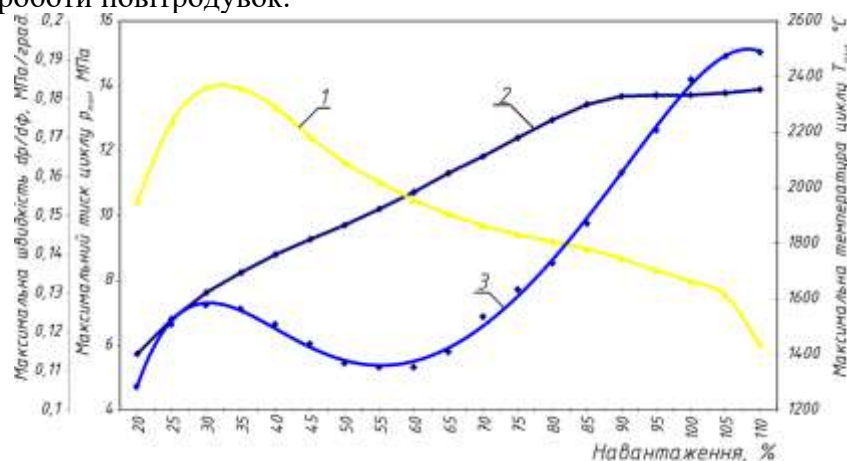


Рисунок 7 – Параметри процесу згоряння палива у робочому просторі двигуна: 1 – максимальна температура циклу; 2 – максимальний тиск циклу; 3 – максимальна швидкість зростання тиску

Температура наприкінці розширення, аналогічним чином повторює характер зміни максимальної температури циклу T_{\max} (рис. 8). Враховуючи це, вона може бути використана

для приблизної оцінки останньої, оскільки її вимірювання значно простіше контролювати під час експлуатації. Тиск на момент відкриття випускного клапану майже лінійно залежить від навантаження, при умові відкриття клапану з однаковим кутом до приходу поршня у НМТ. Відхилення від лінійного характеру може вказувати саме на неправильний кут закриття клапану.

Перспективним параметром для визначення ефективності перебігу робочого процесу, є визначення точки балансу (рис. 8). Тобто такого кута на лінії розширення при якому робота стискування дорівнює роботі розширення ($L_{стис.} = L_{розшир.}$). Цей параметр фізично пов'язано з усім перебігом робочого процесу і тому його значення може бути використано як діагностичний параметр [10]. Але практичне використання цього параметра для діагностичних цілей потребує додаткового дослідження, що виходить за рамки цієї роботи.

Незважаючи на відмінності у характері зміни окремих параметрів на визначених ділянках здійснення робочого процесу, отримані по результатам розрахунків узагальнені параметри цілком відповідають класичному уявленню про них (рис. 9). До того ж, значення цих параметрів корелюються з результатами експериментальних випробувань, що у загальному підсумку вказує на адекватність запропонованих методів оцінки інших параметрів в розширеному діапазоні режимів роботи двигуна.

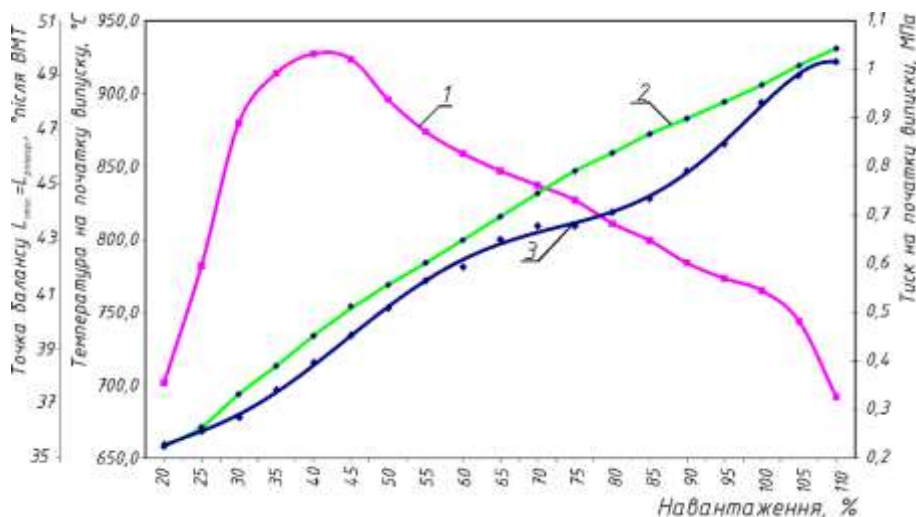


Рисунок 8 – Параметри процесу розширення; 1 – температура на початку випуску; 2 – тиск на початку випуску; 3 – точка балансу $L_{стис.} = L_{розшир.}$

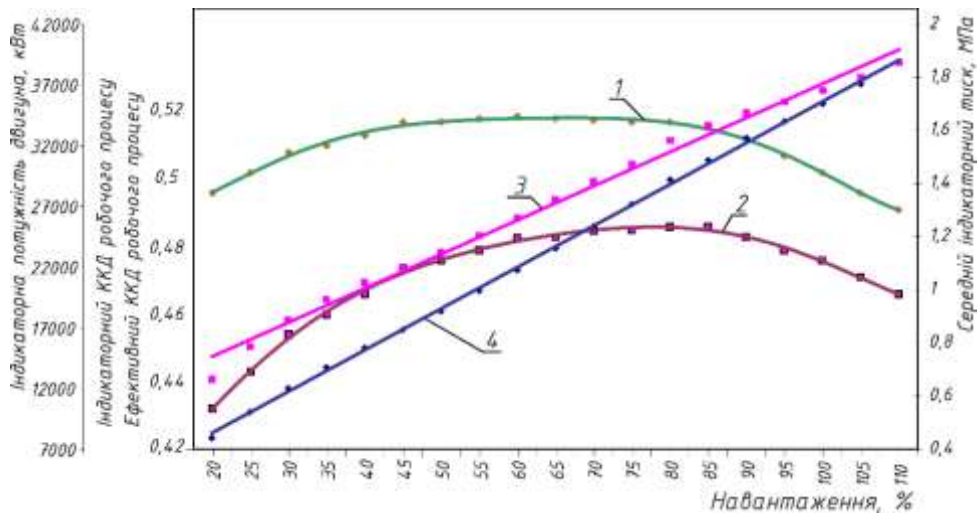


Рисунок 9 – Параметри робочого процесу; 1 – індикаторний ККД; 2 – ефективний ККД; 3 – середній індикаторний тиск; 4 – індикаторна потужність двигуна

Висновки. У формулярах більшості фірм виробників представлені графіки залежностей обмеженої кількості основних параметрів робочого процесу у вузьких межах навантаження двигуна, як правило, від 50% до 100% від MCR. Це пояснюється тим, що на час побудови двигунів не було особливої потреби в цій інформації оскільки більшість суден експлуатувалися на режимах, близьких до MCR, або була можливість щодо збільшення потужності двигуна, на час проведення індиціювання на номінальному навантаженні. Саме така обмеженість критеріїв для оцінки, а також вузькість діапазону їх представлення не дозволяє виконати більш ретельну і глибоку діагностику технічного стану двигуна на всьому можливому діапазоні робочих режимів, особливо, якщо спиратись лише на порівняння індикаторних діаграм отриманих в процесі експлуатації. Розширений перелік параметрів, отриманий з допомогою запропонованої авторами методики, та поданий у формі таблиці значно спрощує процедуру порівняння даних, дозволяє більш ґрунтовно оцінити технічний стан окремих елементів двигуна практично на всіх режимах його роботи.

Аналіз розширеного діапазону параметрів, показав, що на неспецифікаційних режимах роботи, таких як 20...35 та 100...110% від MCR характер їх змін має дуже складну функціональну залежність, що необхідно враховувати під час визначення технічного стану двигуна. Запропонована методика, її інформаційне та програмне забезпечення враховує ці особливості і дає можливість обслуговуючому персоналу проводити діагностичні роботи незалежно від навантажувально-швидкісного режиму двигуна.

ЛІТЕРАТУРА

1. MAN B&W K90MC-C6. Project guide. Camshaft controlled two-stroke engines. 6-th Edition, January 2009. – P. 21.
2. Правила технічної експлуатації морських і речкових суден. Дизелі. Нормативний документ морського транспорту України. Дата введення: 01.02.1997. – 63 с.
3. Sartini N. More haste less speed. Container ship focus. Lloyd's Register, September 2008. Issue 5. – P. 3.
4. Рибальченко М.Є., Білоусов Є.В. Використання числових профілів робочого процесу для аналізу ефективності роботи судового малообертового двигуна на режимах часткових навантажень Розвиток транспорту № 3(14), 2022. – С. 97-100.

5. Instruction book "Operation" for 46-98 MC/MC-C Engines. Hyundai Heavy Industries Co Ltd. Korea. – 427 p.
6. Білоусов Є.В., Марченко А.П., Рибальченко М.Є., Савчук В.П., Тулученко Г.Я. Розробка методів оцінки технічного стану двигунів за результатами індиціювання робочого процесу на режимах відмінних від номінальних. Двигуни внутрішнього згоряння. №1/2022. – С 51-59.
7. Shop test report of marine low speed diesel engine type: Doosan Man B&W 8K90MC-C, Project name DANA 1671, test date 21.03.2008. – 68 p.
8. Ваншейдт В. А. Суднові двигуни внутрішнього згоряння. Суднобудування. 1977. – 392 с.
9. Белоусов Е.В. Топливные системы современных судовых дизелей: учебное пособие / Е.В. Белоусов. – Херсон: ХГМА, 2014. – 268 с.
10. Варбанец Р.А. Диагностический контроль рабочего процесса судовых дизелей в эксплуатации: дисс. докт. техн. наук / Р.А. Варбанец – Одесса: Одесская национальная морская академия, 2010, – 314 с.

REFERENCES

1. Man B&W K90MC-C6. Project guide. Camshaft controlled two-stroke engines. 6-th Edition, January 2009. – P. 21.
2. Rules for the technical operation of sea and river vessels. Diesels. Normative document of maritime transport of Ukraine. [Pravyla tekhnichnoyi ekspluatatsiyi mors'kykh i rechkovykh suden. Dyzeli. Normatyvnyy dokument mors'koho transportu Ukrayiny] Date of introduction: 01.02.1997. – 63 p.
3. Sartini N. More haste less speed. Container ship focus. Lloyd's Register, September 2008 Issue 5. – P. 3.
4. Rybalchenko M.Y., Bilousov I.V. Usage of numerical profiles of the work process to analyze the efficiency of the low-speed marine engine at partial loads [Vykorystannya chyslovykh profiliv robochoho protsesu dlya analizu efektyvnosti roboty sudnovoho maloobertovoho dvyhuna na rezhymakh chastkovykh navantazhen']. *Transport Development* No. 3 (14), 2022, pp. 97-100.
5. Instruction book "Operation" for 46-98 MC/MC-C Engines. Hyundai Heavy Industries Co Ltd. Korea. – 427 p.
6. Bilousov I.V., Marchenko A.P., Rybalchenko M.Y., Savchuk V.P., Tuluchenko H.Y. Development of methods for evaluating of technical condition of engines according to the results of indicating of working process on modes excellent from nomin. [Rozrobka metodiv otsinky tekhnichnoho stanu dvyhuniv za rezultatamy indytsiuvannia robochoho protsesu na rezhymakh vidminnykh vid nominalnykh]. *Internal combustion engines. № 1/2022. pp. 51-59.*
7. Shop test report of marine low speed diesel engine type: Doosan Man B&W 8K90MC-C, Project name DANA 1671, test date 21.03.2008, 68 p.
8. Wanscheidt V. A. Marine internal combustion engines. [Sudnovi dvyhuny vnutrishn'oho zhoryannya]. *Shipbuilding. 1977. – 392 p.*
9. Bilousov I.V. Fuel systems of modern marine diesels. Tutorial. [Palyvni systemy suchasnykh sudnovykh dyzeliv. Navchal'nyy posibnyk.] Kherson: KSMA, 2014. – 268 p.
10. Varbanets R.A. Diagnostic control of the working process of marine diesel engines in operation: diss. doc. tech. Scienc. / R.A. Varbanets [Diagnosticheskiy kontrol' rabochoho protsesa sudovykh dizeley v ekspluatatsii: diss. dokt. tekhn. nauk / R.A. Varbanets] – Odessa: Odessa National Maritime Academy, 2010, – 314 p.

USE OF NUMERICAL PROFILES OF THE WORKING PROCESS FOR THE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF WORK OF A SHIP'S LOW-SPEED ENGINE UNDER THE CONDITIONS OF THE CURRENT TENDENCIES TO REDUCE THE OPERATING SPEED OF VESSELS

During the operation of the marine main low-speed engines, according to the requirements of regulatory documentation, it is necessary to regularly check and evaluate a large number of parameters of the work process. Such requirements are necessary in order to monitor changes in the conditions of the main processes at separate stages of the engine's operating cycle, which makes it possible to detect any violations in its operation associated with a change in the technical condition of its individual elements, and the engine as a whole. This allows you to take the necessary operational measures at an early stage of problems in order to prevent their further development. This approach makes it possible to ensure optimal use of the engine and the overall efficiency of the installation as a whole, which is very important with the current trend of increasing fuel prices and increasing environmental requirements. However, in order to evaluate the changes in the parameters of the working process, it is necessary to compare the results of the planned performance test of the engine with the previous data and with the results obtained during the bench tests of the engine or reference charts and parameters obtained by calculation. Modern trends to decrease the operating speed of ships, associated with the efforts of shipowners to reduce costs for the fuel component, make it impossible to carry out performance test of main engine and diagnostics at nominal modes. As a result, there is a need for defined parameters of the work process at partial load modes that differ significantly from the nominal ones. To solve this problem, the authors proposed a methodology that allows analytically obtaining reference indicator diagrams for any mode of operation of the engine, based on the results of its bench tests. The analysis of such diagrams allows expanding the list of parameters characterizing the work process flow and revealing patterns of changes in these parameters. The study, the results of which are presented in this article, is devoted to the definition of an extended list of parameters of the work process in the entire range of operating modes of a marine low-speed engine, based on the analysis of calculated of indicator diagrams.

Key words: *marine low-speed engine, performance test, indicator diagram, work process parameters, work mode.*