

УДК 621-43

УСЕРЕДНЕННЯ ІНДИКАТОРНИХ ДІАГРАМ ДВЗ, ЗНЯТИХ СУЧАСНИМИ ЦИФРОВИМИ СИСТЕМАМИ РЕЄСТРАЦІЇ

Д.В. Левченко, студ.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Запропоновано спосіб усереднення послідовно записаних індикаторних діаграм, знятих сучасними засобами реєстрації. Обґрунтовано необхідність усереднення діаграм для проведення подальшої їх обробки та отримання достовірних даних щодо теплового циклу в циліндрі. Приведено оцінку якості результату усереднення. Показано переваги наведеного способу.

Ключові слова: ДВЗ, індикаторна діаграма, усереднення даних, випробування ДВЗ, тиск у циліндрі ДВЗ.

УСРЕДНЕНИЕ ИНДИКАТОРНЫХ ДИАГРАММ ДВС, СНЯТЫХ ЦИФРОВЫМИ СИСТЕМАМИ РЕГИСТРАЦИИ

Д.В. Левченко, студ.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Предложен способ усреднения последовательно записанных индикаторных диаграмм, снятых современными средствами регистрации. Обоснована необходимость усреднения диаграмм для проведения дальнейшей их обработки и получения достоверных данных о тепловом цикле в цилиндре. Приведена оценка качества результата усреднения. Показаны преимущества приведенного способа.

Ключевые слова: ДВС, индикаторная диаграмма, усреднение данных, испытание ДВС, давление в цилиндре ДВС.

AVERAGING IC ENGINE INDICATOR DIAGRAMS RECORDED BY THE DIGITAL REGISTRATION SYSTEM

D. Levchenko, Student, Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. In this paper the first stage of processing the indicator diagrams, namely, averaging of a large number of cycles of consistently taken real indicator-diagrams is considered. The method gives high accuracy of averaging by a key (meaningful) parameter of the average indicator pressure. The method meets requirements of modern diagnostic systems and can be easily implemented in the specialized test bench.

Key words: IC engine, indicator diagram, averaging data, testing IC engine, in-cylinder pressure, digital signal, preparing test data, sampling error, elimination of unevenness.

Вступ

Індиціювання є одним з найбільш важливих і комплексних видів випробування двигуна внутрішнього згоряння. Індикаторні діаграми являють собою функціональну залежність миттєвого тиску в циліндрі від кута повороту

колінчастого вала та є основною характеристикою робочого циклу. Обробка індикаторних діаграм дозволяє визначити миттєві параметри робочого тіла та комплексні індикаторні показники циклу (p_i, η_i, N_i, g_i) . Сучасні системи реєстрації тиску згоряння дозволяють аналізувати процес згоряння

окремого циклу, однак для ефективної й достовірної оцінки середніх параметрів циклу двигуна необхідно обробляти велику кількість послідовних циклів на стаціонарному режимі.

З метою усереднення великої кількості статистичних даних та наступного використання отриманого результату для оцінки параметрів робочого циклу двигуна безпосередньо у процесі діагностики використовують програмовану мікропроцесорну техніку для безпосередньої обробки на випробувальних стендах чи програмної постобробки на персональних комп'ютерах,

Аналіз публікацій

Індикаторна діаграма використовується для отримання залежності, яка дозволяє розрахувати середній індикаторний тиск та індикаторний ККД робочого циклу, які характеризують енергетичні та екологічні показники двигуна [1, 4]. Існує багато методик обробки індикаторних діаграм. Це пов'язано із великою кількістю методів випробувань різних теплових циклів, використанням різних видів палива і прагненням до збільшення точності розрахунку. Однак вихідні дані для обробки значення тиску мають найбільший вплив на очікуваний результат.

Під час роботи двигуна умови формування суміші, повноти згоряння, подачі палива і регулювання систем запалювання (впорскування), безумовно, впливають на його вихідні параметри. Цикл від циклу параметри газу в циліндрі змінюються, і стає важко оцінити середні індикаторні показники й порівняти їх з результатами інших двигунів.

Реальні вимірювання дають значення миттєвого локального тиску, яке може відрізнитися від середнього в циліндрі. Турбулентні потоки суміші, вібрації частин камери згоряння і діафрагми датчика, вплив тиску струменя палива (для дизелів) призводять до коливань сигналу [1, 2]. Збурення, що генеруються коливаннями стовпа газу у сполучному каналі датчика тиску, можуть сильно спотворювати сигнал і давати неприпустиму похибку [1, 3]. Наприклад, у використаних даних індиціювання від циклу до циклу максимальний тиск у циліндрі змінювався в межах від 7,37 до 10,42 МПа (з урахуванням пропуску запалювання). Таким чином, при визначенні індика-

торної діаграми для отримання адекватного результату необхідно усереднювати порівняно велику кількість експериментальних даних тиску, записаних у ряді вимірюваних циклів, щоб врахувати якомога більше факторів, що впливають на робочий процес у циліндрі. Кількість циклів для усереднення не нормовано. Як правило, це кілька десятків, між 50 [4] і 100 (останній дозволяє отримати довірчу ймовірність 95 % [5]).

У літературі наведено кілька найбільш поширених методів апроксимації діаграм. У [3], наприклад, розглянуто змінну середню, фільтр Савітського-Голлея, низькопропускний фільтр. Ці методи дозволяють зменшити похибки вимірювання, але не можуть бути використані для усереднення діаграм великої кількості циклів. Для цього може бути застосований метод кускової апроксимації. У цьому випадку розрахунковий процес значно ускладнюється і в кінцевому підсумку призведе до збільшення похибки через використання апроксимаційних поліномів.

Мета і постановка завдання

Метою цього дослідження є створення методики розрахунку усередненої індикаторної діаграми, що з великою довіркою ймовірністю відтворює середні показники за розрахунковим діапазоном даних.

Перед роботою було поставлено такі задачі:

- зниження впливу нерівномірності роботи двигуна на процес оцінки його середніх параметрів для отримання достовірних даних при обробці індикаторних діаграм ДВЗ;
- якісна оцінка точності отриманого результату;
- розробка функціонального програмного забезпечення, що реалізує запропоновану методику; визначення обмежень застосування методики та причин, що їх утворюють.

Опис методики усереднення

Вже на початковому етапі методику було зорієнтовано для реалізації на ПК, бо в результаті використання сучасних засобів оцифрування сигналів частота реєстрації сигналу датчику тиску досягає 200 кГц і більше. Такі частоти відповідають у середньому куту повороту колінчастого вала близько 0,1–1 град. п.к.в. Таким чином, для обробки поступає обсяг даних у розмірі до кількох мільйонів записаних точок.

Остаточний алгоритм було досягнуто вже у процесі тестування готового продукту, проте головна ідея усереднення залишилася незмінною. Сутність методики полягає в усередненні поля точок умовно накладених індикаторних діаграм, які входять до обраного діапазону, наприклад, один градус повороту колінчастого вала в кожному оброблюваному циклі, як показано на рис. 1.

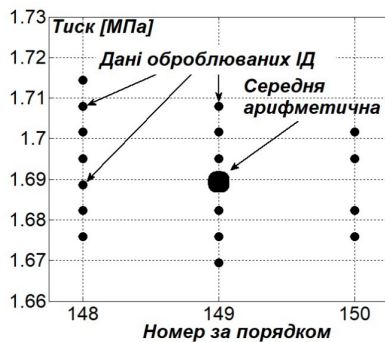


Рис. 1. Усереднення відповідних значень тиску згідно з обраним кроком розрахунку

Усереднення полягає в розрахунку середнього арифметичного в обраному діапазоні значень тиску. Це значення вважається середнім уздовж проміжку часу певного розрахункового циклу i , відповідно, присвоюється йому. Результатом розрахунку є ряд значень тиску, що відповідає точкам усередненої кривої з певним рівномірним кроком, який не може бути менше частоти опитування АЦП датчика тиску (зазвичай беруть 1° п.к.в.).

Найбільшою проблемою точного усереднення індикаторних діаграм є нерівномірність обертання колінчастого вала під час роботи двигуна. Миттєва швидкість колінчастого вала має раптовий характер, бо залежить як від невірноваженості рухомих мас КШМ, так і від робочого процесу двигуна.

Під час роботи з даними індичювання циліндра така нерівномірність проявляється у відповідності певному рівному куту повороту КВ різної кількості записаних точок у різних циклах. До того ж їх розташування відносно початку кожного циклу також відрізняється. Для вирішення цієї проблеми перш за все треба пам'ятати, що ми працюємо із дискретними даними. Через малість періоду визначення тиску вносимо допущення, що в околі записаного значення тиск є постійним і відповідає записаному, а зміна тиску відбувається миттєво в момент наступного опитування і також призначається постійною для наступного проміжку.

Для підвищення точності обробки діаграм необхідним є використання датчика проміжних положень колінчастого вала (датчик повороту КВ). Кількість уточнюючих значень положення КВ має задовольняти необхідній точності обробки індикаторних діаграм та наявній величині нерівномірності швидкості двигуна.

Сигнал датчика положення КВ дає інформацію про поточний кут повороту КВ, а в сумі з відомим та рівномірним часом опитування датчика можна уточнити миттєву швидкість обертання КВ. Відштовхуючись від положення початку нової ділянки та часу, що вона триває, ділимо ділянку на рівні частини, згідно з відповідним їй кутом повороту. Далі, користуючись прийнятим допущенням про сталість тиску між моментами запису, виділяємо масив даних тиску, що відповідає визначеному проміжку часу.

Розпаралеливши процес виділення даних тиску найменшої ділянки (кроку усереднення ІД) за всіма робочими циклами, у виборці ми отримуємо масив даних для усереднення однієї точки шуканої діаграми.

Сигнали датчика повороту КВ дозволяють перейти в розрахунках від шкали часу до кута повороту КВ без прямого перерахування, що значною мірою спрощує подальше сприйняття та використання результату усереднення.

Розроблена методика при визначенні кількості уточнювальних сигналів вимагає задовольнити умову кратності

$$\frac{360}{m} = \delta_{\text{КВ}}, \delta_{\text{КВ}} \in \mathbb{N}, \quad (1)$$

де m – кількість міток на задавальному диску; $\delta_{\text{КВ}}$ – крок уточнюючих сигналів повороту колінчастого вала, град. п.к.в; $\mathbb{N} m$ – ряд натуральних чисел.

Тобто ефективним використанням системи уточнення кута повороту колінчастого вала буде застосування задавального диска з рівномірно розташованими мітками і кількістю, кратною 360.

Таким чином, методику усереднення ряду індикаторних діаграм можна розділити на три структурні одиниці: визначення координат положення ВМТ для розбивання ряду на

окремі цикли, визначення положень, відповідних сигналам кута повороту, для компенсації нерівномірності обертання колінчастого вала та безпосередньо циклу усереднення експериментальних даних.

Також великий вплив на результат усереднення мають правильність і рівномірність визначення точок, найближчих до положень відповідних міток на задавальному диску, встановленому на колінчастому валу, відповідність фаз сигналів датчиків ВМТ та кута п.к.в. Також значна похибка впливає вже на подальшу обробку індикаторних діаграм і власно визначення середнього індикаторного тиску має відповідність мітки ВМТ його фізичному положенню.

При записі даних датчика повороту колінчастого вала та положення ВМТ із великою частотою дискретизації отримують неостаточність визначення положення мітки сигналу датчика, бо на кожний окремий сплеск сигналу припадає до 10–20 точок. Таким чином, на початковому етапі усереднення необхідно досягти тільки рівномірності визначення положень точок, що вказують миттєве положення колінчастого вала. Наступна корекція буде вже пов'язана з уточненням величини невідповідності мітки ВМТ його фізичному значенню.

Отримавши координати сигналів датчика кута п.к.в. із відповідними зазначеними на них відмітками ВМТ, приступаємо до безпосереднього усереднення. Всередині ділянки між сигналами датчика кута п.к.в. приймаємо швидкість колінчастого вала постійною. Таким чином, залежно від кількості експериментальних точок кожного циклу, що потрапили до діапазону, відповідного кроку усереднення, формується обсяг усереднення як показано на рис. 2.

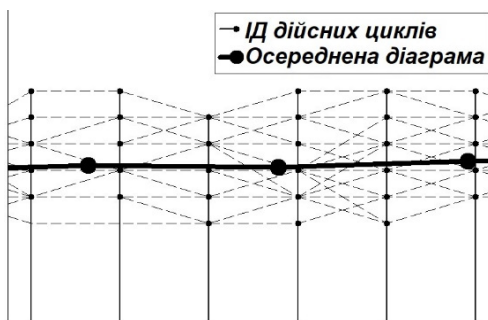


Рис. 2. Розподіл усереднених значень згідно з кроком запису сигналів датчиків

В одному 6-градусному розрахунковому циклі, рівномірно поділеному за кроком розрахунку в 1 градус, може бути задіяна різна кількість точок для усереднення.

Зручною властивістю запропонованого методу є перетворення координатної осі часу на кут п.к.в. без безпосереднього перерахування, адже сигнал датчика кута повороту колінчастого вала дає необхідну для цього інформацію.

Оцінка точності методики

Як опробування наведеної методики було взято дані індиціювання циліндру газового двигуна 6ГЧН 13/14 з турбонаддувом, прототипом якого є дизель ЯМЗ-236, на номінальному режимі та швидкості 1600 1/хв. Аналого-цифровий перетворювач (АЦП): L-Card E-140 з коефіцієнтом дискретизації, що дозволяє реєструвати миттєвий тиск більш ніж двічі за градус повороту колінчастого вала для цієї швидкості двигуна. Двигун випробовувався на найменшу допустиму енергію іскри свічки запалювання та нерівномірність робочих циклів. Таким чином, у роботі двигуна наявні пропуски запалювання робочої суміші та цикли з незадовільними умовами горіння, що утворює значні зміни у вигляді циклових індикаторних діаграм та рівні найвищого циклового тиску p_z .

Такі умови робочого процесу, проте, дають наочний результат із максимальними значеннями похибки усереднення, за рахунок впливу значної різниці в показниках циклу (до 3% за індикаторним тиском циклів) [3].

Програму для реалізації наведеної методики усереднення та допоміжних функцій цієї програми було побудовано у програмному комплексі MatLAB однойменною мовою програмування.

На рис. 3 наведено вигляд вихідних даних за один робочий цикл для проведення обробки індикаторних діаграм, що включає в себе 3 типи сигналів: тиску в циліндрі, положення ВМТ та кута повороту колінчастого вала. Причому датчик тиску був попередньо відкалібрований і АЦП одразу ж перераховує вхідний сигнал в одиниці вимірювання тиску МПа. Для уточнення миттєвої швидкості реєструється положення колінчастого вала кожні 6 град. п.к.в.

У нашому дослідженні було взято діапазон розрахунку усередненої діаграми із кроком в 1 градус п.к.в. і отримано 721 точку усередненої кривої. Такий діапазон є зручним для використання в подальшій обробці й дає високу точність.

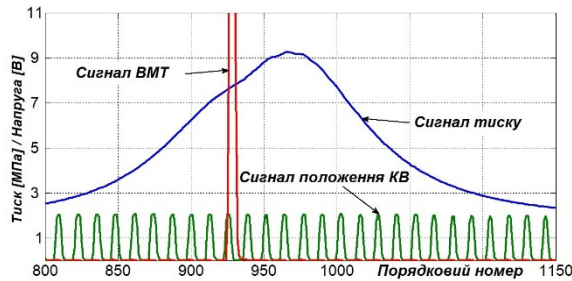


Рис. 3. Початкові дані для усереднення

У [6] наведено спосіб вибору індикаторної діаграми для оцінки усереднених параметрів циклу за значенням середнього індикаторного тиску серед усіх циклів. Останній метод був застосований для дослідження процесу горіння і потребував обробки всіх окремих циклів, взятих для дослідження. Це тривалий і трудомісткий процес, який також не захищає від впливу помилок вимірювання, але може бути найкращим способом оцінки похибки методу усереднення. Порівнюючи середній індикаторний тиск окремих циклів за діапазоном усереднених даних та розрахований таким самим методом індикаторний тиск усередненої діаграми, можна визначити відносну похибку усереднення. Така оцінка точності усередненої діаграми відтворює об'єктивну похибку усереднення, адже спирається на цільові результати усереднення і включає всі можливі на них впливи.

Порівнюючи середнє арифметичне серед індикаторних тисків всіх дійсних циклів, що використовувалися для усереднення, з індикаторним тиском усередненого циклу (рис. 4), ми отримали похибки в межах 0,2–0,6 % в різних підборках даних та кількостях циклів від 10 до 20. Таку похибку можна вважати гранично малою для даної частоти дискретизації АЦП і режиму роботи двигуна, адже вона майже повністю складається з похибки, введеної у процесі оцифрування. Похибку дискретизації можна пояснити графічним відтворенням процесу запису сигналу. На рисунку 5 приведено схематичний фрагмент задавального диска між двома сусідніми мітками та записаний з його допомогою реальний сигнал.

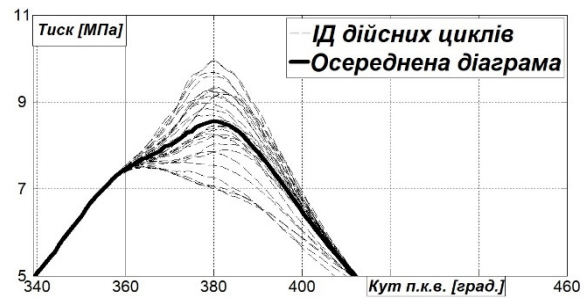


Рис. 4. Порівняння дійсних і усередненої індикаторної діаграми

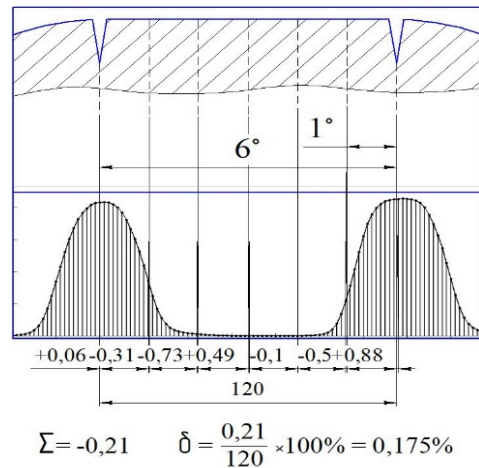


Рис. 5. Похибка дискретизації сигналу АЦП

З рисунка видно, що, розподіляючи шестиградусну ділянку задавального диска на 6 рівних проміжків дискретизації, їх положення не мають відповідних за часом записаних даних. Таким чином, залишкова похибка пов'язана із допущенням про рівномірність обертання в межах отриманого сигналу уточнення миттєвого кута п.к.в.

Висновки

Перевагами запропонованого способу є його простота, швидкість розрахунку та досить висока точність. Метод дозволяє перетворювати весь час на діаграмі в кут повороту колінчастого вала без прямого перерахунку. За наявності необхідного обладнання метод можна застосовувати для обробки експериментальних даних безпосередньо на випробувальному стенді.

За певним доопрацюванням програми, використовуючи дані усереднення циклів стиску-розширення, можна отримати вісь симетрії гілок діаграми і програмно вводити автокорекцію сигналів ВМТ згідно з його фізичним значенням.

Література

1. André V. Bueno, José A. Velásquez, Luiz F. Milanez. Internal Combustion Engine Indicating Measurements. Applied Measurement Systems / Prof. Haq Zahurul (Ed.). – Rijeka, Croatia: InTech, 2012. – pp. 24.
2. Pwletko R. Applicability of selected methods to smooth indicator diagrams of marine medium-speed engine / R. Pwletko, Ph. Danalysing // Polish Maritime Research 2(86). – 2015, Vol. 22. – pp. 55–61.
3. Абрамчук Ф.И. Методика расчета процесса сгорания газового двигателя с высокоэнергетической системой зажигания / Ф.И. Абрамчук, А.Н. Кабанов // Двигатели внутреннего сгорания. – 2007. – №2. – С. 67–73.
4. Леонов И.В. Развитие методов снятия и обработки индикаторных диаграмм / И.В. Леонов, С.А. Луцкая // Инженерный вестник: научно-технический журнал. – 2015. – №11. – С. 1044–1049.
5. Пойда А.Н. Основные принципы индцирования двигателей дискретными устройствами / А.Н. Пойда // Двигателестроение. – 1982. – №86. – С. 24–27.
6. Райков И.Я. Испытания двигателей внутреннего сгорания: учебник для вузов / И.Я. Райков. – М.: Высшая школа, 1975. – 320 с.
- Measurement Systems Rijeka, Croatia: InTech, 2012, pp. 24.
2. Pwletko R., Danalysing Ph. Applicability of selected methods to smooth indicator diagrams of marine medium-speed engine. Polish Maritime Research 2(86), 2015, vol. 22, pp. 55–61.
3. Abramchuk F.Y., Kabanov A.N. *Metodyka rasche-ta processa sgorany'ya gazovogo dvy'gatelya s vysokojenergeticheskoj sistemoj zazhiganija* [Method of calculation of the combustion process of a gas engine with a high-energy ignition system]. *Dvy'gately' vnutrennego sgorany'ya*. [Internal Combustion Engine], 2007, vol. 2, pp. 67–73.
4. Leonov I.V., Luckaja S.A. *Razvitie metodov snjatija i obrabotki indika-tornyh diagramm* [Development of methods for removing and processing indicator charts]. *Inzhenernyj vestnik*. [Engineering Herald]. 2015, vol. 11, pp. 1044–1049.
5. Pojda A.N. *Osnovnye principy indicirovanija dvigatelej diskretnymi ustrojstvami* [The basic principles of the indication of motors by discrete device] *Dvigatelsestroenie* [Engine Building], 1982, vol. 86, pp. 24–27.
6. Rajkov I.Ja. *Ispytanija dviga-telej vnutrennego sgoranija* [Tests of internal combustion engines], Moscow, Vyssh. Shkola Publ., 1975, 320 p.

References

1. André V. Bueno, José A. Velásquez, Luiz F. Milanez. Internal Combustion Engine Indicating Measurements. Applied

Рецензент: Ф.И. Абрамчук, профессор, д.т.н., ХНАДУ.