

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ПРАЦЕЗДАТНОСТІ УДОСКОНАЛЕННОЇ МЕТОДИКИ ВИБОРУ КРОКУ ДИСКРЕТИЗАЦІЇ ІНДИКАТОРНИХ ДІАГРАМ

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Однією з найважливіших цілей проведення експериментальних досліджень є перевірка теоретичних положень (підтвердження робочої гіпотези). Очевидно, що разом з досконалими засобами вимірювання повинні застосовуватися й раціональні методики проведення випробувань та оброблення отриманих результатів. Відзначено, що під час індицирування двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) важливо враховувати особливості перебігу швидкозмінних та нестационарних процесів у ДВЗ: високі швидкості перебігу процесів, широкий частотний спектр, неідентичність процесів від циклу до циклу. Це обумовлює специфічні вимоги методичного плану і до самих вимірювальних засобів щодо швидкодії, періодичності запису, і до раціональності методик проведення експериментальних досліджень. Показано, що для дослідження ДВЗ необхідно мати як одноциклові індикаторні діаграми, так і осереднену, за кілька сотень циклів, індикаторну діаграму. Показано, що для реєстрації ординат тиску індикаторної діаграми необхідно мати науково обґрунтовану методику їхніх вимірювань. Визначені загальні риси експерименту для отримання індикаторної діаграми, що забезпечують бажану точність та достовірність її отримання. Метою роботи є експериментальна перевірка працездатності вдосконаленої методики вибору кроку дискретизації та вибору кількості реєстрованих ординат індикаторної діаграми ДВЗ за один робочий цикл, залежно від похибки апроксимації та швидкості наростання тиску. Наведено загальну методику визначення частоти дискретизації індикаторних діаграм залежно від необхідної точності її апроксимації та вдосконалений вираз для її визначення. Показано схему визначення частоти дискретизації за кутом повороту колінчастого валу. Розглянуто суть вдосконаленої методики вибору кроку дискретизації індикаторної діаграми шляхом поділу її на зони та вибору різних кроків дискретизації у кожній зоні. Розглянуто застосування цифрового мікропроцесорного комплексу для дослідження робочих процесів конкретного дизельного ДВЗ. Визначено вихідні дані та результати розрахунків кутів дискретизації, необхідні для проведення експерименту. Розглянуто варіанти зміни кроку дискретизації. Доведено справедливості наведених виразів для індикаторної діаграми згладженою політропою. Наведено схему визначення похибки відновлення індикаторної діаграми методом кусково-лінійної апроксимації. Розраховано похибки апроксимації за експериментальними даними, які підтвердили правильність і прийнятність як запропонованого виразу для вибору необхідного кроку дискретизації, так і запропонованої методики отримання індикаторних діаграм у цифрових методах та засобах контролю параметрів ДВЗ.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння, індикаторна діаграма, крок дискретизації, експериментальні дослідження, апроксимація, похибка.

Вступ

Найважливішою складовою частиною наукових досліджень під час створення та удосконалення двигунів внутрішнього згоряння є експеримент. Це один з основних способів отримання нових знань про окремі характеристики і параметри та загальний стан двигунів. Основною метою таких експериментів є або визначення кількісних характеристик і ширше та глибше вивчення предмету дослідження, або перевірка теоретичних положень (підтвердження робочої гіпотези) [1]. Водночас разом зі спеціальними і досконалими засобами автоматичного вимірювання, контролю та іншими факторами, повинні застосовуватися й раціональні методи проведення випробувань та оброблення отриманих результатів [2].

Для проведення експериментів потрібна методика, що містить комплекс зв'язаних між собою одночасних вимірювань. Так, під час індицирування ДВЗ важливо враховувати особливості пере-

бігу швидкозмінних та нестационарних процесів у ДВЗ: високі швидкості зміни процесів, широкий частотний спектр, неідентичність перебігу процесів у кожному циклі. Це зумовлює специфічні вимоги методичного плану як до самих вимірювальних засобів: швидкодії, періодичності запису, необхідного об'єму пам'яті, так і до раціональності методик проведення експериментальних досліджень [3].

Постановка проблеми

Питання дослідження точності та достовірності отриманих результатів визначення тиску в циліндрі ДВЗ та інших швидкозмінних величин не нові, та регулярно досліджуються різними українськими та закордонними авторами [4]—[6]. Однією з найскладніших задач у дослідженні робочих процесів двигунів є отримання достовірної індикаторної діаграми (ІД) за заданою точністю [3], [7], [8].

Найчастіше в експериментальних дослідженнях користуються розгорнутою індикаторною діаграмою, що є залежністю тиску в циліндрі від кута повороту колінчастого валу (к.п.к.в.), тобто $P = f(\varphi)$ [9], [10]. За такої умови необхідно враховувати, по-перше то, що для дослідження двигунів на перехідних режимах необхідно мати одиночні (одноциклові) індикаторні діаграми. Для цього необхідно визначити дискретні значення ординат тиску, а потім апроксимувати безперервну функцію $P = f(\varphi)$ за отриманими значеннями ординат тиску. У цьому випадку необхідно мати стільки ординат тиску за один робочий цикл, щоб безперервна функція (індикаторна діаграма) відновлювалася із заданою похибкою [8], [11]. По-друге, для визначення основних показників двигуна на встановлених режимах необхідно мати осереднену індикаторну діаграму, яку слід отримувати шляхом статистичного оброблення ординат тиску за багато циклів роботи, тому що всі індикаторні діаграми відрізняються від циклу до циклу за рахунок різного продування, різної якості робочої суміші, різного моменту займання та інших факторів [8], [11], [12].

Таким чином, необхідно розв'язувати дві задачі для отримання достовірних індикаторних діаграм із заданою точністю: який необхідно вибирати крок дискретизації ІД і скільки циклів необхідно для усереднення ІД. Активний розвиток мікропроцесорних технологій та програмного забезпечення дозволив створити цифрові діагностичні комплекси, які спрощують та автоматизують процеси дослідження двигунів на перехідних режимах та дослідження основних показників двигуна на встановлених режимах [13]. Але у всіх випадках необхідно мати науково обґрунтовану методику цих вимірювань.

До того ж, щоб отримані індикаторні діаграми забезпечували бажану точність та достовірність, процеси їхньої реєстрації повинні характеризуватися деякими рисами, спільними для будь якого експерименту незалежно від того, в якій конкретній галузі знань він проводиться. Такими загальними рисами є необхідність [1], [2], [4], [5]:

- зменшувати до розумних меж кількість вимірювань в експерименті;
- перевіряти правильність отриманих результатів та їхню точність;
- вибирати спосіб оброблення експериментальних даних і форму представлення результатів;
- аналізувати отримані результати та інтерпретувати їх в термінах тієї області, де експеримент проводиться.

Тому кожному пропоновану методику, пов'язану з кількістю вимірювань за робочий цикл, та методику вибору кроку дискретизації індикаторних діаграм, необхідно перевіряти щодо виконання цих вимог.

Метою роботи є перевірка експериментальним шляхом працездатності удосконаленої методики вибору кроку дискретизації індикаторних діаграм ДВЗ за цифрових методів індицирування, залежно від похибки апроксимації та швидкості наростання тиску.

Основна частина

У роботі автора [14] показано, що вибір кількості реєстрованих ординат під час індицирування двигунів за допомогою цифрової техніки викликає труднощі. Це пов'язано з тим, що для перетворення такої безперервної в часі функції, як тиск у циліндрі, у ряд дискретних значень з певною частотою дискретизації, необхідно мати залежність частоти дискретизації f_g від заданої похибки апроксимації та швидкості наростання тиску в циліндрі, яка зумовлює частотний спектр ІД. Отже, вибір частоти дискретизації найраціональніше проводити за наявності ІД та відомою швидкістю наростання тиску.

Також доведено, що на основі цих умов крок дискретизації частоти за кутом повороту колінча-

стого валу можна визначати за виразом

$$\varphi_g = 2\varphi_x \sqrt{\frac{\delta P_{an}}{|P(\varphi_x) - P'(\varphi_0) \cdot (\varphi_x - P(\varphi_0))|}} \quad (1)$$

де φ_x — інтервал, що відповідає вибраній ділянці функції зміни тиску на ІД; $P(\varphi_x)$ — тиск наприкінці розглянутого інтервалу; $P'(\varphi_0)$ — значення першої похідної тиску, тобто швидкість наростання тиску на початку вибраного інтервалу; $P(\varphi_0)$ — тиск на початку розглянутого інтервалу; δP_{an} — задана абсолютна похибка апроксимації.

Добре відомо, що швидкість наростання тиску різних ділянках діаграми різна [9]. Тому для отримання діаграми із заданою точністю всю діаграму можна розподілити на зони і в кожній зоні визначати дискретні значення тиску з різним кроком дискретизації.

Суть доопрацювання методики реєстрації ІД ось у чому.

Зона ІД з високочастотним спектром, що вимагає мінімального кроку дискретизації, охоплює приблизно 45 град. п.к.в. До того ж, на ІД можна виділити ще 6—7 ділянок, швидкість наростання тиску на кожній з яких приблизно однакова. Враховуючи, що сучасні мікропроцесори, на базі яких створюються контрольно-діагностичні системи ДВЗ, мають зазвичай 8 розрядів або кратну їм кількість, вважається досить зручним розділити ІД робочого ходу на 8 інтервалів однакової протяжності за кутом повороту колінчастого валу: 180—225; 226—270; 271—315; 316—360; 361—405; 406—495; 496—540 град. п.к.в., а потім визначати необхідний кут дискретизації у кожному з цих інтервалів. В подальшому для зручності називатимемо кожен інтервал зоною зі своїм порядковим номером, до прикладу, зона 1, зона 2 тощо.

В роботі [14] показано також, як цифровий мікропроцесорний вимірювальний комплекс може використовуватися для дослідження робочих процесів середньооборотного одноциліндрового дизеля 14Н26/34. Загальний вигляд індикаторної діаграми, знятої за допомогою стробоскопічного індикатора на дизелі 14Н26/34, коли $N_e = 184$ кВт та $n = 750$ хв⁻¹, показано на рис. 1 [6]. Там же наведено функцію зміни швидкості наростання тиску, і показано розбивку ІД на зони. З цієї діаграми за рівнянням (9) визначено необхідні кути дискретизації кожної такої зони. Задавалася абсолютна похибка апроксимації $\Delta_{an} = 0,25$ від P_{max} , де P_{max} — максимальний тиск на вибраній ділянці. Тоді $\delta P_{an} = 0,0025 P_{max}$, а відносна похибка апроксимації становитиме $\delta_{an} = 0,25$ %.

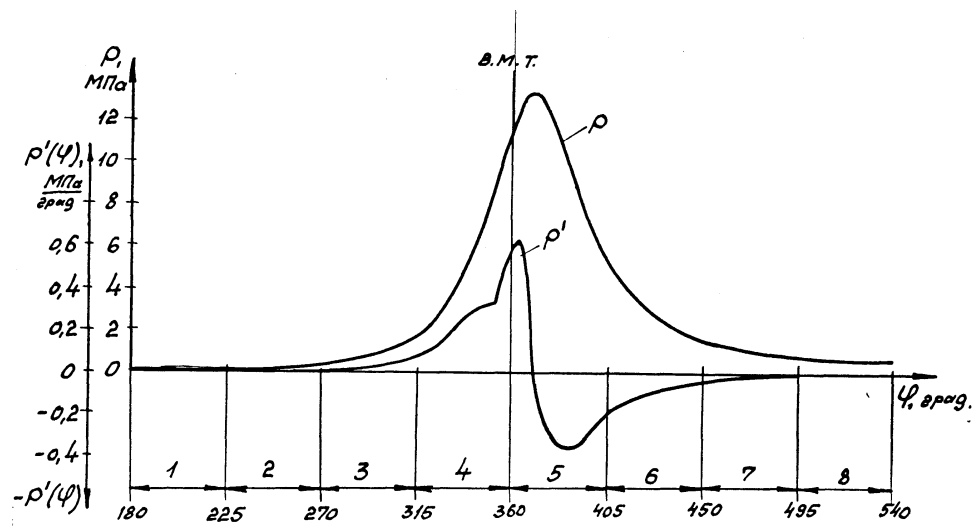


Рис. 1. Індикаторна діаграма та швидкість наростання тиску в циліндрі дизеля 14Н26/34, коли $N_e = 184$ кВт та $n = 750$ хв⁻¹

Вибираючи похибки, керувалися правилом про «нехтовні похибки» [11]. Виходячи з цього правила, вибрано допустиму величину відносної похибки апроксимації. Оскільки клас точності сучасних цифрових приладів досить високий, сумарна похибка вимірювального каналу може становити 1...1,5 %, то 0,25 % від P_{max} і є похибкою у 4—5 разів меншою за похибку вимірювального каналу.

Вихідні дані для розрахунку необхідного кута дискретизації ІД за умови заданої похибки відновлення ІД, а також результати розрахунку φ_g подано у табл. 1.

Таблиця 1

**Вихідні дані та результати визначення необхідного кута дискретизації
за умови заданої похибки апроксимації ІД**

Ділянка ІД, град.	№ зони ІД	P_{\max} , МПа	$P(\varphi_s)$, МПа	$P/(\varphi_0)$, МПа/град	$P(\varphi_0)$, МПа	φ_q розрахований	φ_q реалізований
180—225	1	0,247	0,247	0,001	0,214	16,0	16
226—270	2	0,375	0,375	0,004	0,247	10,3	8
271—315	3	1,634	1,634	0,016	0,375	7,1	4
316—360	4	11,472	11,472	0,062	1,634	3,7	2
361—405	5	13,285	5,469	0,580	11,472	2,8	2
406—450	6	5,469	1,537	-0,170	5,469	5,7	4
451—495	7	1,537	0,800	-0,031	1,537	7,8	8
496—540	8	0,800	0,498	-0,011	0,800	9,2	8

З цих даних випливає, що для дизеля 1СН26/34 на певному конкретному режимі, враховуючи конкретно задану похибку апроксимації відновлення безперервної ІД, необхідний кут дискретизації на різних ділянках ІД змінюється в межах 2,8...16,0 град. к.п.к.в.

Справедливість теоретичних положень і саму запропоновану методику, наведені в роботі [14], необхідно перевірити на практиці. З метою перевірки на працездатність методики вибору кроку дискретизації індикаторних діаграм у цифрових методах індицирування ДВЗ проведено експериментальні дослідження.

Оскільки реалізувати за допомогою відмітника п.к.в. відмітки дробових кутів п.к.в. без застосування спецзасобів важко, можна мати відмітник п.к.в. з постійним мінімальним кроком дискретизації 0,5 чи 1 град. п.к.в., а потім програмно або за допомогою апаратних засобів розріджувати позначки п.к.в. шляхом багаторазового поділу вихідної серії відміток на 2. Таким чином нескладно реалізувати кути дискретизації, що відповідають 0,5; 1; 2; 4; 8; 16 та ін. град. п.к.в. За потреби програмно можна встановити будь-який крок дискретизації. Потім за допомогою комутатора можна забезпечити постійний крок дискретизації кожної зони, в межах одного робочого циклу. В останній графі табл.1 подано реальні кути дискретизації для кожної зони, за яких надалі індикувався дизельний ДВЗ у цьому режимі.

Таким чином можна забезпечувати індицирування зі змінним кроком як робочого ходу (від позначки н.м.т., що відповідає 180 град. п.к.в., до позначки н.м.т., що відповідає 540 град. п.к.в.), так і всього циклу (від в.м.т. — 0 град. п.к.в до в.м.т. — 720 град. п.к.в.) чотиритактного двигуна. Природно, що індицирування двотактного двигуна має відбуватися у всьому робочому циклу. У зв'язку з цим повний робочий цикл для чотиритактного двигуна, з урахуванням вимог, описаних вище до ІД робочого ходу, є доцільним розбити на 8 рівних зон, а саме: 1-ша зона — 0...90; 2-га зона — 90...180; 3-тя зона — 180...270; 4-та зона — 270...360; 5-та зона — 360...450; 6-та зона — 450...540; 7-ма зона — 540...630 та 8-ма зона — 630...720 град. п.к.в.

У табл. 2 подано приклади можливої реалізації отримання ІД з різним кутом дискретизації за зонами ІД робочого ходу. Так, варіант 2 передбачає індицирування робочого ходу з кроком кута дискретизації, що відповідає розрахованому у вищенаведеному прикладі. Варіанти 3, 4 та 6, за допомогою яких можна реєструвати ординати лише в одній зоні найбільших відхилень ІД — 360...405 град. п.к.в., але з різним кроком 4, 8 та 16 град. п.к.в., дозволяють накопичити великий масив ординат для статичної обробки.

Таблиця 2

Приклади варіантів з різними кутами дискретизації ІД

Ділянка ІД, град.	Зона ІД	φ_g , град					
		варіант 1	варіант 2	варіант 3	варіант 4	варіант 5	варіант 6
180—225	1	8	16	—	—	—	—
225—270	2	4	8	—	—	—	—
270—315	3	2	4	—	—	—	—
315—360	4	1	2	—	—	8	—
360—405	5	1	2	4	8	8	16

Ділянка ІД, град.	Зона ІД	φ_g , град					
		варіант 1	варіант 2	варіант 3	варіант 4	варіант 5	варіант 6
405—450	6	2	4	—	—	—	—
450—495	7	4	8	—	—	—	—
495—540	8	4	8	—	—	—	—

За допомогою варіантів завдання різних кроків дискретизації по зонах, поданих у табл. 3, можна передбачити можливість отримання повної індикаторної діаграми з різним кутом дискретизації, з метою отримання діаграми насосних ходів, стиснення–розширення, коригування істинної в.м.т. та інших цілей.

Таблиця 3

Приклади варіантів з різними кутами дискретизації ІД повного циклу дизеля

Ділянка ІД, град	Зона ІД	φ_g , град		
		варіант 7	варіант 8	варіант 9
0—90	1	8	16	16
90—180	2	8	16	16
180—270	3	4	8	8
270—360	4	1	2	4
360—450	5	1	2	4
450—540	6	4	8	8
540—630	7	8	16	16
630—720	8	8	16	16

Крок дискретизації безперервних функцій $P = f(\varphi)$, тобто ІД, у всіх вищенаведених таблицях визначався із заданою похибкою апроксимації відновлення безперервної функції на підставі виразу (1).

Експериментально підтверджено справедливість виразу (1), отриманого теоретичним шляхом. Для цього достатньо визначити похибку апроксимації відновлення безперервної функції Δ_{an} за її наявними дискретними значеннями.

Визначення Δ_{an} можна виконати експериментальним шляхом тільки в тому випадку, якщо крок дискретизації вибрано меншим ніж потрібно. Тоді для отримання безперервної функції необхідно апроксимувати значення вимірних ординат не підряд, а через одну, дві тощо, залежно від того, у скільки разів істинний крок дискретизації менше потрібного за виразом (9). Водночас, продовживши проміжну ординату до перетину з апроксимованою безперервною функцією, отримаємо значення нової ординати P_{an} , яка і буде відрізнятися від значення істинної ординати P на величину Δ_{an} .

Попередньо необхідно переконатися у справедливості виразу (9) для ділянки стиснення ІД згладженого політропою

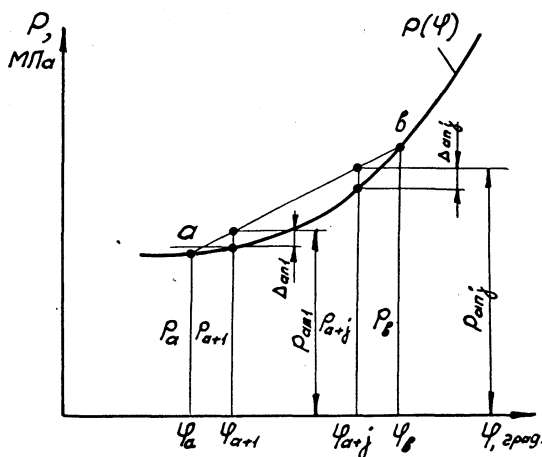


Рис. 2. Схема визначення похибки відновлення індикаторної діаграми методом кусково-лінійної апроксимації

$$P = P_a \left(\frac{V_a}{\tilde{V}} \right)^{nc}, \quad (2)$$

де P і \tilde{V} — поточний тиск та об'єм циліндра відповідно; P_a і V_a — тиск та об'єм циліндра, у точці, прийнятої за початок відліку; nc — показник політропи (для дослідного дизеля 1ЧН26/34 $nc = 1,37$).

На рис. 2 показана безперервна функція $P = f(\varphi)$ на ділянці стиснення, згладжена політропою (2).

Якщо ця функція на ділянці ab апроксимується прямою, то похибка апроксимації Δ_{an} за цієї умови буде найбільшою на тих ділянках, де другий модуль похідної досягає найбільшого значення. Маючи значення проміжних ординат тиску P_{a+1}, \dots, P_{a+j} і визначивши значення ординат, отриманих у результаті апроксимації P_{an}, \dots, P_{anj} , можна визначити похибку, що

виникає в результаті апроксимації, як різницю $P_{an1} - P_{a+1}, \dots, P_{anj} - P_{an+j}$ [12]. Значення P_{anj} можна визначити за формулою, наведеною у роботі [8]

$$P_{anj} = P_{an} + \frac{P_b + P_a}{m} \cdot m_j, \quad (3)$$

де m — кількість проміжних рівних інтервалів,

$$m_j = 1, 2, 3, \dots, m.$$

Тоді абсолютна похибка будь-якої ординати тиску P_j , що знаходиться всередині ділянки av

$$\Delta_{anj} = P_a + \frac{P_b - P_a}{m} \cdot m_j - P_j. \quad (4)$$

Похибка апроксимації дійсної функції $P = f(\varphi)$, тобто експериментально отриманої ІД, можна знайти з виразу (4), підставляючи значення ординат P_a і P_b , за якими проводиться апроксимація і проміжних ординат P_j .

Відносну похибку апроксимації отримуємо за формулою

$$\delta_{anj} = \frac{\Delta_{anj}}{P_j} \cdot 100 \%. \quad (5)$$

Експериментальне підтвердження виразу (1), яким визначався необхідний крок дискретизації, проводилося шляхом визначення дійсної похибки відновлення дискретної середньої ІД методом кусково-лінійної апроксимації.

Розрахункові значення необхідного кута дискретизації ІД дизеля 1ЧН26/34 на номінальному режимі із заданою похибкою відновлення $\delta_{an} = 0,25 \%$, подані в табл. 1. З метою експериментальної перевірки виразу (1) отримано середню за 100 циклів ІД [13] з кроком дискретизації на робочому ході $\varphi_g = 1$ град. п.к.в.

Визначення δ_{an} проводилося у два етапи. Спочатку на підставі виразу (2) побудовано розрахункову ІД. Кусково-лінійна апроксимація розрахункової ІД проводилася за ординатами, відповідними розрахунковому кроку дискретизації. Для всіх проміжних ординат з кроком дискретизації, рівним 1 град. п.к.в., за формулою (4) визначено абсолютну похибку відновлення Δ_{an} , а за формулою (5) — відносну похибку δ_{an} .

На другому етапі знаходилася Δ_{an} і δ_{an} для ІД апроксимованої за експериментальними значеннями ординат.

Як приклад, у табл. 4 зведені результати розрахунку похибки апроксимації за експериментальними даними на ділянці згоряння. Причому похибки визначені і для ІД відновленої як безперервна функція $P = f(\varphi)$, за ординатами з необхідним кроком дискретизації $\varphi_g = 2$ град. п.к.в., так і для ІД з кроком дискретизації, свідомо більшим розрахункового, коли $\varphi_g = 4$ град. п.к.в. Видно, що на ділянці згоряння розрахунковий крок дискретизації забезпечує необхідну похибку не більше 0,25 %. Зауважимо, що у разі відновлення ІД, зареєстрованої з свідомо великим кроком, похибка перевищує задану.

Таблиця 4

До визначення похибки відновлення індикаторної діаграми дільниці згоряння

φ_g , град	P , МПа	$\varphi_g = 2$ град. п.к.в.			$\varphi_g = 4$ град. п.к.в.		
		φ_g , град.	$ \Delta_{an} $, МПа	δ_{an} , %	φ_g , град.	$ \Delta_{an} $, МПа	δ_{an} , %
360	10,540	360	—	—	360	—	—
361	10,656	—	0,0070	0,06	—	—	—
362	10,758	362	—	—	—	0,0150	0,14
363	10,874	—	0,0020	0,02	—	—	—
364	10,986	364	—	—	364	—	—
365	11,076	—	0,0170	0,15	—	—	—
366	11,132	366	—	—	—	0,0595	0,53
367	11,161	—	0,0155	0,13	—	—	—
368	11,158	368	—	—	368	—	—
369	11,139	—	0,0125	0,19	—	—	—
370	11,076	370	—	—	—	0,0250	0,23

φ_g , град	P , МПа	$\varphi_g = 2$ град. п.к.в.			$\varphi_g = 4$ град. п.к.в.		
		φ_g , град.	$ \Delta_{an} $, МПа	δ_{an} , %	φ_g , град.	$ \Delta_{an} $, МПа	δ_{an} , %
371	11,028	—	0,0185	0,16	—	—	—
372	10,948	372	—	—	372	—	—
373	10,834	—	0,0275	0,24	—	—	—
374	10,776	374	—	—	—	0,0355	0,33
375	10,681	—	0,0240	0,22	—	—	—
376	10,538	376	—	—	376	—	—
377	10,401	—	0,0160	0,15	—	—	—
378	10,232	378	—	—	—	0,0410	0,40
379	10,048	—	0,0100	0,10	—	—	—
380	9,844	380	—	—	380	—	—

Таким чином, експериментальне дослідження підтверджує прийнятність як запропонованого виразу (1) для пошуку необхідного кроку дискретизації, так і запропонованої методики вибору кроку дискретизації індикаторних діаграм у цифрових методах та засобах контролю параметрів ДВЗ.

Висновки

1. Запропоновано методику експериментального визначення похибки відновлення індикаторної діаграми, де як метод інтерполювання функції за її вимірними дискретними значеннями вибрано метод кусково-лінійної апроксимації.

2. Експериментально підтверджено справедливість та правомірність отриманої аналітичної залежності кроку дискретизації від похибки апроксимації та швидкості наростання тиску.

3. Експериментально доведено, що вдосконалена методика вибору кількості реєстрованих ординат індикаторних діаграм ДВЗ, тобто, вибору кроку дискретизації у разі їхньої цифрової реєстрації, працездатна та ефективна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] С. Е. Важинський, і Т. І. Щербак, *Методика та організація наукових досліджень*. Суми, Україна: СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2016, 260 с.
- [2] Г. Б. Параска, Д. В. Прибега, і П. С. Майдан, *Методи та засоби експериментальних досліджень*. Київ, Україна: Кондор-Видавництво, 2017, 138 с.
- [3] Р. А. Варбанец, «Диагностический контроль рабочего процесса судовых дизелей в эксплуатации.» дис. докт. техн. наук: 05.05.03, Одесская нац. морск. акад., Одесса, 2010, 314 с.
- [4] С. І. Крижанівський, С. І. Криштопа, Л. І. Криштопа, М. М. Гнип, і І. М. Микитій, «Експериментальні дослідження показників дизельного двигуна за умови його роботи на біометанолі,» *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*, вип. 86, т. 1, с. 90-100, 2019.
- [5] Г. С. Гудз, М. В. Глобчак, О. Й. Коцюмбас, і О. Р. Клипко, «Експериментальні дослідження теплових режимів гільзи циліндрів та охолодника ДВЗ,» *Наукові нотатки*, вип. 36, с. 73-77, 2012.
- [6] М. І. Міщенко, В. Л. Супрун, і В. В. Шинкаренко, «Теоретичні дослідження робочого процесу механізму зміни ступеня стиску в бензиновому двигуні,» *Двигатели внутреннего сгорания*, № 2, с. 60-64, 2008.
- [7] О. В. Орисенко, і А. І. Криворот, «Дослідження індикаторних та ефективних показників двигуна ЗМЗ-4026 при роботі на традиційному й альтернативному паливі,» *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво) Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка*, вип. 1 (29), с. 53-56, 2011.
- [8] А. Н. Пойда «Основные принципы индцирования двигателей дискретными устройствами,» *Двигателестроение*, № 8, с. 24-27, 1982.
- [9] А. П. Марченко, і А. Ф. Шеховцо в, *Двигуни внутрішнього згорання*: Серія підручників у 6 т., т. 3. *Комп'ютерні системи керування ДВЗ*. Харків, Україна: Видавн. центр НТУ «ХПІ», 2004.
- [10] Ф. І. Абрамчук, Ю. Ф. Гутаревич, К. Є. Долганов, і І. І. Тимченко, *Автомобільні двигуни* Київ, Україна: Арістей, 2006, 476 с.
- [11] В. Г. Григорьев, і Е. И. Беспалова, «Статические исследования колебаний максимальных давлений сгорания,» *Двигателестроение*, № 6, с. 17-18, 1986.
- [12] Д. В. Левченко, «Усреднения индикаторных диаграм ДВЗ, снятых современными цифровыми системами реестрации,» *Автомобильный транспорт*, вип. 41, с. 71-76, 2017.
- [13] Є. В. Білоусов, А. П. Марченко, М. Є. Рибальченко, В. П. Савчук, і Г. Я. Тулущенко, «Розробка методів оцінки технічного стану двигунів за результатами індицивання робочого процесу на режимах відмінних від номінальних,» *Двигуни внутрішнього згорання*, № 1, с. 51-59, 2022.
- [14] Ю. О. Смолін «Методика вибору кроку дискретизації індикаторних діаграм при цифрових методах контролю параметрів ДВЗ,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2 (167), с. 119-124, 2023.

Смолін Юрій Олександрович — канд. техн. наук, доцент, професор кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики, e-mail: uas8735@gmail.com .

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Yu. O. Smolin¹

Experimental Verification of the Performance of the Improved Method of Choosing the Discretization Step of Indicator Diagrams

¹National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

It is shown that the most important component of scientific research is the experiment. One of the most important purposes of its conduct is the verification of theoretical provisions (confirmation of the working hypothesis). It has been proven that together with perfect measuring tools, rational methods of conducting tests and processing the obtained results should be used. It was noted that when indicating the ICE, it is important to take into account the peculiarities of the course of rapidly changing and non-stationary processes in the ICE: high rates of change of processes, wide frequency spectrum, non-identity of the course of processes from cycle to cycle. This determines the specific requirements of the methodical plan and to the measuring devices themselves in terms of speed, frequency of recording, and the rationality of the methods of conducting experimental research. It has been proven that when researching engines, it is necessary to have both single-cycle indicator diagrams and an averaged, over several hundred, indicator diagram. It is shown that when registering the pressure ordinates of the indicator diagram, it is necessary to have a scientifically based method of their measurements. The general features of the experiment when obtaining the indicator diagram are determined, which ensure the desired accuracy and reliability of its receipt. It is shown that the purpose of the work is to experimentally verify the performance of the improved method of choosing the discretization step and choosing the number of registered ordinates of the indicator diagram of the ICE in one working cycle, depending on the approximation error and the pressure build-up rate. The general method of determining the frequency of discretization of indicator diagrams depending on the required accuracy of its approximation and the improved expression for its determination are presented. The scheme for determining the sampling frequency by the angle of rotation of the crankshaft is presented. The essence of the improved method of choosing the discretization step of the indicator diagram is considered, by dividing it into zones and choosing different discretization steps in each zone. The use of a digital microprocessor complex for the study of working processes of a specific diesel engine is considered. The initial data and the results of the calculations of the discretization angles, necessary for conducting the experiment, were determined. Options for changing the discretization step are considered. The validity of the given expressions for the indicator diagram with a smoothed polytrope is proved. The scheme for determining the error of restoration of the indicator diagram by the method of piecewise linear approximation is given. Approximation errors were calculated based on experimental data, which confirmed the correctness and acceptability of both the proposed expression for finding the necessary discretization step and the proposed method of obtaining indicator diagrams using digital methods and means of controlling the parameters of the internal combustion engine.

Keywords: internal combustion engine, indicator diagram, discretization step, experimental studies, approximation, error.

Smolin Yurii O. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Chair of Computer and Radio-Electronic System, e-mail: uas8735@gmail.com