

Є.В. Білоусов, А.П. Марченко, М.Є. Рибальченко, В.П. Савчук, Г.Я. Тулущенко

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДВИГУНІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ІНДИЦІЮВАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ НА РЕЖИМАХ ВІДМІННИХ ВІД НОМІНАЛЬНИХ

Оцінка технічного стану судових двигунів внутрішнього згорання за параметрами та характером перебігу робочого процесу – поширена практика при їх експлуатації. Зняття та аналіз індикаторних діаграм є обов'язковою процедурою, передбаченою правилами технічної експлуатації для основної номенклатури судових двигунів великої та середньої розмірності. Для такої оцінки створено цілий арсенал засобів індичювання, від класичних механічних систем до електронних засобів періодичної або неперервної дії. Стрімкий розвиток електронних систем контролю та зміни в підходах до логістичних операцій на морському транспорті наклали низку обмежень, які децю звужують можливості використання зазначених методів. Більшість суден, які складають зараз основу світового торгового флоту, побудовані 10...15 років тому. Інформація про результати індичювання двигунів таких суден під час стендових випробувань подається у вигляді растрових зображень. Це ускладнює процес їх використання як еталонних, необхідних для порівняння з фактичними діаграмами, отриманими в процесі експлуатації за допомогою електронних систем контролю, які за останні кілька років прийшли на зміну механічним індикаторам. Крім того, тенденції до зниження швидкостей ходу суден ускладнюють, а найчастіше і унеможливають індичювання двигунів на специфікаційних режимах експлуатації. В результаті, ефективність використання індикаторних діаграм для оцінки поточного технічного стану різко знижується. У зв'язку з цим виникає об'єктивна потреба щодо співставлення різних методів отримання та зберігання інформації про результати індичювання між собою та приведення цієї інформації до єдиного методу подання, зручного для обробки та аналізу. Крім того, існує необхідність розробки методів отримання еталонних діаграм для неспецифічних режимів на основі обробки результатів прийнятно-здавальних стендових випробувань конкретного двигуна для оцінки його технічного стану за результатами індичювання на режимах часткового навантаження. Зіставленню різних методів представлення інформації та отримання еталонних індикаторних діаграм для неспецифічних режимів роботи двигунів присвячено це дослідження.

Ключові слова: судові малооборотні двигуни; індикаторна діаграма; режим роботи; поверхня Кунса.

Вступ

Для забезпечення ефективної та надійної роботи судового дизельного двигуна дуже важливо забезпечити однаковий перебіг робочих процесів у кожному з циліндрів двигуна та продукування окремими циліндрами однакової потужності. Тому в процесі експлуатації надзвичайно важливо мати об'єктивну інформацію про характер перебігу робочого процесу та ефективно управляти різними механізмами та агрегатами, що забезпечують його відповідний перебіг. Основним джерелом такої інформації є індикаторні діаграми в pV та $p\phi$ -координатах, які широко використовуються як при проведенні наукових досліджень, так і в практиці експлуатації. В першому випадку індикаторні діаграми є базою для оцінки ступеня досконалості робочого процесу та його відповідності поставленим під час проектування завданням (максимальна економічність, відповідність екологічним нормам). У другому випадку індикаторні діаграми використовуються для оцінки характеру перебігу робочого процесу порівняно з еталонними діаграмами, отриманими на стенді заводу виробника в ході прийнятно-здавальних випробувань конкретного двигуна. Для проведення процедури індичювання в процесі експлуатації на більшості судових двигунів (крім малорозмірних високооборотних) перед-

бачені спеціальні індикаторні крани, які сполучають порожнину робочого циліндра з вимірювальним пристроєм [1, 2]. Сама процедура проведення індичювання та аналізу отриманих індикаторних діаграм є штатною та передбачена регламентом контролю та обслуговування двигунів на судні в процесі їх експлуатації та повинна проводитися не рідше одного разу на місяць, якщо інше не зазначено в інструкції з експлуатації конкретного двигуна [2, 3]. Арсенал засобів індичювання робочих циліндрів двигунів досить широкий, від механічних індикаторів до електронних систем як періодичного, і неперервного контролю [4-7].

Актуальність дослідження

У практичній експлуатації судовими механізмами оцінюється лише незначна кількість номінальних параметрів робочого процесу [2, 3], до яких можна віднести: максимальний тиск стиснення робочого тіла в циліндрі (p_c), максимальний тиск циклу (p_z), індикаторну потужність циліндра (N_i), відхилення максимального тиску в окремих циліндрах (Δp_z). Здебільшого така ситуація обумовлена трудомісткістю обробки індикаторних діаграм та відносно невисокою їх якістю (особливо діаграм, отриманих за допомогою механічних систем), що вимагає від обслуговуючого персоналу володіння спеціальними методами математичної обробки да-

них, чого в умовах масової підготовки суднових механіків досягти достатньо проблематично.

Більш глибокий аналіз робочого процесу заснований на зіставленні отриманих індикаторних діаграм з еталонними, отриманими в результаті стендових випробувань двигуна або отриманих аналітично з використанням методів математичного моделювання [8, 9]. Донедавна такий метод аналізу широко використовувався на флоті [10], однак, структурні зміни в галузі експлуатації суден та всієї логістичної системи транспортування вантажів призвели до виникнення низки обмежуючих факторів, що ускладнюють використання таких підходів завдяки відмови від експлуатації суден на швидкостях, які забезпечуються номінальними режимами роботи головних двигунів.

Традиційно як еталонні розглядалися діаграми робочого процесу, отримані в ході стендових випробувань двигуна на режимах, близьких до максимальної тривалої потужності (Maximal Continuous Rating – MCR). Для цього двигун, що підлягає контролю, повинен бути виведений на цей режим і пропрацювати на ньому протягом тривалого часу, що необхідно для стабілізації теплового стану. Протягом всього процесу індиціювання двигун повинен працювати на цьому режимі. Однак сучасні тенденції до зниження швидкостей руху суден з метою економії палива, при яких прокладання маршруту не передбачає швидкісних ділянок і в той же час встановлює жорсткий графік руху, призводять до того, що провести повноцінні випробування дуже часто стає неможливим.

Шляхи вирішення проблеми

Для вирішення зазначеної проблеми розглядається можливість використання як еталонних, індикаторних діаграм, отриманих для інших режимів роботи двигуна. Номенклатура таких діаграм, які отримують під час стендових випробувань, досить обмежена. Як правило, це режими, що відповідають навантаженням в 25, 50, 75, 90, 100 і 110% від MCR. У деяких випадках, окремими виробниками додатково проводяться випробування на режимі навантаження двигуна 40% MCR.

В даний час в експлуатації знаходиться велика кількість двигунів з механічним приводом агрегатів паливopодачі та газорозподілу [11]. Еталонні індикаторні діаграми для цих двигунів були отримані з використанням механічних індикаторів і не відрізняються високою точністю відображення реально-го характеру перебігу робочого процесу з цілого ряду причин, пов'язаних з похибками вимірювань і обробки даних.

Основним джерелом інформації про результати випробування двигуна є протокол випробувань

(Shop Test Report), в якому відображаються зовнішні умови, час, характеристики палива та результати проведених випробувань.

У цьому документі наводяться індикаторні діаграми, отримані під час випробувань. При цьому індикаторні діаграми в pV -координатах отримані в умовах синхронізації з положенням поршня в робочому циліндрі, а діаграми в $p\phi$ -координатах виконані без синхронізації і можуть бути використані тільки для оцінки таких показників як p_c і p_z .

Якщо взяти до уваги, що термін експлуатації суднового двигуна, особливо малообертового, становить 25...30 років, тоді питання об'єктивного контролю технічного стану цих ДВЗ, в тому числі і за параметрами робочого процесу, є актуальними як на часі, так і ще на 15...20 років. Така актуальність буде зберігатися, поки двигуни з механічними системами управління повністю не замінять двигуни нових поколінь з електронними системами управління та контролю.

Проблема розвитку методів об'єктивного контролю параметрів робочого процесу суднових малообертових двигунів з механічними системами управління продиктована ще й тим, що протягом останніх років відбувається серйозне посилення екологічних норм, а екологічні показники, як відомо, жорстко пов'язані з технічним станом двигуна та режимами його роботи. Крім того, активно ведеться пошук нових видів палива для суднових двигунів, які будуть більш екологічними, ніж традиційні [12-14], що також буде потребувати більш глибокого контролю робочого процесу, особливо у разі модернізації цих ДВЗ, що вже знаходяться в експлуатації.

Таким чином, пошук нових методів об'єктивного контролю параметрів робочого процесу шляхом більш глибокого аналізу індикаторних діаграм в умовах обмеженості об'єктивної інформації є важливим науково-практичним завданням.

Виходячи з вищесказаного, в статі розглянуті два основних напрямки вирішення проблеми, які вимагають паралельної реалізації:

- розробка методів отримання еталонних індикаторних діаграм для режимів, відмінних від MCR;
- розробка методів обробки індикаторних діаграм, отриманих з растрових зображень або за результатами електронного сканування параметрів робочого процесу, а також отриманих аналітично як еталонні.

Останнє пояснюється тим, що часто можна зіткнутися з ситуацією, коли на судні є протокол стендових випробувань двигуна в растровому форматі (Shop Test Report), а індиціювання ведеться з

використанням переносних електронних індикаторів. У цьому випадку результати індичювання можуть бути представлені у вигляді числових масивів, придатних для подальшої обробки. Тому виникає необхідність одночасного використання цих двох видів представлення інформації, з метою вирішення проблеми поглибленого аналізу робочих процесів, що забезпечить виявлення відхилень у

технічному стані двигуна від нормативних.

В межах цього дослідження авторами розроблено алгоритми, методологію та відповідне програмне забезпечення для реалізації описаного далі підходу.

Загальна схема процесу комплексної обробки даних для вирішення поставленої задачі представлена на рис. 1.

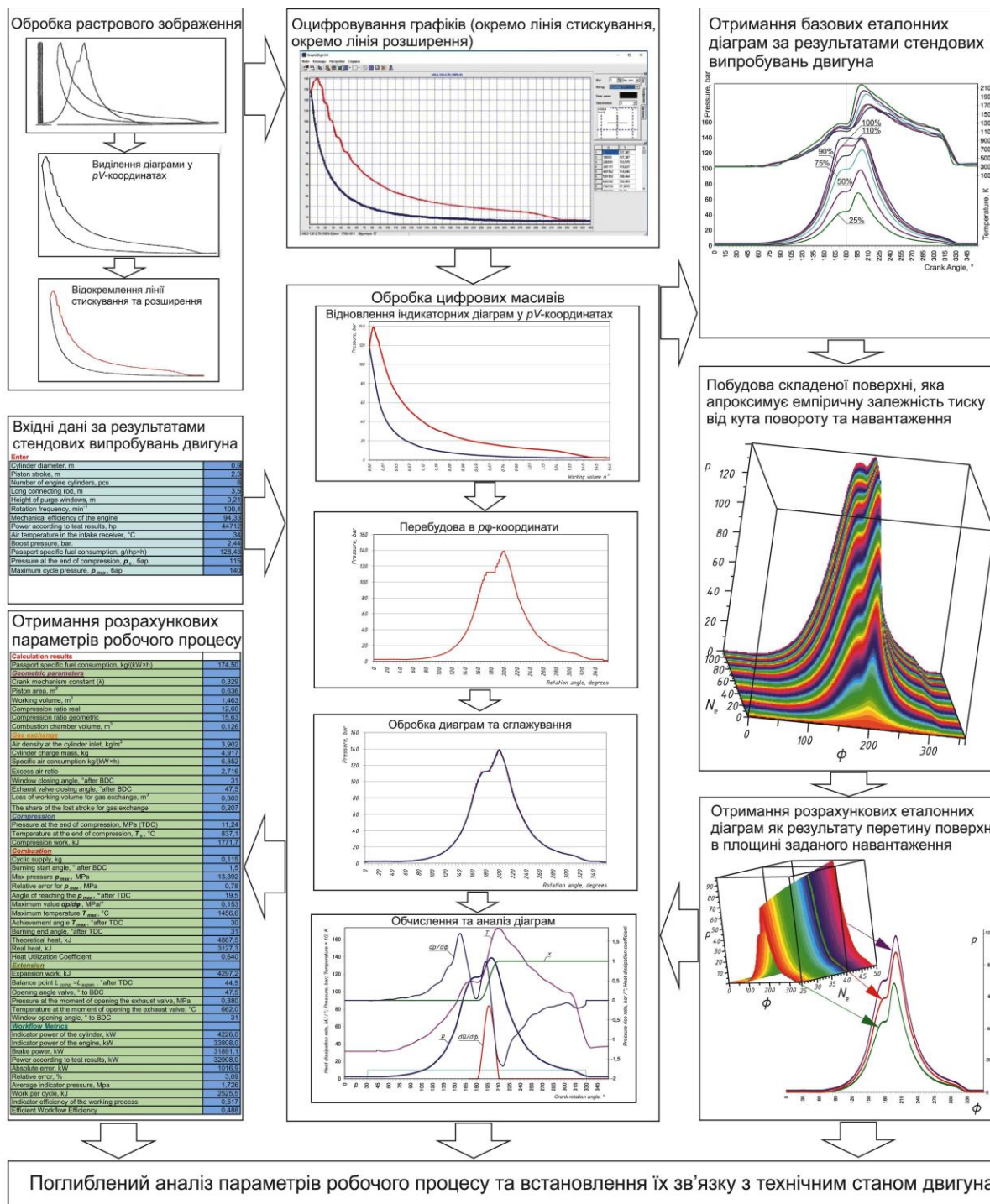


Рис. 1. Схема комплексного аналізу робочих процесів суднових двигунів, заснованого на побудові та застосуванні тривимірних полігонів, що використовуються для отримання еталонних індикаторних діаграм для всіх режимів роботи двигуна

Комплексна обробка включає кілька етапів:

- обробка растрових зображень pV діаграм з використанням графічного редактора та відповідним відокремлюванням ліній стиснення та розширення за допомогою кольорів;

- оцифрування отриманих графіків з використанням програми Graph2Digit;

- експорт даних до розрахункового комплексу для обробки індикаторних діаграм, що включає перебудову діаграм з pV в $p\phi$ -координати та навпаки з подальшим розрахунком основних показників робочого процесу;

- контрольне порівняння результатів розрахунків із результатами випробувань двигуна;

- отримання «базових» індикаторних діаграм у $p\phi$ -координатах, що відповідають режимам стендових випробувань двигуна;

- побудова за «базовими» кривими 3D поверхні робочих режимів двигуна;

- виділення «еталонної» індикаторної діаграми для заданого режиму роботи двигуна шляхом перетину полігону відповідною площиною;

- експорт «еталонної» та фактичної індикаторної діаграми до розрахункового комплексу;

- порівняння отриманих результатів, оцінка відхилень фактичної діаграми від «еталонної», виявлення причин таких відхилень.

Розглянемо етапи розв'язання задачі та використовувати для цього підходи докладніше.

Попередня обробка растрових зображень індикаторних діаграм зводиться до їх очищення від графічного шуму та всіх інших зображень, які не мають відношення до діаграм у pV -координатах.

Ця процедура може бути виконана в будь-якому редакторі растрових зображень. Також необхідно відокремити лінії стиснення та розширення, виділивши їх різними кольорами, оскільки більшість існуючих програм для оцифрування графічних зображень дозволяють розрізняти кольори графіків.

У деяких випадках точність оцифрування може бути підвищені шляхом попередньої обробки растрових зображень у графічних редакторах (наприклад, CorelDRAW), що дозволяють здійснювати їхнє трасування відносно центральної лінії.

Така обробка дає можливість позбавитися основних графічних шумів властивих растровим зображенням, які піддавалися багаторазовим перетворенням, що дозволяє істотно підвищити якість їх подальшої обробки.

На ринку програмних продуктів представлено значну кількість програм, призначених для оцифрування растрових зображень. Авторами для виконання цього завдання використовувалася про-

грама Graph 2 Digit (яка знаходиться у вільному доступі).

Слід зазначити, що процедура оцифрування растрових зображень індикаторних діаграм повинна виконуватися для кожного двигуна індивідуально і від якості виконання цього етапу залежить подальша точність та об'єктивність отриманих оцінок. У той же час, цей етап необхідно виконати тільки один раз, оскільки на основі отриманих результатів формується еталонна 3D поверхня, яка використовується для отримання еталонних діаграм для будь-якого навантажувально-швидкісного режиму роботи конкретного двигуна.

Як показав досвід обробки індикаторних діаграм кількох однотипних двигунів побудованих різними виробниками в різний час, вони мають значні відмінності в характері перебігу та показниках робочого процесу (рис. 2), що унеможливує використання універсальних 3D поверхонь для однотипних двигунів, а потребує створення поверхні для кожного двигуна індивідуально, за результатами його випробувань.

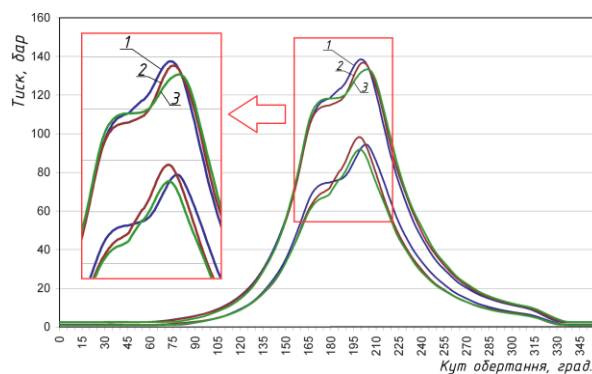


Рис. 2. Порівняння розгорнутих індикаторних діаграм, побудованих за результатами випробувань трьох двигунів серії MAN 8K90MC-C на режимах 90 та 50% від MCR:

1 – двигун DML1-2046 побудований у 2008 році корпорацією DOOSAN-MAN Diesel; 2 – двигун ML-1320 збудований у 2009 році корпорацією HSD-MAN B&W; 3 – двигун AA2080, побудований в 2009 році корпорацією Samsung

Слід розуміти, що обмеженість фактичної інформації в рамках одного випробування двигуна значно зужує можливості отримання об'єктивних даних, які можуть бути використані як еталонні. На об'єктивність оцінки часто впливає погана якість діаграм, характерна для механічних систем індичювання, які використовувалися під час їх стендових випробувань.

У значній мірі нівелювати недоліки методу можна шляхом глибокого аналізу отриманих інди-

каторних діаграм з отриманням значної кількості розрахункових параметрів, за величиною яких можна оцінити їх відповідність іншим двигунам аналогічного класу та/або розмірності, а також порівняти з параметрами робочого процесу, отриманими в ході випробувань досліджуваного двигуна.

За результатами аналізу числових масивів, отриманих у результаті оцифрування індикаторних діаграм, програмний модуль, розроблений у межах цього дослідження, дозволяє виділити

46 параметрів, що характеризують робочий процес двигуна. Частина цих параметрів використовуються як контрольні, а частина може бути використана як діагностичні.

На рис. 3 представлені результати обробки індикаторних діаграм за матеріалами стендових випробувань для двигуна 8K90MC-C, що працює на навантаженні 90% MCR. У табл. 1 наведено вихідні та розрахункові дані для цього ж режиму.

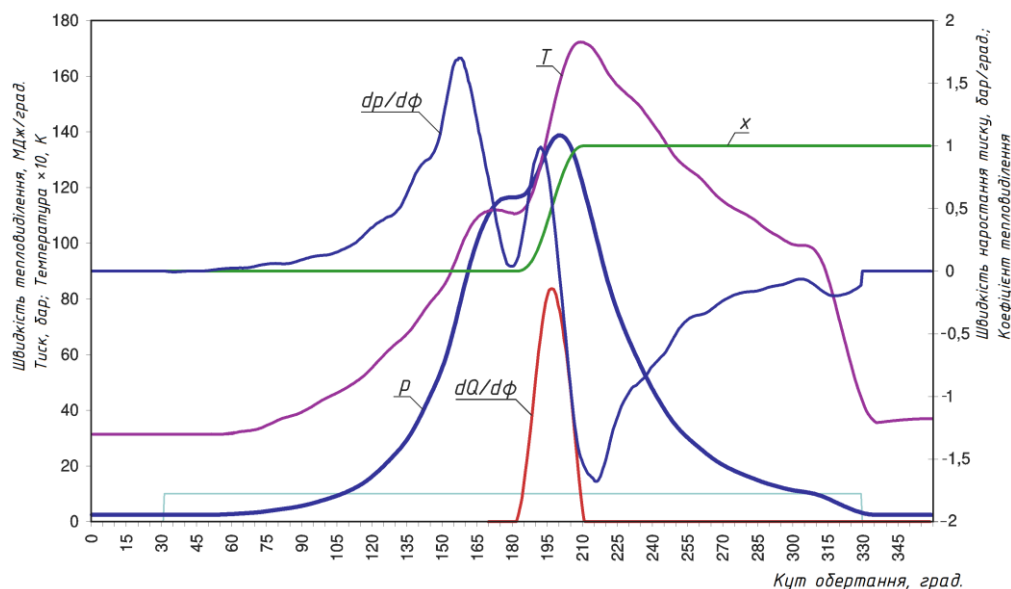


Рис. 3. Результати обробки індикаторних діаграм за матеріалами стендових випробувань для двигуна 8K90MC-C, що працює при навантаженні 90% MCR

Усі показники робочого процесу, одержані в результаті аналізу індикаторних діаграм, можна умовно розділити на дві великі групи: це енергетичні показники і показники динамічності процесу. Для оцінки перших показників, зазвичай, використовуються діаграми в pV -координатах, а оцінки

других – в $p\phi$ -координатах.

На наступному етапі, обробляються індикаторні діаграми для кожного режиму випробувань окремих циліндрів. За результатами усереднення отриманих масивів, будуються «базові» діаграми необхідні для формування 3D поверхні (рис. 4).

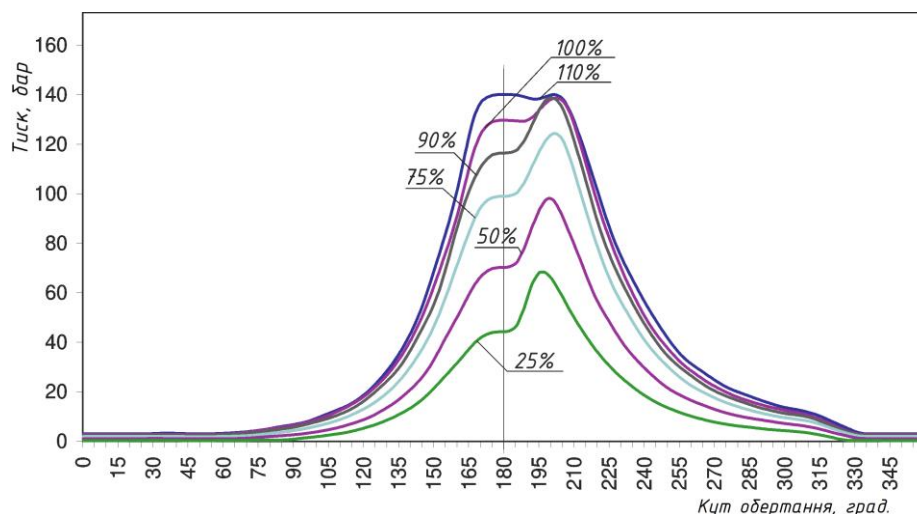


Рис. 4. Результати обробки індикаторних діаграм за результатами стендових випробувань для двигуна 8K90MC-C, при навантаженнях 25, 50, 75, 90, 100 та 110% від MCR

Таблиця 1. Вихідні та розрахункові дані, отримані в результаті обробки індикаторних діаграм за матеріалами стендових випробувань для двигуна 8К90МС-С, що працює при навантаженні 90% MCR

Параметр	Знач.	Параметр	Знач.
Вихідні дані		Стискання	
Діаметр циліндра, м	0,9	Тиск наприкінці стискання, МПа (ВМТ)	11,65
Хід поршня, м	2,3	Температура наприкінці стискання, T_c , °С	832,89
Кількість циліндрів двигуна, од	8	Робота стискання, кДж	1875,7
Довжина шатуна, м	3,5	Згоряння	
Висота продувочних вікон, м	0,21	Циклова подача, кг	0,108
Частота обертання, хв^{-1}	100,5	Кут початку згоряння, ° до ВМТ	2,0
Механічний ККД	94,4	Максимальний тиск циклу p_{max} , МПа	13,88
Потужність за результатами випробувань, л.с.	44769	Кут досягнення p_{max} , ° за ВМТ	19,5
Температура повітря у впускному ресивері, °С	41	Швидкість наростання тиску $\max dp/d\phi$, МПа/°	0,170
Тиск наддуву, бар.	2,42	Максимальна температура циклу T_{max} , °С	1449,9
Паспортна питома витрата палива, г/(к.с.×год.)	126,64	Кут досягнення T_{max} , після ВМТ	28,5
Тиск наприкінці стискування, p_c , бар.	118,6	Кут закінчення згоряння, після ВМТ	30,5
Максимальний тиск циклу, p_{max} , бар	140,1	Теплота за цикл теоретична, кДж	4590,0
Результати розрахунків		Теплота за цикл реальна, кДж	2743,2
Паспортна питома витрата палива, г/(кВт×год.)	172,07	Коефіцієнт використання теплоти	0,598
Геометричні параметри		Розширення	
Постійна КШМ (λ)	0,329	Робота розширення, кДж	4279,9
Площа поршня, м^2	0,636	Баланс $L_{стис.} = L_{розшир.}$, ° за ВМТ	46,5
Робочий об'єм, м^3	1,463	Кут відкриття впускного клапану, до НМТ	50
Ступінь стискання дійсна	12,94	Тиск на початку випуску, МПа	0,952
Ступінь стискання геометрична	15,49	Температура на початку випуску, °С	687,5
Об'єм камери згоряння, м^3	0,123	Кут відкриття продувочних вікон, град до НМТ	31
Газообмін		Показники робочого процесу	
Щільність повітря на вході до циліндра, $\text{кг}/\text{м}^3$	3,793	Індикаторна потужність циліндру, кВт	4027
Маса заряду циліндра, кг	4,957	Індикаторна потужність двигуна, кВт	32216
Питома витрата повітря $\text{кг}/(\text{кВт}\times\text{год.})$	6,327	Ефективна потужність, кВт	30412
Коефіцієнт надлишку повітря	2,537	Потужність по результатам випробувань, кВт	32945
Кут закриття вікон, після НМТ	31	Середній індикаторний тиск, МПа	1,643
Кут закриття впускного клапану, після НМТ	43,5	Робота за цикл, кДж	2404,2
Втрата робочого об'єму на газообмін, м^3	0,258	Індикаторний ККД робочого процесу	0,524
Частка втраченого ходу на газообмін	0,176	Ефективний ККД робочого процесу	0,495

Задача апроксимації експериментальної залежності тиску в циліндрах p від кута повороту колінчастого валу ϕ і ефективної потужності N_e розв'язувалася шляхом побудови складеної поверхні по сітці кривих, де в якості складових поверхонь використовувалися поверхні Кунса.

Для побудови зазначеної поверхні застосовуються два типи кривих:

- базові індикаторні діаграми (залежність тиску p від кута повороту ϕ), $c_i(\phi)$, $i = 0; n$, $(n-1)$ – кількість значень навантажень, в яких проводилося зняття індикаторних діаграм;

- залежності тиску p від навантаження N_e при фіксованих кутах повороту колінчастого валу ϕ $b_j(N_e)$ $j = 1; m$, $(m-1)$ – кількість дискретних значень кутів повороту колінчастого валу, $\phi_{min} \leq \phi \leq \phi_{max}$.

Якщо припустити, що параметри точок пере-

тину цих кривих утворюють послідовності, що зростають: $\phi_i < \phi_{i+1}$ та $N_{e_j} < N_{e_{j+1}}$, тоді два сімейства кривих, які задовольняють перерахованим вимогам, утворюють сітку кривих.

Кожна комірка такої сітки кривих має чотири кутові точки (рис. 5).

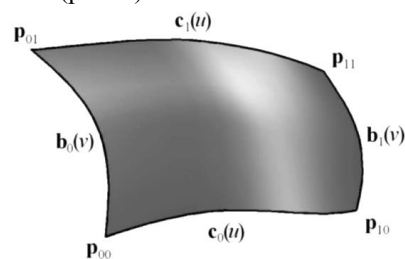


Рис. 5. Приклад поверхні Кунса

Позначивши їх радіуси-вектори p_{00} , p_{10} , p_{01} , p_{11} , приведемо криві до параметричної довжини

$0 \leq u \leq 1$ і $0 \leq v \leq 1$ в межах кожної комірки побудованої сітки кривих.

Позначимо для кожної комірки сітки:

$c_0(u)$ – криву, що з'єднує точки p_{00} та p_{10} ;

$c_1(u)$ – криву, що з'єднує точки p_{01} і p_{11} ;

$b_0(v)$ – криву, що з'єднує точки p_{00} та p_{01} ;

$b_1(v)$ – криву, що з'єднує точки p_{10} та p_{11} .

Радіус-вектор поверхні Кунса, побудованої за чотирма кривими, описується функцією:

$$r(u; v) = (1-v)c_0(u) + vc_1 + (1-u)b_0(u) + ub_1(u) -$$

$$- (1-u)(1-v)p_{00} - u(1-v)p_{10} - (1-u)vp_{01} - uv p_{11}.$$

Приклад складеної 3D поверхні, яка апроксимує емпіричну залежність тиску від кута повороту та навантаження, побудованої за описаним вище алгоритмом наведено на рис. 6.

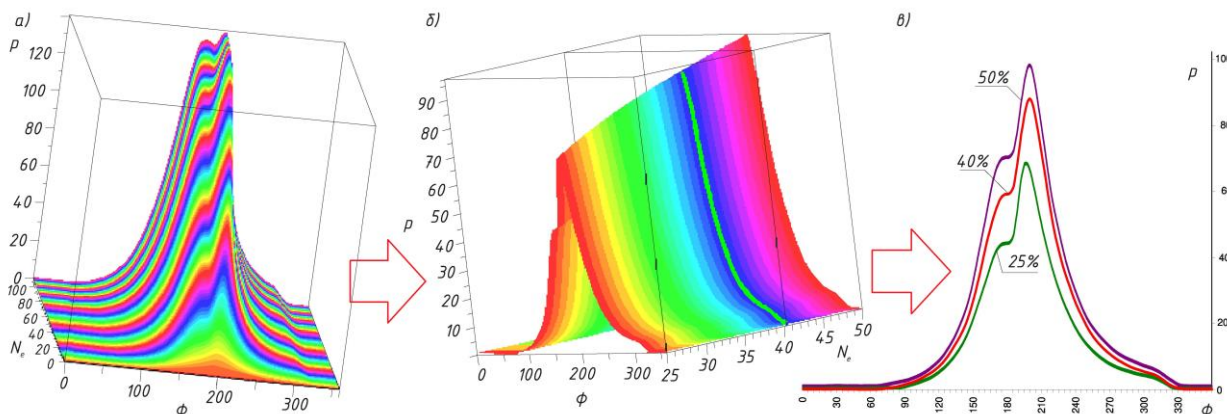


Рис. 6. Приклад складеної поверхні, яка апроксимує емпіричну залежність тиску від кута повороту та навантаження за матеріалами стендових випробувань двигуна 8K90MC-C (а); фрагмент складової поверхні, що виповідає навантаженням 25...50% (б); теоретична «еталонна» діаграма робочого процесу для навантаження 40% від MCR (зелена лінія) отримана шляхом перетину складеної поверхні відповідною площиною (червоним кольором позначені базові діаграми для навантаження 25 та 40% від MCR (в)

При перетині отриманої 3D поверхні відповідною площиною отримуємо теоретичну «еталонну» індикаторну діаграму та відповідний числовий масив (рис. 6 в), який може бути оброблено як і базові криві, отримані за результатами оцифрування експериментальних даних. На рис. 6 б, в, по-

казано приклад отримання такої діаграми для навантаження 40% від MCR.

На рис. 7 наведено порівняння теоретично отриманої «еталонної» індикаторної діаграми з результатами стендових випробувань двигуна MAN 8K90MC-C при режимі 40% від MCR.

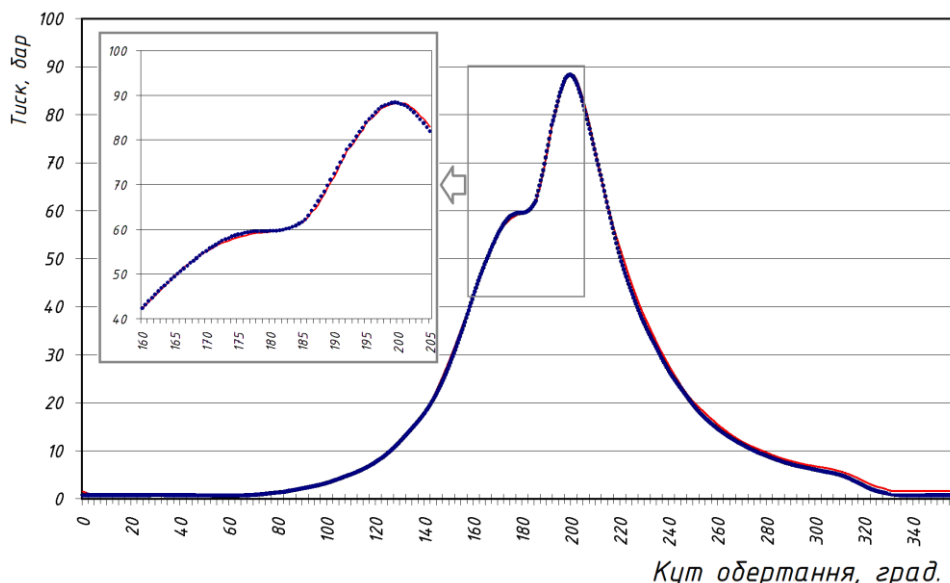


Рис. 7. Порівняння еталонної індикаторної діаграми, отриманої аналітично (сині точки), з результатами стендових випробувань двигуна MAN 8K90MC-C при режимі 40% від MCR (суцільна червона лінія) (заводський номер двигуна DML1-2046, який побудований у 2008 році корпорацією DOOSAN-MAN Diesel)

Висновки

Для вирішення науково-практичної задачі оцінки технічного стану судових малооборотних двигунів за параметрами робочого процесу розроблено методологію та розрахунковий модуль, що дозволяє аналізувати індикаторні діаграми, отримані як шляхом оцифрування растрових зображень, що містяться в протоколі стендових випробувань двигуна, так і шляхом індичіювання двигуна електронними пристроями. Розрахунковий модуль дозволяє визначити 46 показників, що характеризують робочий процес двигуна та можуть бути використані як діагностичні. Обробка та аналіз індикаторних діаграм дозволяє отримати серію базових кривих, на основі яких сформується 3D поверхня для всього діапазону робочих режимів двигуна. Це дозволяє аналітично отримати «сталонну» індикаторну діаграму для будь-якого режиму його роботи та проводити індичіювання і оцінку стану двигуна на будь-якому режимі роботи, відмінному від MCR. В розглянутих випадках відносна похибка між експериментальними та теоретичними індикаторними діаграмами не перевищувала 4%, що цілком прийнятно для вирішення задач діагностування під час експлуатації судових двигунів.

Список літератури:

1. Bilousov I., Bulgakov M., Savchuk V. *Modern Marine Internal Combustion Engines. Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping*, Springer, Cham., 2020. XIII, 385 p., <https://doi.org/10.1007/978-3-030-49749-1>. 2. Суворов П. С. Судовые двигатели внутреннего сгорания и их техническая эксплуатация, Одесса: ОНМА, 2017. 3. Одищов В. И. Диагностика технического состояния дизелей по параметрам рабочего процесса / В. И. Одищов, С. А. Кабыш // Вестник АГТУ. – 2012. – №1. – С. 123–128. 4. Engine Indicators Type 50 and Type 30 – Operating Instructions. Part-No. 4651.98.00020, Friedrich Leutert GmbH & Co., 2017, Germany, Adendorf. 5. Off-line PMI System Pressure Analyser User's Guide. Reg. № 39661314, MAN Diesel, Denmark, Copenhagen, 2007, June. 6. Short Operating Instructions for the Electronic Indicator HLV 2005 MK, Präzisions-Messtechnik Baewert GmbH. Germany, 2006, Meerane. 7. DPI-2 Digital Pressure Indicator Operating Instructions. DPI hand-held unit, version 2.04., Friedrich Leutert GmbH & Co. KG, 2014, Germany, Adendorf, April. 8. Варбанец Р. А. Диагностический контроль рабочего процесса судовых дизелей в эксплуатации: дис. докт. техн. наук, Одесская национальная морская академия, Одесса, 2010. 9. Білоусов Є. В. Аналітичний опис індикаторних діаграм / Є. В. Білоусов, В. П. Савчук, Г. Я. Тулученко // Розвиток транспорту. – 2021. – № 1(8). – С. 47–61. 10. Pawletko R. 'Evaluation of Current Developments and Trends in the Diagnosis of Marine Diesel Engines Based on the Indicator Diagrams Analysis /

R. Pawletko, S. Polanowski // *Journal of KONES Powertrain and Transport*. – 2014. – Vol. 21. – № 4. – p.p. 389–396. 11. Белоусов Е.В. Топливные системы современных судовых дизелей. – «Лань», СПб, 2019. 12. Белоусов Е. В. Анализ современных подходов к проблеме создания судовых малооборотных газодизельных двигателей / Е. В. Белоусов, В. П. Савчук, Белоусова Т. П. // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2016. – № 1. – С. 81–88. 13. Belousov E. Research of the Gas Fuel Supply Process on the Compression Stroke in Ship's Low-Speed Gas-Diesel Engines / E. Belousov, A. Marchenko, I. Gritsuk et al. // *SAE Technical Paper 2020-01-2107*. – 2020, doi:10.4271/2020-01-2107. 14. Okubo M. *New Technologies for Emission Control in Marine Diesel Engines / M. Okubo, T. Kuwahara*. – Elsevier Inc., 2020, Butterworth-Heinemann, Kidlington, Oxford, United Kingdom.

Bibliography (transliterated):

1. Bilousov, I., Bulgakov, M., Savchuk, V. (2020), *Modern Marine Internal Combustion Engines. Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping*, Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-49749-1>. 2. Suvorov, P. S. (2017), *Marine Internal Combustion Engines and Their Technical Operation [Sudovyye dvigateli vnutrennego sgoraniya i ih tehnikeskaya ekspluatatsiya]*, Odessa: ONMA. 3. Odintsov, V. I., Kabysch, S. A. (2012), 'Diagnosing the technical condition of diesel engines by working process parameters' [Diyagnostirovaniye tehnikeskogo sostoyaniya dizeley po parametram rabocheho protsesssa], *Bulletin of ASTU*, No. 1, pp. 123–128. 4. Engine Indicators Type 50 and Type 30 – Operating Instructions. Part-No. 4651.98.00020, (2017), Friedrich Leutert GmbH & Co., Germany, Adendorf. 5. Off-line PMI System Pressure Analyser User's Guide. Reg. № 39661314, (2007), MAN Diesel, Denmark, Copenhagen, June. 6. Short Operating Instructions for the Electronic Indicator HLV 2005 MK, (2006), Präzisions-Messtechnik Baewert GmbH. Germany, Meerane. 7. DPI-2 Digital Pressure Indicator Operating Instructions. DPI hand-held unit, version 2.04., (2014), Friedrich Leutert GmbH & Co. KG, Germany, Adendorf, April. 8. Varbanets, R. A. (2010), 'Diagnostic Control of the Working Process of Marine Diesel Engines in Operation' [Diyagnosticheskiy kontrol rabocheho protsesssa sudovyyih dizeley v ekspluatatsii]. Thesis of Dr. tech. Sciences, Odessa National Maritime Academy, Odessa. 9. Bilousov, Ie. V., Savchuk, V. P., Tuluchenko H. Ya. (2021), 'Analytical Description of Indicator Diagrams' [Analitichnyi opys indykatornykh diaqram]. *Transport Development*. № 1(8), pp. 47–61. 10. Pawletko, R., Polanowski, S. (2014), 'Evaluation of Current Developments and Trends in the Diagnosis of Marine Diesel Engines Based on the Indicator Diagrams Analysis'. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 21, № 4, pp. 389–396. 11. Belousov, E. V. (2019), *Fuel Systems of Modern Marine Diesel Engines [Toplivnyye sistemyi sovremennyih sudovyyih dizeley]*, 'Lan', St. Petersburg. 12. Belousov, E. V., Savchuk, V. P., Belousova, T. P. (2016), 'Analysis of Modern Approaches to the Problem of Creating Ship Low-Speed Gas-Diesel Engines' [Analiz sovremennyih podhodov k probleme sozdaniya sudovyyih malooborotnyih gazodizelnyih dvigateley]. *Internal Combustion Engines*, № 1, pp. 81–88. 13. Belousov, E., Marchenko, A., Gritsuk, I. et al. (2020), 'Research of the Gas Fuel Supply Process on the Compression Stroke in Ship's Low-Speed Gas-Diesel Engines'. *SAE Technical Paper 2020-01-2107*. doi:10.4271/2020-01-2107. 14. Okubo, M., Kuwahara, T. (2020), *New Technologies for Emission Control in Marine Diesel Engines*. Elsevier Inc., Butterworth-Heinemann, Kidlington, Oxford, United Kingdom.

Надійшла до редакції 08.06.2022 р.

Білоусов Євген Вікторович – доктор техн. наук, професор, доцент кафедри експлуатації судових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Україна, ewbelousov67@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8185-8209>

Марченко Андрій Петрович – доктор техн. наук, професор, проректор з наукової роботи, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, andreyMarchenko51@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-9746-4634>.

Рибальченко Микола Євгенович – аспірант кафедри експлуатації судових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Україна, kolgyb73@gmail.com

Савчук Володимир Петрович – канд. техн. наук, доцент завідувач кафедри експлуатації судових енергетичних

установок, Херсонська державна морська академія, Україна, postsavchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5266-850X>

Тулученко Галина Яківна – доктор техн. наук, професор, професор кафедри вищої математики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, tuluchenko.galina@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-6196-540X>;

DEVELOPMENT OF METHODS FOR EVALUATION OF TECHNICAL CONDITION OF ENGINES ACCORDING TO THE RESULTS OF INDICATION OF WORKING PROCESS ON MODES DIFFERENT FROM NOMINAL

Ie. V. Bilousov, A. P. Marchenko, M. Ie. Rybalchenko, V. P. Savchuk, H. Ya. Tuluchenko

Technical condition assessment of marine internal combustion engines by the parameters and nature of the workflow is a common practice in their operation. Taking and analysis of indicator diagrams is a mandatory procedure provided by the rules of technical operation for the main range of large and medium-sized marine engines. There is a whole arsenal of indication means for such evaluation: from classical mechanical systems to electronic means of periodic or continuous action. The rapid development of electronic control systems and changes in approaches to logistics operations in maritime transport have imposed a number of limitations, somewhat narrowing the possibilities of using these methods. Most of the vessels that form the basis of the world merchant fleet were built 10...15 years ago. Information about the results of the indication of the engines of such vessels during bench tests is presented in the form of raster images. This complicates the process of using them as the reference needed to compare them with the actual diagrams obtained in operation by means of electronic control systems, which have replaced mechanical indicators over the past few years. In addition, tendencies to reduce the speed of vessels complicate, and often make it impossible to indicate the engines in the specified operating modes. As a result, the efficiency of using indicator diagrams to assess the current technical condition is sharply reduced. In this regard, there is an objective need to compare different methods of obtaining and storing information about the results of indication and in a unified method of presenting this information, convenient for processing and analysis. In addition, there is a need to develop methods for obtaining reference diagrams for non-specific modes on the basis of processing the results of acceptance and commissioning bench tests of a particular engine to assess its technical condition by the results of indication on the partial load modes. This study is devoted to the comparison of different methods of presenting information and obtaining reference indicator diagrams for non-specific operating modes of engines.

Keywords: marine low-speed engines; indicator diagram; operating mode; Koons surface.

УДК 621.436.12

DOI: 10.20998/0419-8719.2022.1.08

О.В. Грицюк, Д.В. Левченко

ФОРМУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО ПЛАНУ ЕКСПЕРИМЕНТУ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ПУСКОВИХ ЯКОСТЕЙ АВТОМОБІЛЬНОГО ДИЗЕЛЯ

У статті зазначено шлях вирішення проблеми підвищення пускових якостей і зниження димності відпрацьованих газів вітчизняного автомобільного дизеля 4ДТНА1 з безпосереднім впорскуванням палива при низьких температурах навколишнього середовища шляхом оптимізації параметрів і елементів системи пуску та роботи на холостому ході за раціональними алгоритмами. Для вирішення цієї проблеми обґрунтована необхідність в проведенні експериментального дослідження пускових якостей автомобільного дизеля та в формуванні математичного плану експерименту для проведення наступного розрахункового дослідження. Висвітлено основні положення щодо організації багатофакторного експериментального дослідження пускових якостей автомобільного дизеля. Зроблено опис та дані характеристики попередньо створеної для експериментального дослідження фізичної моделі на базі вітчизняного автомобільного вихрекамерного дизеля 4ДТНА. Наведено особливості і переваги створеної фізичної моделі щодо традиційних рішень для дослідження пускових якостей автомобільних двигунів, зокрема у використанні зовнішнього навантаження для відтворення впливу на моторне масло низької температури в умовах важкого доступу до кліматичних камер. Обґрунтований вибір саме вихрекамерного зразка фізичної моделі для проведення досліджень пуску через перспективну, знижену на 1-1,5 одиниці, ступінь стиснення та можливість якісного дослідження впливу передпускового підігріву обсягу камери згоряння свічкою розжарювання. Позначені дійсні значення величин обраних 6-ти, найбільш впливових на процес пуску, лінійно незалежних факторів під час проведення експериментального дослідження згідно з прийнятим планом з 77 заліковими холодними пусками. Відзначено, що фактичний результат встановлення певних керованих факторів носить випадковий характер з певною похибкою на границях точного значення відповідно до ортогонального плану експерименту. Таке варіювання дійсних величин вимагає застосування спеціального математичного апарату, реалізованого авторами в програмному продукті *Approximation_LSM*, при проведенні аналізу результатів 6-ти факторного експериментального дослідження.

Ключові слова: пуск дизеля; багатофакторне дослідження; експеримент; фізична модель; план експерименту.

Вступ

Останнє десятиліття достатньо відомі в Україні організації двигунобудівної галузі ведуть науко-

ве забезпечення реалізації державного інноваційно-інвестиційного проєкту "Слобожанський дизель" [1]. Об'єктами цього проєкту є сімейство вітчизня-