

МЕТОДИКА ВИБОРУ КРОКУ ДИСКРЕТИЗАЦІЇ ІНДИКАТОРНИХ ДІАГРАМ У ЦИФРОВИХ МЕТОДАХ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ДВЗ

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Розглянуто особливості використання вимірювальної апаратури в галузі двигунів внутрішнього згоряння та раціональність методів проведення випробувань і обробки отриманих результатів. Показано, що однією з найскладніших задач під час дослідження робочих процесів двигунів є отримання достовірної індикаторної діаграми із заданою точністю. Зауважено, що потрібно враховувати особливості перебігу швидкозмінних та нестационарних процесів у ДВЗ: високі швидкості зміни процесів, широкий частотний спектр, неідентичність перебігу процесів від циклу до циклу. Це зумовлює специфічні вимоги методичного плану і до самих вимірювальних засобів з швидкодії, періодичності запису, і до раціональності методик проведення експериментальних досліджень. Доведено, що під час дослідження двигунів необхідно мати як одноциклові індикаторні діаграми, так і усереднену, за кілька сотень діаграм, індикаторну діаграму. Показано, що метою роботи є вдосконалення методики вибору кроку дискретизації та вибору кількості реєстрованих ординат індикаторної діаграми ДВЗ за один робочий цикл, залежно від похибки апроксимації та швидкості наростання тиску. Описано загальну методику визначення частоти дискретизації індикаторних діаграм залежно від необхідної точності її апроксимації та вдосконалені вирази для її визначення. Показано схему визначення частоти дискретизації за кутом повороту колінчастого валу. Докладно розглянуто суть вдосконалення 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 дизеля. Визначено вихідні дані та величини кутів дискретизації, необхідні для проведення експерименту.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння, індикаторна діаграма, крок дискретизації.

Вступ

Дедалі більша кількість величин у всіх галузях науки та техніки у XXI столітті вимірюється та контролюється автоматичними приладами, які дозволяють вести вимірювання, контроль та обробку результатів за складними програмами та алгоритмами з урахуванням впливу різних зовнішніх та внутрішніх факторів. Не є винятком і випробування двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), де широко застосовуються автоматична вимірювальна апаратура на базі мікропроцесорної техніки [1], [2]. При цьому разом із досконалими засобами автоматичного вимірювання, контролю та іншими факторами повинні застосовуватися раціональні методи проведення випробувань та обробки отриманих результатів.

Так, до прикладу, важливо враховувати особливості перебігу 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

Однією з найскладніших задач у дослідженні робочих процесів двигунів є отримання достовірної індикаторної діаграми (ІД) із заданою точністю [3]—[6].

Найчастіше під час експериментальних досліджень користуються розгорнутою індикаторною діаграмою — залежністю тиску в циліндрі від кута повороту колінчастого валу (к.п.к.в.), тобто

$P = f(\varphi)$ [4]. Існує два різні підходи отримання достовірних індикаторних діаграм із заданою точністю. По-перше, 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 [5], [6].

По-друге, для визначення основних показників двигуна на встановлених режимах необхідно мати усереднену індикаторну діаграму, яку слід отримувати шляхом статистичної обробки ординат тиску за багато циклів роботи, тому що всі індикаторні діаграми в різних циклах відрізняються за рахунок різного продування ДВЗ, різної якості робочої суміші, різного моменту займання та інших факторів [6], [7].

Таким чином, існує дві проблеми в отриманні достовірних індикаторних діаграм із заданою точністю: який необхідно вибирати крок дискретизації ІД і скільки циклів необхідно для усереднення ІД.

Мета роботи — удосконалення методики вибору кроку дискретизації та вибору кількості реєстрованих ординат індикаторної діаграми ДВЗ за один робочий цикл, залежно від похибки апроксимації та швидкості наростання тиску, а також експериментальне визначення одержуваної похибки апроксимації за запропонованою методикою.

Основна частина

Вибір числа реєстрованих ординат для 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.

У техніці зв'язку частоту дискретизації визначають, використовуючи теорему Котельникова, з якої випливає, що якщо функція зміни будь-якої величини безперервна у часі і має частоту вищих гармонік f_g , то за рівномірного кроку частота дискретизації

$$F_g \geq 2f_g. \quad (1)$$

Враховуючи, що частота обертання колінчастого вала двигуна та період повторення циклів пов'язані залежністю

$$T = \frac{\varphi}{6n}, \quad (2)$$

можна записати, що

$$T_g = \frac{\varphi_g}{6n}, \quad (3)$$

де T_g та φ_g — період та кут дискретизації.

Переходячи від періоду до частоти дискретизації, отримаємо

$$f_g \geq \frac{6n}{\varphi_g}. \quad (4)$$

Звідси, з урахуванням теореми Котельникова, можна записати, що

$$f_g \geq \frac{3n}{f_b}. \quad (5)$$

Однак скористатися формулою (5) для практичного визначення частоти дискретизації важко, тому що в кожному конкретному випадку необхідно визначити f_b .

Відомо, що для безперервних функцій, форма яких подібна синусоїді або експоненті, найдоцільніше застосовувати кусково-лінійну апроксимацію. Рівняння, за допомогою якого визначають частоту дискретизації за кусково-лінійним методом апроксимації, запропоновано роботах [8], [9]. Воно має вигляд

$$f_q = \sqrt{\frac{x''(\tau)_{\max}}{8\Delta_{an}}}, \quad (6)$$

де $x''(\tau)_{\max}$ — максимальне значення другої похідної функції; Δ_{an} — абсолютна похибка апроксимації.

Визначення другої похідної ІД з достатньою точністю дуже утруднено, тому користуватися рівнянням (6) для визначення частоти дискретизації практично неможливо.

У роботі [10] показано, що застосовуючи перетворення Лапласа, залежність (6) можна подати у вигляді

$$f_g = \frac{1}{2\tau} \sqrt{\frac{|x(\tau) - x'_0\tau - x_0|}{\Delta_{an}}}, \quad (7)$$

де x_0 і x'_0 — значення функції та її похідної у початковий момент відліку, коли $\tau = 0$, де τ — інтервал часу, що відповідає вибраній ділянці функції; $x(\tau)$ — значення функції наприкінці вибраної ділянки.

Там же показано, що стосовно індикаторної діаграми рівняння для визначення зміни частоти дискретизації за часом, має вигляд

$$f_g = \frac{1}{2\tau} \sqrt{\frac{|P(\tau) - P' \cdot \tau - P_0|}{\delta P_{an}}}, \quad (8)$$

або за кутом повороту колінчастого вала —

$$\varphi_g = 2\varphi_x \sqrt{\frac{\delta P_{an}}{|P(\varphi_x) - P'(\varphi_0) \cdot (\varphi_x) - P(\varphi_0)|}}, \quad (9)$$

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.

Схема визначення частоти дискретизації за кутом повороту колінчастого вала на різних ділянках ІД показана на рис. 1.

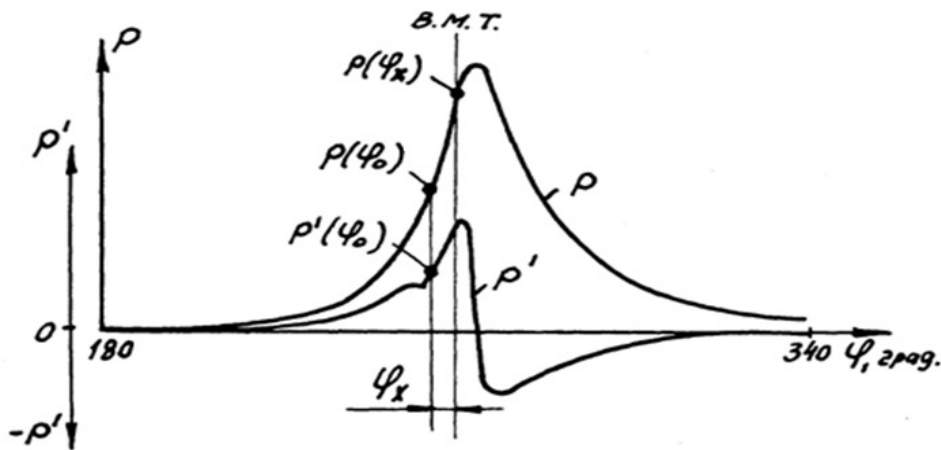


Рис. 1. Схема для визначення кута дискретизації на різних ділянках індикаторної діаграми: φ_x — інтервал, що відповідає вибраній ділянці; $P(\varphi_0)$ — тиск на початку розглянутого інтервалу; $P(\varphi_x)$ — тиск наприкінці вибраного інтервалу; $P'(\varphi_0)$ — швидкість наростання тиску на початку вибраного інтервалу

Рівняння (8) зручне для визначення максимальної частоти дискретизації, а отже — визначення необхідної швидкодії аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

А рівняння (9) слід визнати робочим, оскільки воно дозволяє встановити крок відліку ординат ІД на всьому робочому ході за вибраними ділянками в градусах повороту колінчастого вала.

Отже, вибір частоти дискретизації найраціональніше проводити за наявною ІД та швидкістю наростання тиску. Звідси випливає можливість доопрацювання та вдосконалення наведеної методики.

Відомо, і з рис. 1 видно, що швидкість наростання тиску різних ділянок діаграми різна. Тому для отримання діаграми із заданою точністю всю діаграму можна розділити на зони і в кожній зоні визначити 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. Крім того, на ІД можна виділити ще 6—7 ділянок, швидкість наростання тиску на кожній з яких приблизно однакова. Враховуючи при цьому, 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 визначити необхідний кут дискретизації у кожному з цих інтервалів. В подальшому для зручності називатимемо кожен інтервал — зоною зі своїм порядковим номером, наприклад, зона 1, зона 2 тощо.

Розглянемо, 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. 2 [6]. Там же наведено функцію зміни швидкості наростання тиску, і дано 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 $\delta_{an} = 0,25$ %.

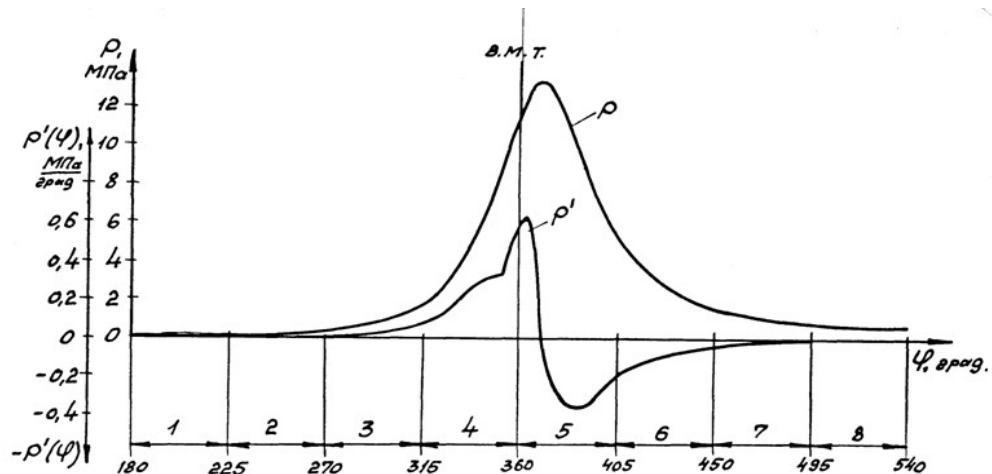


Рис. 2. Індикаторна діаграма та швидкість наростання тиску в циліндрі дизеля 14Н26/34, коли $N_e = 184$ кВт та $n = 750$ хв⁻¹

Під час вибору 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 похибки вимірювального каналу.

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

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

Ділянка ІД, град.	№ зони ІД	P_{\max} , МПа	$P(\varphi_x)$, МПа	$P'(\varphi_0)$, МПа/град	$P(\varphi_0)$, МПа	φ_q розрахунковий	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

Продовження таблиці

Ділянка ІД, град.	№ зони ІД	P_{\max} , МПа	$P(\varphi_x)$, МПа	$P/(\varphi_0)$, МПа/град	$P(\varphi_0)$, МПа	φ_q розрахунковий	φ_q реалізований
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 1ЧН26/34 на певному конкретному режимі, виходячи з конкретної заданої похибки апроксимації відновлення безперервної ІД, необхідний кут дискретизації на різних ділянках ІД змінюється в межах 2,8...16,0 град. к.п.к.в.

Висновки

Запропоновано методику отримання індикаторної діаграми цифровими методами, яка відрізняється від наявних:

- по-перше, тим, що пропонується весь робочий цикл поділити на кілька зон, залежно від швидкості наростання вимірюваної величини;
- по-друге, тим, що в кожній зоні пропонується встановити різний крок дискретизації, що забезпечує задану похибку відновлення безперервної вимірюваної величини.

Використання запропонованої методики дозволяє знизити вимоги до швидкодії і об'єму пам'яті мікропроцесорних систем контролю та діагностики, у випадках коли необхідно вимірювати й реєструвати одночасно і паралельно декілька процесів, що швидко змінюються і вимагають усереднення за сотні робочих циклів. Наприклад, тиск у циліндрах ДВЗ, температурні хвилі на вогняній поверхні деталей циліндро-поршневої групи, процеси упорскування палива тощо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] А. П. Марченко, і А. Ф. Шеховцов, «Комп'ютерні системи керування ДВЗ», *Двигуни внутрішнього згорання*. Харків, Україна: Видавн. центр НТУ «ХПІ», 2004, 429 с.
- [2] К. Ю. Федоровский, *Автоматический контроль и диагностика судовых дизелей*. Севастополь: СевНТУ, 2006, 56 с.
- [3] Р. А. Варбанец, «Диагностический контроль рабочего процесса судовых дизелей в эксплуатации.» : дис. д-ра техн. наук. Одесской национальной морской академии, Одесса, 2010.
- [4] Ф. І. Абрамчук, Ю. Ф. Гутаревич, К. Є. Долганов, і І. І. Тимченко, *Автомобільні двигуни*. Київ, Україна: Арістей, 2006, 476 с.
- [5] 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.
- [6] В. Г. Григорьев, и Е. И. Беспалова, «Статические исследования колебаний максимальных давлений сгорания», *Двигателестроение*, № 6, с. 17-18, 1986.
- [7] Д. В. Левченко, «Усреднения индикаторных диаграм ДВЗ, снятых современными цифровыми системами реєстрації», *Автомобильный транспорт*, № 41, с. 71-76, 2017.
- [8] П. П. Орнатский, *Теоретические основы информационно-измерительной техники*. Киев, Украина: Высш. шк., 1986, 432 с.
- [9] П. В. Новицкий, *Электрические измерения неэлектрических величин*. Ленинград: Энергия, 1985, 575 с.
- [10] А. Н. Пойда, «Основные принципы индексирования двигателей дискретными устройствами», *Двигателестроение*, № 8, с. 24-27, 1982.
- [11] Г. Д. Бурдун, и Б. Н. Марков, *Основы метрологии*. Москва: изд-во стандартов, 1985, 336 с.

Рекомендована кафедрою автомобілів та транспортного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 4.04.2023

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

Method for Selecting the Discretization Step of Indicator Diagrams in Digital Methods of Internal Combustion Engines Parameters Monitoring

¹National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

Peculiarities of measuring equipment usage in the field of internal combustion engines and the rationality of methods for testing and results processing are considered. It is shown that one of the most difficult tasks in the study of the working processes of engines is to obtain a reliable indicator diagram with a given accuracy. It is noted that it is important to consider the features of the flow of rapidly changing and non-stationary processes in the internal combustion engine: high rates of processes change, a wide frequency spectrum, non-identity flow of the processes flow from cycle to cycle. This causes specific requirements to the methodological plan, as well as to measuring instruments themselves in terms of speed, recording frequency and rationality of the techniques of performing the experimental studies. It is proved that in the process of the engines investigation it is necessary to have both single-cycle indicator diagram and averaged, for several hundreds cycles, indicator diagram. It is shown that the objective of the work is to improve the methodology for choosing the discretization step and choosing the number of recorded ordinates of the internal combustion engine indicator diagram during one working cycle, depending on the approximation error and the rate of pressure increase. A general method for determining the sampling frequency of indicator diagrams depending on the required accuracy of its approximation is described; improved expressions for its determination are given. A scheme for determining the sampling frequency by the angle of crankshaft rotation is presented. The essence of improving the methodology for choosing the discretization step of the indicator diagram by dividing it into zones and selecting different sampling steps in each zone is considered in detail. The use of a digital micro-processor complex for the study of the working processes of a particular diesel engine is considered. The initial data and values of discretization angles, necessary for the experiment were determined.

Keywords: internal combustion engine, indicator diagram, discretization step.

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