

**І.Ю. Сараєва, к.т.н., доц.
М.В. Мілентьєв, студент**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Вдосконалення методу діагностики циліндро-поршневої групи двигуна автомобіля

В роботі наведені результати удосконалення процесу діагностування герметичності камери згоряння бензинових двигунів стосовно до сучасних автомобілів. Доведена статистична гіпотеза про нормальний розподіл випадкової величини компресії. Отримані рівняння регресії випадкової величини компресії від обертів двигуна. Регресійна модель також враховує кількість клапанів на циліндр. Формалізована модель постановки діагнозу технічного стану двигуна, а саме герметичності камери згоряння. Визначений діапазон діагностичних параметрів з оцінки герметичності камери згоряння бензинового двигуна сучасних моделей. Виконані експериментальні дослідження на автомобілях різних європейських та азіатських марок.

За допомогою тензометричного методу вимірювання з подальшим аналогово-цифровим перетворенням сигналу виконані вимірювання діагностичних параметрів; з використанням методів математичної статистики проведена обробка експериментальних даних. Застосувавши метод регресійного аналізу, встановлено кореляційний зв'язок між величиною компресії і частотою обертання колінчастого валу; методом толерантних меж встановлена межа допустимої величини компресії; з використанням теоретичних методів аналізу, синтезу, моделювання і булевої алгебри формалізовано процес діагностування.

На основі вдосконаленого методу діагностування, що оцінює технічний стан циліндро-поршневої групи та герметичність клапанів двигуна за трьома діагностичними параметрами: різниця компресії між циліндрами, темп наростання компресії, тиск картерних газів, – розроблена статистична модель, що дозволяє на відміну від існуючих детермінованих моделей локалізувати несправність циліндро-поршневої групи та герметичності клапанів двигуна та формалізувати процес автоматизованої постановки технічного діагнозу

Ключові слова: *автомобіль; двигун; циліндр; поршень; кільце, камера згоряння, тиск, діагностика, параметр, комп'ютер.*

Постановка проблеми. Проблематика питання діагностики циліндро-поршневої групи (ЦПГ) та герметичності клапанів двигунів внутрішнього згоряння пов'язана з невизначеністю та певними труднощами при постановці технічного діагнозу. В літературних джерелах, де досліджується дана проблема, вказується, що відомі методи і засоби діагностики не дають повної інформації про технічне становище ЦПГ та герметичність клапанів бензинових двигунів, внаслідок неточності і суперечності результатів діагностування, що і дало підставу для проведення наукових досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як показує практика технічного обслуговування й ремонту автомобільних двигунів найбільш поширеними, доступними і достовірними залишаються методи технічної діагностики ЦПГ, що дають загальну оцінку герметичності надпоршневого простору з вірогідністю, яка не перевищує 50%, за допомогою різних засобів діагностування: компресометра, компресографа, приладу К-69М, мотортестера [1, 2].

На сучасному етапі розвитку автомобільної техніки, її технічного обслуговування і ремонту технічна діагностика одержала своє логічне продовження у вигляді розвитку автоматизованих систем контролю. Діагностичний комп'ютер дозволяє контролювати всі електронні системи автомобіля, включаючи комплексну систему управління двигуном. Проте, існуючі діагностичні комп'ютери, що випускаються різними фірмами, такими як BOSCH, MATCO, ZECA, RIMBEX.INT та іншими, не дозволяють повною мірою продіагностувати механізми двигуна, зокрема, саму підкладну зносу ЦПГ двигуна. Для рішення цього завдання потрібні спеціальні діагностичні моделі та програми [3, 4].

Є сучасні роботи які розглядають процес діагностування двигуна за допомогою регресійних моделей, що описують зв'язок між частотою обертання колінчастого валу й випадковою величиною компресії, - що не суперечить фізичній сутності стохастичного об'єкту діагностування, на відміну від раніше прийнятого опису величини компресії за допомогою детермінованої функції. Це дозволяє зробити більш поглиблену діагностику ЦПГ не тільки для окремо взятої моделі двигуна, а для широкого спектра бензинових двигунів сучасних легкових автомобілів [5, 6].

Багато робіт з цього приводу розглядають можливість діагностування ЦПГ двигуна за допомогою одного вибраного типу діагностичного сигналу (параметру) – це осцилограма кривої тиску у циліндрі [7], величина тиску картерних газів [8], віброакустичний сигнал [9].

Мета дослідження. Удосконалити процес діагностування герметичності камери згоряння двигуна, зробивши його більш достовірним, точним, інформативним і поглибленим.

Викладення основного матеріалу. Статистична (нульова) гіпотеза дослідження полягає в наступному – випадкова величина компресії підкоряється нормальному закону розподілу. При дослідженні висунутої гіпотези був проведений пошуковий експеримент. Діагностувалися двигуни автомобілів ВАЗ, Opel, Audi, Ford, Skoda, ZAZ-Daewoo, BMW, Mazda, Mitsubishi, Honda зі ступенем стиску 9,5–10,5 одиниць, з робочим обсягом 1,2-2,8 л., із двома, чотирма й п'ятьма клапанами на циліндр. Протягом 5 років у рамках експерименту було продіагностовано 75 двигунів. Експериментальні дані були оброблені з використанням методів математичної статистики. З метою підвищення об'єктивності досліджень розглядалися 2 статистичних ряди: 1 ряд – містить у собі випадкову величину компресії різних моделей двигунів; 2 ряд – обмежений двигунами однієї моделі ВАЗ-21083, найпоширенішої на території України. Аналіз експериментальних даних показав - щільність випадкової величини компресії має вигляд нормального закону розподілу (рис. 1).

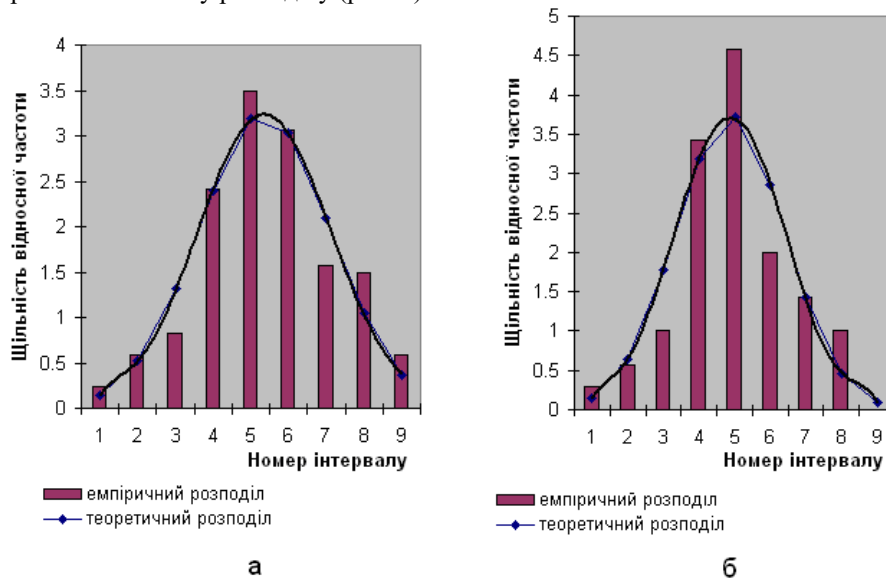


Рис. 1. Апроксимація емпіричного розподілу випадкової величини компресії теоретичним розподілом: а) двигуни різних моделей; б) двигуни ВАЗ-21083

Отримано статистики випадкової величини компресії для 1 й 2 варіаційних рядків відповідно: середньостатистичне значення $\bar{x} = 1,29$ МПа, $\bar{x} = 1,256$ МПа; мода $M_0 = 1,265$ МПа; розмах розсіювання 0,561 МПа, 0,539 МПа; середньоквадратичне відхилення $\sigma = 0,123$ МПа, $\sigma = 0,107$ МПа; дисперсія $\sigma^2 = 0,015$, $\sigma^2 = 0,0115$; коефіцієнт варіації $V = 9,5$ %, $V = 8,5$ %.

На підставі експериментальних даних отримано теоретичний закон щільності розподілу випадкової величини компресії:

для двигунів різних моделей

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

для двигунів моделі ВАЗ-21083

$$f(x) = 3,74e^{-\frac{(x-1,256)^2}{0,023}}. \quad (2)$$

де x – середина заданого інтервалу випадкової величини компресії, МПа.

Побудовані графіки емпіричних і теоретичних функцій розподілу випадкової величини компресії (рис. 2). Погодженість емпіричного й теоретичного розподілів перевірена за критерієм згоди Колмогорова і становить 0,96. Погодженість емпіричного й теоретичного розподілів додатково перевірена за критерієм χ^2 Пірсона, відповідно до якого імовірність становить 0,8.

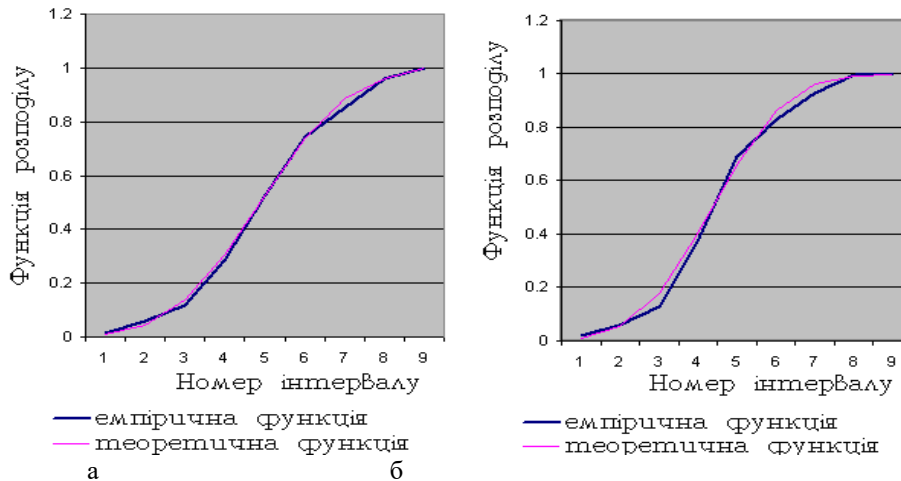


Рис. 2. Функції розподілу випадкової величини компресії: а) для двигунів різних моделей; б) для двигунів моделі VAZ-21083

Виконано регресійний аналіз, що встановлює ступінь впливу частоти обертання колінчатого вала на величину компресії сучасних бензинових двигунів. Отримано рівняння регресії для 2-х клапанних двигунів

$$\bar{y}_i = 0,584 + 0,00215x_{ni}, \quad (3)$$

для 4-х й 5-и клапанних двигунів

$$\bar{y}_i = 0,458 + 0,00376x_{ni}. \quad (4)$$

де x_{ni} – середнє значення частоти обертання колінчатого вала на i інтервалі, хв^{-1} .

Лінійний коефіцієнт кореляції для обох рівнянь більше 0,9, а помилка коефіцієнта кореляції не перевищує 0,018. Представлені графічно результати регресійного аналізу (рис. 3) показують, що більш висока величина компресії досягається на менших обертах в 4-х й 5-и клапанних двигунах у порівнянні з 2-х клапанними. Це пов'язано з різним коефіцієнтом наповнення циліндрів. Середньоквадратична помилка, яка у цьому випадку характеризує міру близькості емпіричних даних теоретичним, становить відповідно 0,04 МПа, 0,01 МПа.

Відповідно до технічних вимог по експлуатації й ремонту автомобілів деякі фірми рекомендують урахувати при діагностуванні мінімальну величину компресії й темп наростання компресії, однак, характеристики цих параметрів однозначно не визначені. Тому, у роботі мінімально припустиме значення величини компресії визначено на основі виділення толерантних меж нормального розподілу

$$P_{min} = \bar{P} - K(P, j, n)\sqrt{D}, \quad (5)$$

де \bar{P} - вибіркєве середнє; D - дисперсія; K - коефіцієнт, що залежить від заданих ймовірностей, $K=2,696$; n - розмір вибірки, $n=172$.

З використанням отриманих статистик мінімально припустиме значення величини компресії становить 0,958 МПа.

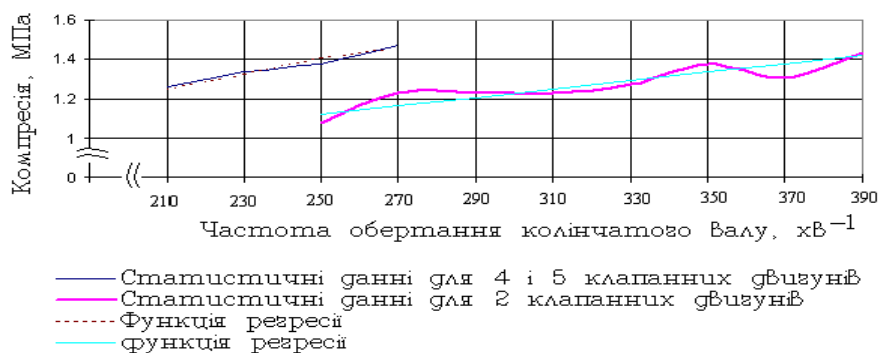


Рис. 3. Залежність компресії від частоти обертання колінчатого вала

Дослідження темпу наростання компресії дозволило встановити, що низький темп наростання компресії в циліндрі можливий при зношуванні поршневих кілець і поршневих канавок по висоті перетину (рис. 4).

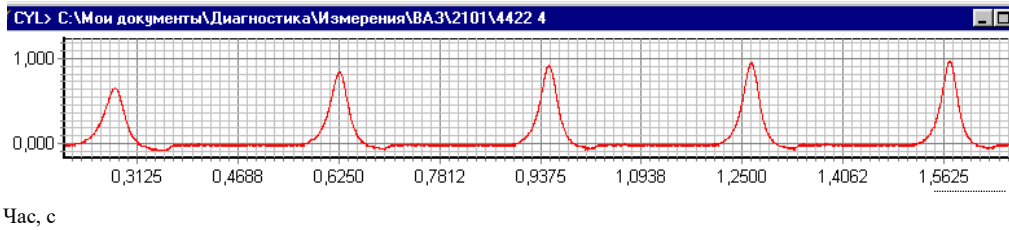


Рис. 4. Низький темп наростання компресії в циліндрі

У ході дослідження було встановлено, що величина першого сплеску компресії залежить від довільного положення кривошипно-шатунного й газорозподільного механізмів у момент старту. Тому, щоб уникнути помилки, пропонується враховувати, як діагностичну ознаку, різницю між максимальним за величиною K_{max} і другим за рахунком K_2 сплесками компресії:

$$f(K) = K_{max} - K_2. \quad (6)$$

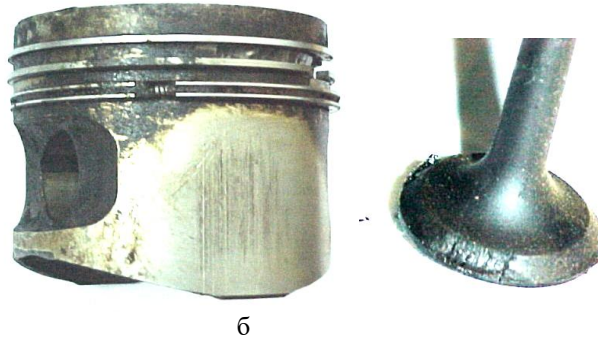
Експериментально визначені характеристики діагностичних параметрів (табл. 1).

Таблиця 1

Експериментально встановлені значення діагностичних параметрів

| Діагностичний параметр | Припустимі значення, Мпа | Граничні значення, МПа |
|----------------------------------|--------------------------|------------------------|
| Темп наростання компресії | 0-0,24 | 0,25 |
| Різниця компресії між циліндрами | 0-0,24 | 0,25 |
| Тиск картерних газів | 0-0,044 | 0,045 |

У процесі експерименту виявлені типові несправності ЦПП і клапана, визначені відповідні значення діагностичних параметрів. Так, наприклад, при задирах на поршні, деформації й зламні поршневих перегородок, заляганні поршневих кілець (рис. 5, а) спостерігається падіння компресії в несправному циліндрі стосовно справного й пульсуюче підвищення тиску картерних газів (рис. 6).

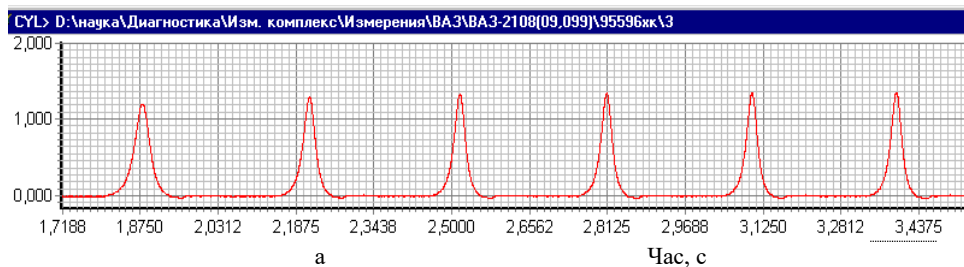


а

б

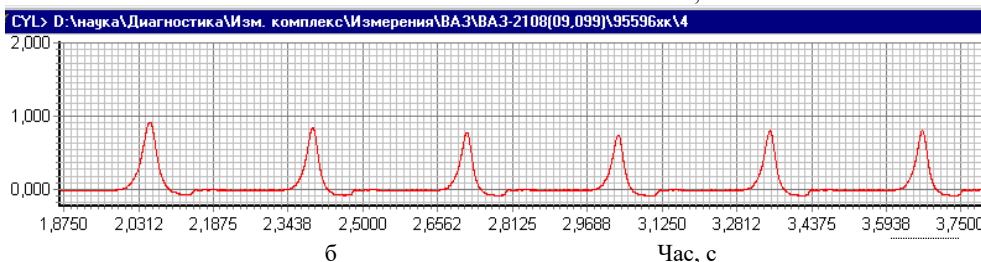
Рис. 5. Характерні несправності:

а) залягання поршневих кілець, деформація й злам поршневих перегородок; б) прогар клапана



а

Час, с



б

Час, с

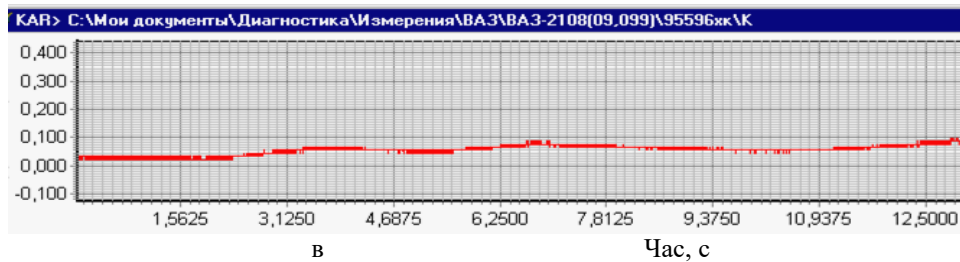


Рис. 6. Результати діагностики двигуна з несправною ЦПГ:

а) тиск у справному циліндрі; б) тиск у несправному циліндрі; в) тиск картерних газів

При порушенні герметичності клапана внаслідок прогару головки або деформації стержня (рис. 6, б) відбувається падіння компресії в несправному циліндрі без підвищення тиску картерних газів.

При математичному моделюванні процесу постановки діагнозу зроблені наступні допущення:

- у двигуні одночасно може виникнути тільки одна несправність;
- для визначення несправності, пов'язаної із прогаром прокладки головки циліндрів, не потрібно розробки складної діагностичної системи;
- збільшення зазору між циліндром і поршнем супроводжується збільшенням зазору в стиках поршневих кілець.

Основний недолік існуючих математичних моделей полягає в тім, що складний стохастичний об'єкт діагностування, яким є ЦПГ, намагаються описати за допомогою детермінованих виразів. Як наслідок такого принципу моделювання - неоднозначність діагнозу, недостатня глибина пошуку дефекту. У ході дослідження об'єкт діагностування розглядався у вигляді «чорного ящика» з невідомими структурними параметрами (логічними функціями Y), вихідними діагностичними параметрами (логічними змінними X) і параметрами, що впливають. Номенклатура структурних параметрів, які перевіряють, визначена відповідно до ГОСТ 23435-79: зазор між циліндром і поршнем, зазор у стиках поршневих кілець, зазор між поршнем і кільцем по висоті канавки, герметичність клапана. Кінцева множина діагностичних параметрів, яка встановлена в ході попереднього експерименту, містить у собі тиск картерних газів, темп наростання компресії й різницю компресії між циліндрами. Кінцевою множиною параметрів, що впливають, є: температура рідини для охолодження, кут відкриття дросельної заслінки й частота обертання колінчатого валу [5]. Передбачається, що кінцеву множину параметрів, що впливають, у процесі діагностування можна стабілізувати.

Відповідно до встановлених діапазонів діагностичних параметрів логічним змінним X привласнені значення 0, якщо діагностичний параметр не виходить за межі припустимого значення, та - 1, якщо він перевищує це значення. Діагностичну матрицю можна представити у вигляді системи булевих функцій диз'юнкції:

$$\begin{cases} x_1 = y_{1-2} + y_{3,1} + y_{3,2}; \\ x_2 = y_{3,1}; \\ x_3 = y_{3,2} + y_4. \end{cases} \quad (7)$$

де y_{1-2} – зазор у стиках поршневих кілець; $y_{3,1}$ – зазор між поршнем і кільцем по висоті канавці (верхнє значення параметру); $y_{3,2}$ – зазор між поршнем і кільцем по висоті канавці (нижнє значення параметру); y_4 – зазор між клапаном і сідлом (герметичність клапану).

Для вирішення завдання діагностики необхідно зворотнє перетворення виразу (7), тобто визначення характеристики структурних параметрів за діагностичними з використанням логічної операції кон'юнкції:

$$\begin{cases} y_{1-2} = x_1; \\ y_{3,1} = x_1 x_2; \\ y_{3,2} = x_1 x_3; \\ y_4 = x_3. \end{cases} \quad (8)$$

де x_1 – тиск картерних газів, МПа; x_2 – темп наростання компресії від такту до такту стиску, МПа; x_3 – різниця компресії між циліндрами, МПа.

З урахуванням привласнених логічним змінним значень вираз (8) приймає вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_{1-2} = x_1 \left\{ \begin{array}{l} 0, \text{ якщо } x_1 < 0,045 \text{ МПа} \\ 1, \text{ якщо } x_1 \geq 0,045 \text{ МПа} \end{array} \right. ; \\ y_{3.1} = x_1 x_2 \left\{ \begin{array}{l} 0, \text{ якщо } x_1 < 0,045 \text{ МПа і } x_2 < 0,25 \text{ МПа} \\ 1, \text{ якщо } x_1 \geq 0,045 \text{ МПа і } x_2 \geq 0,25 \text{ МПа} \end{array} \right. ; \\ y_{3.2} = x_1 x_3 \left\{ \begin{array}{l} 0, \text{ якщо } x_1 < 0,045 \text{ МПа і } x_3 < 0,25 \text{ МПа} \\ 1, \text{ якщо } x_1 \geq 0,045 \text{ МПа і } x_3 \geq 0,25 \text{ МПа} \end{array} \right. ; \\ y_4 = x_3 \left\{ \begin{array}{l} 0, \text{ якщо } x_3 < 0,25 \text{ МПа} \\ 1, \text{ якщо } x_3 \geq 0,25 \text{ МПа} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (9)$$

Можливість рішення математичної моделі в рамках прийнятих допущень полягає в одержанні однозначної відповіді про технічний стан об'єкта, що діагностується. Це означає, що в системі булевих функцій (9) немає жодного збігу в наборі логічних змінних. За умови нульового набору логічних змінних 0-0-0, коли всі змінні з множини X приймають значення 0, одержимо математичну модель справного технічного стану об'єкта діагностування.

Висновки:

1. Отримано теоретичний закон розподілу випадкової величини компресії для сучасних бензинових двигунів, що дозволяє довести гіпотезу про нормальний розподіл випадкової величини компресії з імовірністю 0,8 і виконати діагностику циліндро-поршневої групи та герметичності клапанів не тільки для окремо взятої моделі двигуна, а для широкого спектра бензинових двигунів сучасних легкових автомобілів.

2. Для 2 клапанних двигунів і для 4-5 клапанних двигунів отримані рівняння регресії, які дозволяють встановити функціональний зв'язок між випадковою величиною компресії й частотою обертання колінчатого вала в бензинових двигунах сучасних автомобілів з коефіцієнтом кореляції більше 0,9 і помилкою коефіцієнта кореляції меншою ніж 0,018. Це дозволяє екстраполювати результати діагностування у випадку нестабільної роботи електроустаткування автомобіля, яке забезпечує старт двигуна в тестовому режимі.

3. Експериментально встановлено, що на величину темпу наростання компресії значний вплив чинить не тільки технічний стан циліндро-поршневої групи, але й початкове положення поршня та клапанів у момент старту, тому темп наростання компресії в циліндрі пропонується оцінювати, як різницю між максимальним за величиною сплеском компресії і другим за рахунком, що у справних циліндрів не перевищує 0,25МПа.

Список використаної літератури:

1. Хрулев А.Э. Ремонт двигателей зарубежных автомобилей / А.Э.Хрулев. – М. : За рулем, 2000. – 440 с.
2. Практика діагностування автомобілів / А.М. Юрченко, О.В. Бажинів, В.М. Варфоломеев і другіе ; за ред. А.М. Юрченка. – К. : НМК ВО, 1993. – 216 с.
3. Сараева И.Ю. Анализ метода диагностирования цилиндропоршневой группы двигателя с использованием оборудования фирмы Bosch / И.Ю. Сараева, Д.В. Бекетов // Автомобильный транспорт : сб. науч. тр. ХНАДУ. – Х., 2010. – Вып. 27. – С. 199–202.
4. Кошовий М.Д. Математичне забезпечення процесу діагностування циліндро-поршневої групи двигуна / М.Д. Кошовий, І.Ю. Сараєва // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2010. – Вып. 47. – С. 131–135.
5. Сараева И.Ю. Дослідження закону розподілу випадкової величиникомпресії / І.Ю. Сараєва // Автомобильный транспорт : сб. науч. тр. ХНАДУ. – Х., 2011. – Вып. 29. – С. 199–202.
6. Сараева И.Ю. Регрессионны анализ случайно величины компрессии / И.Ю. Сараева // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ». – 2011. – Вып. 51. – С. 105–110.
7. Куков С.С. Совершенствование процесса диагностирования цилиндропоршневой группы / С.С. Куков, А.В. Грищенко, Д.Д. Бакайкин // Материалы LV Междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки–агропромышленному производству». – Челябинск : ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ. – 2016. – С. 77–82.
8. Филиппова Е.М. Определение технического состояния цилиндропоршневой группы по расходу картерных газов / Е.М. Филиппова, Е.В. Николаев // Труды ГОСНИТИ. – Т. 108. – 2011. – С. 91.
9. Щеглов В.А. О возможности диагностики цилиндро-поршневой группы ДВС методом частотно-амплитудного анализа сигнала вибрации с использованием вейвлет-анализа / В.А. Щеглов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2015. – Т. 1. – №. 3. – С. 49–56.

References:

1. Khrulev, A.E. (2000), *Remont dvigateley zarubezhnykh avtomobiley, Za rulem*, M., 440 p.
2. Yurchenko, A.M., Bazhynov, O.V., Varfolomyeyev, V.M. and others (1993), *Praktyka diahnostuvannya avtomobiliv*, in Yurchenko, A.M. (ed.), NMK VO, K., 216 p.
3. Sarayeva, I.YU. and Beketov, D.V. (2010), «Analiz metoda diagnostirovaniya tsilindroporshnevoy grupy dvigatelya s ispol'zovaniyem oborudovaniya firmy Bosch», *Avtomobil'nyy transport : sb. nauch. tr. KHNADU*, KH., Iss. 27, Pp. 199–202.
4. Koshovyy, M.D. and Sarayev, I.YU. (2010), «Matematychnе zabezpechennya protsesu diahnostuvannya tsylindroporshnevoyi hrupy dvyhuna», *Otkrytye ynformatsyonnye y komp'yuternye yntehrovannye tekhnolohyy: sb. nauch. tr., Nats. aэrokosm. un-t «KHAУ», Khar'kov*, Iss. 47, Pp. 131–135.
5. Sarayeva, I.YU. (2011), «Doslidzhennya zakonu rozpodilu vypadkovoyi velychynykompresiyiyi», *Avtomobyl'nyy transport : sb. nauch. tr. KHNADU*, KH., Iss. 29, Pp. 199–202.
6. Sarayeva, I.YU. (2011), «Regressionnyy analiz sluchayno velichiny kompressii», *Otkrytye informatsionnyye i komp'yuternyye integrovannyye tekhnologii: sb. nauch. tr., Nats. aerokosm. un-t «KHAU», Khar'kov*, Iss. 51, Pp. 105–110.
7. Kukov, S.S., Gritsenko, A.V. and Bakaykin, D.D. (2016), «Sovershenstvovaniye protsesa diagnostirovaniya tsilindroporshnevoy grupy», *Materialy LV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Dostizheniya nauki-agropromyshlennomu proizvodstvu»*, FGBOU VO Yuzhno-Ural'skiy GAU, Chelyabinsk, Pp. 77–82.
8. Filippova, Ye.M. and Nikolayev, Ye.V. (2011), «Opredeleniye tekhnicheskogo sostoyaniya tsilindroporshnevoy grupy po raskhodu karternykh gazov», *Trudy GOSNTI*, Vol. 108, P. 91.
9. Shcheglov, V.A. (2015), «O vozmozhnosti diagnostiki tsilindro-porshnevoy grupy DVS metodom chastotno-amplitudnogo analiza signala vibratsii s ispol'zovaniyem veyvlet-analiza», *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii*, Vol. 1, No. 3, Pp. 49–56.

Сарасва Ірина Юрїївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної експлуатації та сервісу автомобілів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Наукові інтереси:

– діагностика автомобіля.

E-mail: sarayeva9@gmail.com.

Мілентьєв Михайло Валерійович – студент спеціальності «Автомобільний транспорт» Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Наукові інтереси:

– діагностика та ремонт автомобілів.

E-mail: mmilentiev@icloub.com.

Стаття надійшла до редакції 11.09.2018.