

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.3.017

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2025.109.0.163

АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО
ЗГОРЯННЯ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ПАРАМЕТРАМИ
ЗМІНИ ТИСКУ В ЦИЛІНДРАХСараєв О. В., Сараєва І. Ю., Кривошапов С. І., Сохін А. А., Козлов О. В.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У роботі здійснено аналіз результатів експериментальних досліджень з визначення технічного стану двигунів внутрішнього згоряння автомобілів через застосування методів математичної статистики. Для отримання експериментальних даних використовувалася розроблений цифровий діагностичний прилад зі спеціальною програмою, яка відтворює функцію зміни тиску в циліндрі двигуна на кожний градус повороту колінчатого вала в тестовому режимі під час його прокручування стартером. Доведено, що розподіл експериментальних даних величини компресії сучасних бензинових двигунів підпорядковується нормальному закону розподілу. Уточнено регресійний зв'язок між величиною компресії та частотою обертання колінчатого вала для сучасних бензинових двигунів з різною кількістю клапанів на циліндр.

Ключові слова: автомобіль, двигун, несправність, діагностичний параметр, експеримент.

Вступ

Під час експлуатації автомобіля періодично виникає необхідність у визначенні технічного стану його двигуна. Це відбувається через тривалу експлуатацію авто та відповідне зменшення ресурсу двигуна або така потреба може мати місце до або після ремонту незалежно від терміну експлуатації. Для фахівців найскладнішим є визначення технічного стану основних груп механізмів двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ), які, як відомо, є найбільш коштовними та містяться всередині двигуна, де доступ до них досить складний або зовсім неможливий без повної або часткового розбирання ДВЗ. І це є загальна проблема в об'єктивності аналізу технічного стану двигуна.

Аналіз публікацій

Сучасні методи визначення технічного стану двигуна автомобіля постійно вдосконалюються. Ця проблема досліджується в різних країнах світу не тільки виробниками автомобілів, але й науковцями, які вивчають проблеми експлуатації, діагностики та ремонту ДВЗ у фундаментальних працях [1–7]. Зазвичай на сучасному рівні для визначення технічного стану автомобіля, зокрема двигуна, використовується цифрове обладнання, спеціальне програмне забезпечення та діагностичні моделі [8–14].

Для оброблення експериментальних даних застосовуються методи математичної

статистики, що дає можливість здійснити більш об'єктивний аналіз стану предмета, що досліджується [15]. Але для дослідження технічного стану ДВЗ за допомогою методів математичної статистики необхідно мати певну достатню кількість вимірів того чи іншого діагностичного параметра та їх відповідність структурним параметрам. Здійснення таких експериментальних досліджень із великим обсягом діагностичних і структурних параметрів, що визначають технічний стан ДВЗ, є непростим завданням для науковців і робить результати таких досліджень унікальними й актуальними для подальшого їх використання.

Мета та постановка завдання

Метою роботи є аналіз результатів експериментальних досліджень із визначення технічного стану ДВЗ автомобіля через застосування методів математичної статистики.

Для досягнення поставленої мети необхідно визначити функцію розподілу статистичних даних; встановити кореляційний зв'язок між функцією зміни тиску в циліндрі двигуна та можливими аргументами.

Результати оброблення
експериментальних даних

Для отримання експериментальних даних застосовувався розроблений цифровий діагностичний прилад зі спеціальною програмою, яка відтворює функцію зміни тиску в

циліндрі двигуна на кожний градус повороту колінчатого вала. Похибка вимірювання приладу не перевищує 2 %. Вимірювання здійснюються в тестовому режимі під час обертання (прокручування) колінчатого вала стартером. Також прилад дозволяє вимірювати та постійно контролювати частоту обертання колінчатого вала в процесі діагностування [16].

У цій роботі узагальнюються результати проведення багатофакторного експерименту на підставі застосування методів математичної статистики. Діагностувалися та досліджувалися переважно сучасні двигуни європейських моделей автомобілів Audi, BMW, Ford, Volkswagen, Opel, Skoda тощо з високим ступенем стиску, більше ніж 10 одиниць з робочим обсягом 1,0–3,0 л, трьох-, чотирьох- та шестициліндрові та з різною кількістю клапанів циліндри (від 2 до 5).

Було оброблено приблизно 200 експериментальних вимірювань величини компресії і доведено, що її розподіл підпорядковується нормальному закону. (рис. 1).

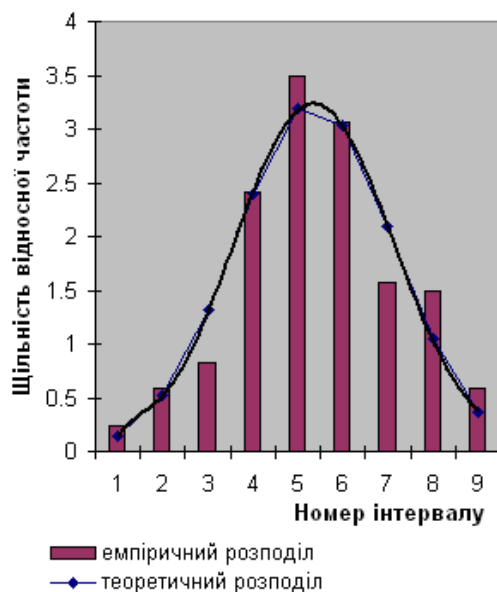


Рис. 1. Емпіричний і теоретичний розподіл випадкової величини максимального тиску в циліндрах (компресії) ДВЗ, що досліджувались

Отримані статистики випадкової величини компресії: $\bar{x} = 1,29$ МПа – середньостатистичне; 0,55 МПа – діапазон розсіювання; $\sigma = 0,12$ МПа – середньоквадратичне; $\sigma^2 = 0,014$ – дисперсія. На цій основі складений теоретичний закон щільності розподілу величини компресії, що експериментально вимірювалася:

$$f(x) = 3,25e^{-\frac{(x-1,29)^2}{0,03}}, \quad (1)$$

де x – середина кожного інтервалу в процесі розподілу величини компресії, що експериментально виміряна, МПа.

З використанням здійснених розрахунків побудовані графіки емпіричних і теоретичних функцій розподілу випадкової величини компресії (рис. 2).

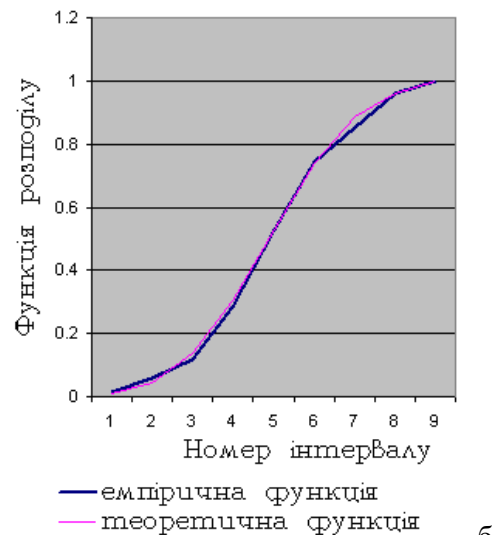


Рис. 2. Графік розподілу функції величини компресії у циліндрах ДВЗ, що досліджувались

Визначено, що емпіричний і теоретичний розподіли за критерієм χ^2 Пірсона узгоджуються з імовірністю 0,8.

Уточнено регресійний зв'язок між величиною компресії і частотою обертання колінчатого вала для сучасних бензинових двигунів з різною кількістю клапанів на циліндр:

- для ДВЗ з 2-ма клапанами на циліндр:

$$\bar{y}_i = 0,584 + 0,00215x_{ni}, \quad (2)$$

- для ДВЗ з більше ніж 2-ма клапанами на циліндр:

$$\bar{y}_i = 0,458 + 0,00376x_{ni}, \quad (3)$$

де x_{ni} – середня частота швидкості обертання колінчатого вала двигуна для кожного i -го інтервалу, хв^{-1} .

Лінійний коефіцієнт кореляції для 2-х рівнянь – 0,91 і більше, а помилка коефіцієнта кореляції не перевищує 0,02.

Аналіз експериментально отриманих та побудованих за рівняннями (2) та (3) функцій

регресії (рис. 3) демонструє, що величина компресії залежить не тільки від обертів колінчастого вала двигуна, але й від кількості клапанів на циліндр. У двигунах з 4-ма, 5-ма клапанами на циліндр компресія є більш високою, як порівняти з компресією 2-клапанних двигунів. Це пояснюється кращим наповненням циліндрів через більшу кількість клапанів. Середньоквадратична помилка між експериментальними та теоретичними даними не перевищує 0,046 МПа.

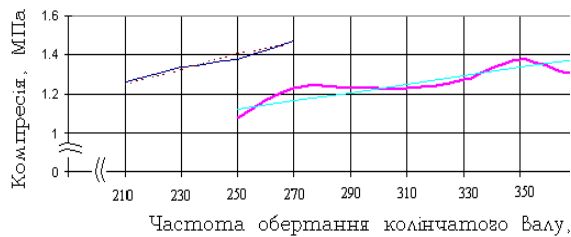


Рис. 3. Результати регресійного аналізу функції компресії від швидкості обертання колінчастого вала та кількості клапанів на циліндр

Іншим діагностичним параметром є мінімально допустима величина компресії. Є відомі рекомендації у відповідній літературі, де на цей параметр радять звертати увагу, однак, діапазон його характеристики кількісно не визначений, зокрема, для сучасних бензинових двигунів з високою величиною ступеня стиску до 10 і більше одиниць. У роботі уточнена ця величина на основі толерантних меж нормального розподілу:

$$P_{\min} = \bar{P} - K(P, j, n) \sqrt{D}, \quad (4)$$

де $\bar{P}$ – вибіркове середнє; D – дисперсія; K – коефіцієнт, що залежить від заданих ймовірностей, $K = 2,696$; n – розмір вибірки, $n = 200$.

Підставляючи до формули (4) отримані вище статистики, одержимо значення мінімальної величини компресії, що буде дорівнювати 0,96 МПа для сучасних бензинових двигунів.

Ще один не чітко визначений діагностичний параметр – це величина послідовного підвищення компресії від такту до такту стиснення. Це зазначено в літературних джерелах з ремонту та діагностики ДВЗ, Тобто таке явище відбувається, коли має місце зношування поршневих кілець і поршневих канавок, збільшення або зменшення зазора між кільцем і поршневою канавкою за

висоті перетину. У таких випадках можна спостерігати послідовне підвищення компресії (рис. 4).

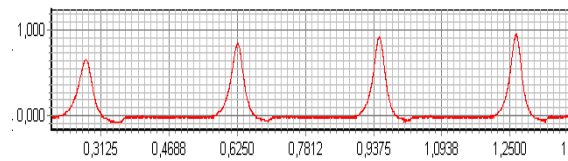


Рис. 4. Зміна кривої тиску в циліндрі під час прокручування стартером

Під час оброблення експериментальних даних було визначено, що перший екстремум компресії залежить від вільного положення поршня і клапанів на момент початку тесту і його не потрібно враховувати. У такій інтерпретації діагностичний параметр формалізовано можна записати через різницю між максимальним екстремумом компресії $K_{\max}$ і другим за рахунком K_2 :

$$f(K) = K_{\max} - K_2. \quad (5)$$

Загалом розглянуті діагностичні параметри вимірювання тиску в циліндрах двигуна в тестовому режимі дозволили під час проведених досліджень визначити зв'язок з основними несправностями двигуна. Наприклад, зношування поршневих кілець і поршневих канавок, збільшення або зменшення зазора між кільцем і поршневою канавкою за висотою перетину (рис. 5) фіксується на графіку зниження компресії у несправному циліндрі у співвідношенні до іншого справного циліндра цього двигуна. Додатково це відбувається у разі зміни іншого діагностичного параметра тиску картерних газів (рис. 6).



Рис. 5. Результати виявлених під час експерименту несправностей ДВЗ: а – зношування поршневих кілець і поршневих канавок, збільшення або зменшення зазора між кільцем і поршневою канавкою за висотою перетину; б – деформація стрижня клапана або прогар тарілки клапана

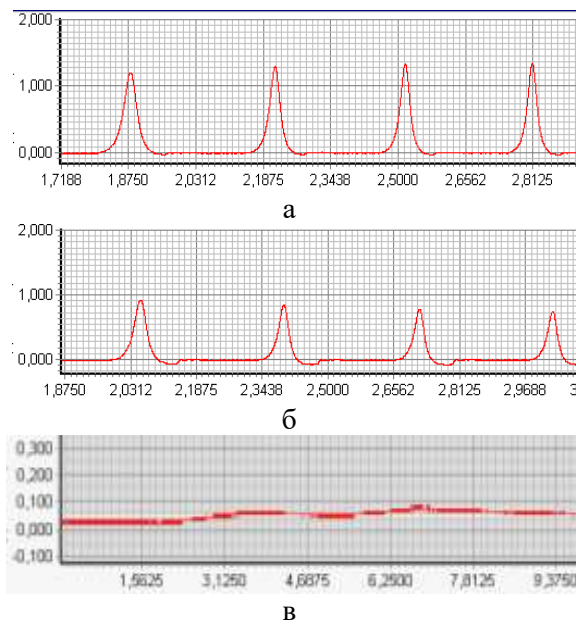


Рис. 6. Експериментальні графіки вимірювання компресії та тиску картерних газів у двигуна з несправним циліндром: а – крива тиску в циліндрі, що не має несправності; б – крива зі зниженим тиском і невисокою компресією в циліндрі, що має певну несправність; в – поступове збільшення тиску картерних газів

Також під час експериментальних досліджень спостерігалось зниження тиску в несправному циліндрі без підвищення тиску картерних газів (рис. 7).

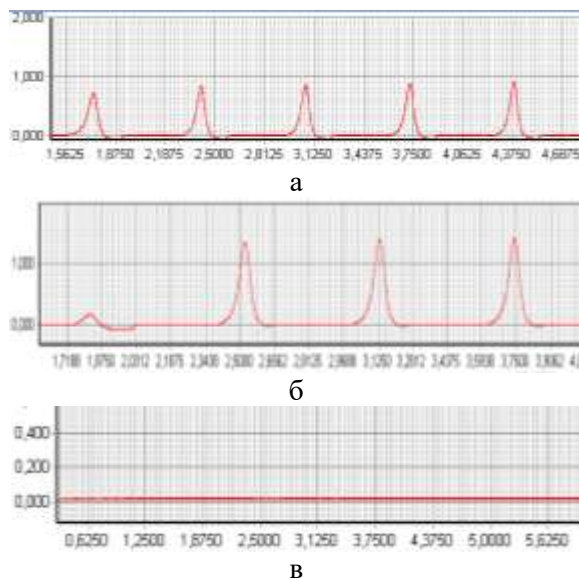


Рис. 7. Експериментальні графіки вимірювання компресії і тиску картерних газів у двигуна з несправністю клапана: а – крива тиску в циліндрі, де є прогар тарілки клапана; б – крива тиску в справному циліндрі; в – відсутність підвищення тиску картерних газів

Всі наведені результати цифрового діагностування двигуна способом вимірювання тиску в його циліндрах були отримані в тестовому режимі під час прокручування колінчастого вала стартером, а вимірювання тиску картерних газів здійснювалося на двигуні, що працює на середніх обертах.

Висновки

1. Для отримання експериментальних даних застосовувався розроблений цифровий діагностичний прилад зі спеціальною програмою, яка відтворює функцію зміни тиску в циліндрі двигуна на кожний градус повороту колінчастого вала в тестовому режимі під час прокручування колінчастого вала стартером. Похибка вимірювань не перевищувала 2 %.

2. Доведено, що розподіл експериментальних даних величини компресії сучасних бензинових двигунів підпорядковується нормальному закону розподілу. Визначено, що емпіричний і теоретичний розподіли величини компресії узгоджуються за критерієм χ^2 Пірсона з імовірністю 0,8.

3. Уточнено регресійний зв'язок між величиною компресії і частотою обертання колінчастого вала для сучасних бензинових двигунів з різною кількістю клапанів на циліндр. У двигунах з 4-ма та 5-ма клапанами на циліндр компресія є більш високою, як порівняти з компресією 2-клапанних двигунів. Це пояснюється кращим наповненням циліндрів через більшу кількість клапанів. Середньоквадратична помилка між експериментальними і теоретичними даними не перевищує 0,046 МПа.

Література

1. Gilles T. Automotive Engines: Diagnosis, Repair and Rebuilding, 6th Edition. Delmar: Cengage Learning. 2011. 734.
2. Maurya R. K. Reciprocating Engine Combustion Diagnostics In-Cylinder Pressure Measurement and Analysis. Cham: Springer Nature Switzerland AG. 2019. 616.
3. Halderman J. D. Automotive Technology. Principles, Diagnosis, and Service. Fourth edition. New Jersey: Pearson Education Inc, 2012. 1652.
4. Stotsky A. A. Automotive Engines. Control, Estimation, Statistical Detection. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2009. 215.
5. Blair G. P. Design and Simulation of Four-Stroke Engines. Warrendale, Society of Automotive Engineers, Inc. 2009. 815.
6. Gupta H. N. Fundamentals of Internal Combustion Engines. PHI Learning Pvt. Ltd. 2012. 676.

7. Heywood J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. Second Edition. New York: McGraw-Hill Education, 2018. 1056.
8. Pszczółkowski J. The model for cylinder charge parameters during engine starting. Combustion Engines. 2022. 188(1). 60-66. DOI: <https://doi.org/10.19206/CE-142029>
9. Cordon D., Dean, Ch., Steciak, J., Beyerlein, S. One-Dimensional Engine Modeling and Validation using Ricardo WAVE. Final Report KKK434-B, N07-09. National Institute for Advanced Transportation Technology, University of Idaho. 2022. 45. Retrieved from https://www.academia.edu/18805887/ONE_DIMENSIONAL_ENGINE_MODELING_AND_VALIDATION_USING_RICARDO_WAVE
10. Magdas V. B., Mastan D. C., Burnete N. Simulation possibilities of the internal combustion engine management elements using Lotus Engine Simulation software. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 997 (1). 012121. 11. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/997/1/012121>
11. Khrulev A., Saraiev O. Building a mathematical model of the destruction of a connecting rod-piston group in the car engine at hydraulic lock. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. 3. 7 (117). 40-49. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.259454>
12. Medina A., Curto-Risso P. L., Hernández A. C., Guzmán-Vargas L., Angulo-Brown F., Sen A. K. Quasi-Dimensional Simulation of Spark Ignition Engines. From Thermodynamic Optimization to Cyclic Variability. Springer-Verlag, London. 2014. 195.
13. Khrulev A. Analysis of pneumatic catapult launch system parameters, taking into account engine and UAV characteristics. Advanced UAV. 2023. 3 (1). 10-24. Retrieved from <https://publish.mersin.edu.tr/index.php/uav/article/view/1045>
14. Kravchenko O., Khrulev A., Gerlici J., Saraiev O., Danets S. Technical Condition Assessment and Modelling of Reed Valves in Vehicle Engine Intake Systems – Communications – Scientific Letters of the University of Zilina. 2025. 27(1):B41-B52 | DOI: 10.26552/com.C.2025.006.
15. Lanlege D. I., Kehinde R., Sobanke D. A., Garba U. M. Comparison of Euler and Range-Kutta methods in solving ordinary differential equations of order two and four. Leonardo Journal of Sciences. 2018. Issue 32. 10-37. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/331993886_Comparison_of_Euler_and_Range-Kutta_methods_in_solving_ordinary_differential_equations_of_order_two_and_four
16. Automated Diagnostic System for Engine Cylinder-Piston Group / O. Saraiev et al. SAE Technical Paper 2020-01-2022, 2020. <https://doi.org/10.4271/2020-01-2022>

Сараєв Олексій Вікторович, д.т.н., професор, тел. +38 0502755159, е-mail: sarayev9@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6582-560X>;
Сараєва Ірина Юріївна, к.т.н., доцент, тел. +38 0506400787, е-mail: sarayeva9@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7720-471X>;
Кривошапов Сергій Іванович, к.т.н., доцент, тел. +38 0660574773, е-mail: tesa@khadi.kharkov.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4605-6790>;
Сохін Андрій Андрійович, аспірант кафедри автомобілів, е-mail: sokhin.andriy94@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2120-4120>;
Козлов Олександр Володимирович, аспірант кафедри технічної експлуатації та сервісу автомобілів, е-mail: alexandrelicars@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-3607-9410>

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, 61002 Україна.

Assessment of the technical condition of an internal combustion engine by experimental parameters of pressure changes in the cylinder

Abstract Problem. During the operation of a car, it becomes necessary to determine the technical condition of its engine. This is due to the long-term operation of the car and the corresponding decrease in engine life, or there is a need to determine the technical condition of the engine before or after repair. Special attention for specialists is drawn to the complexity of assessing the technical condition of the main groups of internal combustion engine mechanisms, which are known to be the most valuable and are located in the middle of the engine. Access to them is very difficult or impossible without full or partial disassembly of the engine. And this is a common problem. **Goal.** The aim of the work is to evaluate the results of experimental studies to determine the technical condition of a car's internal combustion engine by applying mathematical statistics methods. **Methodology.** To obtain experimental data, we used a developed digital diagnostic device with a program for processing digital information to reproduce the function of pressure in the engine cylinder at each degree of crankshaft rotation, with an error not exceeding 2 % in the test mode during cranking of the crankshaft by the starter. This paper summarizes the results of a multivariate experiment using the methods of mathematical statistics. **Results.** The theoretical law of distribution of the random value of compression for modern gasoline engines is obtained. **Originality.** For 2-valve engines and for 4-5-valve engines of modern cars, regression equations have been improved, which allow us to clarify the functional relationship between the random variable of compression and the crankshaft speed. **Practical**

value. It has been experimentally established that the rate of increase in compression is significantly influenced not only by the technical condition of the cylinder-piston group, but also by the initial position of the piston and valves at the moment of start, therefore, the rate of increase in compression in the cylinder is proposed to be estimated as the difference between the maximum compression surge and the second one, which in serviceable cylinders does not exceed 0.25 MPa.

Key words: car, engine, malfunction, diagnostic parameter, experiment.

Oleksii Saraiev, Doctor of Technical Sciences, Professor,
tel. +38 050 275 5159,
e-mail: sarayev9@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6582-560X>

Iryna Saraieva, Ph.D., Assoc. Professor,
tel. +38050-64-00-787,
e-mail: sarayeve9@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7720-471X>
Sergy Krivoshapov, Ph.D., Assoc. Professor, tel. +38 066-057-47-73,
e-mail: tesa@khadi.kharkov.ua,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4605-6790>
Andrii Sokhin¹ – postgraduate,
e-mail: sokhin.andriy94@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2120-4120>
Oleksandr Kozlov – postgraduate,
e-mail: alexandrelicars@gmail.com,
<https://orcid.org/0009-0006-3607-9410>

Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.
