

УДК 621.43

І.Г.Грабар, В.М.Іванченко, В.О.Ломакін, Д.Л.Калінкін, О.П.Кухарчук
Житомирський державний технологічний університет**ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛІЗУ РОБОТИ ДВИГУНА
МЕМЗ-2457 ЗА ФЛУКТУАЦІЄЮ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ**

Наведено обґрунтування вибору та опис програмно-апаратного комплексу для аналізу технічного стану двигуна МЕМЗ-2457 за флуктуацією частоти обертання колінчастого вала.

Ключові слова: програмно-апаратний комплекс, колінчастий вал.

Вступ

В наш час частка автомобільного транспорту в перевезеннях вантажів та пасажирів складає більш ніж 70% та 85% відповідно. Ці потреби мають стійку тенденцію до зростання, що вимагає постійного вирішення пов'язаних з ними задач: підвищення ефективності, паливної економічності, екологічності та надійності транспортних засобів. Необхідність застосування вказаних заходів загострюються з кожним роком. Одним з основних аспектів вирішення такого роду складних проблем є підвищення ефективності експлуатації систем транспортних засобів. Стрімкий розвиток сучасних засобів електроніки зробив можливим впроваджувати недорогі системи, що мають значну роздільну здатність та безпрецедентну точність вимірювань для безперервного контролю роботи основних вузлів та систем транспортних машин, [1].

Аналіз публікацій

В двигуні внутрішнього згоряння характер обертання колінчастого вала (КВ) пов'язаний безпосередньо з робочими процесами, що протікають в кожному з його циліндрів. Саме тому миттєва частота обертання КВ завжди змінюється, навіть на стаціонарних режимах роботи та ідеально відрегульованому двигуні. Характер зміни частоти обертання КВ протягом кожного робочого циклу в кожному з циліндрів дозволяє отримати значний об'єм інформації про показники роботи двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ). Наприклад, при прокручуванні КВ можна визначити компресію в циліндрах, величину сили тертя в циліндро-поршневій групі, перевірити значення кута випередження запалювання та інші параметри. Також є можливість оцінки розподілу крутного моменту та потужності по циліндрах при роботі ДВЗ на стаціонарних режимах [2]. Це дозволяє використовувати вимірювання миттєвих значень частоти обертання КВ для діагностування ДВЗ.

Сучасні електронні системи дозволяють реалізовувати програмно-апаратні комплекси (ПАК) для експериментального дослідження флуктуації частоти та значно підвищити точність вимірювання.

Мета та постановка задачі дослідження. Метою дослідження є аналіз роботи та двигуна на прикладі МЕМЗ-2457 за флуктуацією частоти обертання його КВ. Задачею дослідження є створення високоточного ПАК для дослідження кінематичних та динамічних параметрів ДВЗ автомобіля.

Програмно-апаратний комплекс для дослідження параметрів роботи двигуна

Найбільшу складність при дослідженні параметрів роботи ДВЗ являє собою вимірювання крутного моменту, оскільки його значення постійно та швидко змінюються.

Відомо, що індикаторний крутний момент двигуна внутрішнього згоряння можна знайти за виразом [3], Н·м:

$$M_i = M_{i0} + I_0 \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

де: $M_{оп}$ – момент опору, Н·м; I_0 – приведений момент інерції до осі КВ всіх рухомих мас ДВЗ, кг·м²; ω – частота обертання КВ, рад/с.

З іншого боку індикаторну потужність ДВЗ можна визначити з виразів [3], кВт:

$$N_i = \frac{p_i \cdot V_h \cdot i \cdot n}{30 \cdot \tau}, \quad (2)$$

де: p_i – індикаторний тиск в циліндрі двигуна, МПа, V_h – робочий об'єм циліндра, л; i – кількість циліндрів; n – частота обертання КВ, об/хв; τ – тактність ДВЗ; M_i – індикаторний крутний момент, Н·м.

Підставивши значення виразів (2) в (1) одержимо, Н·м:

$$\frac{p_i \cdot V_h \cdot i \cdot 1000}{\pi \cdot \tau} = M_{i_i} + I_0 \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

Враховуючи зміну приведенного моменту інерції кривошипно-шатунного механізму ДВЗ [4, 5], останній вираз можна переписати для одноциліндрового ДВЗ, Н·м:

$$\frac{p_i(\varphi) \cdot V_h \cdot 1000}{\pi \cdot \tau} = M_{i_i} + \left(A \cos^2 \varphi + B \cos \varphi + C + I_\varphi + I_i + I_e \right) \frac{d\omega}{dt} - \omega^2 \sin \varphi (2A \cos \varphi + B) \quad (4)$$

Отже, для визначення правої частини виразу (4) необхідно контролювати миттєві значення кутового положення, частоти обертання та прискорення КВ двигуна. Ці величини досить важко отримати теоретично, тому реальну картину можна визначити лише за допомогою експерименту.

Для дослідження кутового положення та частоти обертання КВ було обрано двигун MeM3-2457, який встановлено на автомобіль ЗАЗ-1103 «Славута». Мінімальна необхідна частота, яку повинен забезпечити датчик, враховуючи подвійний запас та швидкодію протікання процесу згоряння, для двигуна MeM3-2457 складає 14000 Гц [6]. Внаслідок того, що двигун MeM3-2457 на автомобілі «Славута» не має штатного тахометра та, відповідно, датчика частоти обертання КВ, запропонований комплекс повинен бути доповнений датчиками початкового положення (для визначення ВМТ) та частоти обертання КВ. В якості універсального датчика було використано інкрементальний трьохканальний енкодер (модуль HEDS-9040 та кодове колесо HEDS-6140#B13) фірми AVAGO technologies (США) (заводські номери модуля №0611 кодового колеса №0537). Цей датчик є оптичним з лазерним випромінювачем та має три виходи, один з яких видає маркерний сигнал на початку кожного оберту, та два виходи із зсувом фаз 90 °. Кількість імпульсів відповідає кількості отворів на кодовому колесі, що дозволяє отримувати інформацію про частоту та напрямок його обертання з роздільною здатністю 1000 імпульсів на оберт, а також його кутове положення. Основні характеристики енкодера представлені в табл.1.

Внаслідок високої чутливості датчик може реєструвати певні нерівномірності роботи двигуна. Точність і плавність роботи механічної системи визначається похибками виготовлення її елементів, монтажу, а також температурними й пружними деформаціями деталей (закручування валів, просадки підшипників, згину і т.п.). Первинні похибки виготовлення й збирання, а також деформації ланок порушують злагодженість руху привідних і ведених ланок, що приводить до похибок їх відносного положення, тобто до кінематичних похибок механізму.

В двигуні MeM3-2457 діаметральний зазор між корінними шийками КВ та їх вкладишами складає 0.04...0.089 мм, що забезпечує циркуляцію мастила та відсутність ударів при роботі з'єднання (за умови не витискання шару оливи). Осьова фіксація КВ виконується упорними півкільцями, які встановлені в гнізда підшипника 3-ї корінної шийки в блоці. Осьовий зазор в цьому з'єднанні складає 0.054...0.306 мм [7]. В автомобілях з поперечним розташуванням двигуна відстань між шківом привода генератора та корпусом автомобіля є мінімально можливою з конструктивних міркувань. Встановлення оптичного датчика HEDS-9040 та кодового колеса HEDS-6140#B13 на двигун MeM3-2457 являє собою складне конструкторське завдання. Основними проблемами їх монтажу є: обмежений простір (близько 14 мм) між зовнішньою площиною шківів та кузовом автомобіля; неможливість кріплення шківів в зборі з датчиками до КВ.

В результаті розроблено над компактну конструкцію для кріплення датчика, що дозволяє не тільки розмістити всі необхідні її елементи з зазором 2 мм, але й проводити монтаж та демонтаж всієї конструкції протягом декількох хвилин без демонтажу двигуна, та з мінімальними змінами його конструкції. Зміни торкнулись лише шківів привода генератора – в ньому було зроблено проточку та встановлено монтажну шайбу (рис. 1). Після проведення балансування шківів встановили на штатне місце. Це дозволило мінімізувати вплив модернізації на роботу ДВЗ автомобіля внаслідок незначних масово-габаритних параметрів шайби порівняно з шківом привода генератора. Така конструкція кронштейну дозволяє проводити випробування як на

режимах холостого ходу так і режимах часткових навантажень та повного навантаження в дорожніх умовах.

Таблиця 1

Характеристика модуля HEDS-9040 та кодового колеса HEDS-6140#B13 фірми AVAGO technologies.

Параметр	HEDS-9040	HEDS-6140#B13
Діапазон робочих температур	-40°C ...+100°C	-40°C ...+100°C
Роздільна здатність	-	1000 імп/об.
Кількість каналів	3	3
Максимальна частота обертання	-	30 000 об/хв
Допустиме осьове биття вала	±0.25 мм	±0.25 мм
Допустимий ексцентриситет разом з радіальним биттям вала, не більше	0.1 мм	±0.1 мм
Максимальне кутове прискорення	250 000 рад/с ²	250 000 рад/с ²
Максимальна помилка циклу однієї дискрети (% за оберт)	5.5 °е (1.5·10 ⁻³ %)	7.5 °е (2.1·10 ⁻³ %)
Максимальна похибка положення вала (за оберт)	40' (0.19%)	20' (0.09%)



Рис. 1. Датчик з кронштейном на КВ ДВЗ МеМЗ-2457

Враховуючи запропоновані конструктивні рішення можна стверджувати, що всі зазори знаходяться в допустимих межах для використання вищевказаного енкодера (при забезпеченні ексцентриситету перехідного вала не більше 0,156 мм, що було забезпечено при виготовленні кронштейна кріплення датчика на КВ (рис. 1)), та забезпечена точність вимірювання згідно з даними табл. 1.

Внаслідок складності проведення експерименту на автомобілі без попередньої апробації роботи комплексу в лабораторних умовах, створено спеціальний стенд (рис. 2.). В якості привідного механізму було використано електродвигун постійного струму ДП-1П-26ЦР-2К, який дозволяє проводити перевірку роботи датчика на частотах обертання до 7000 об/хв. (табл. 2), що повністю перекидає частотний діапазон роботи двигуна MeM3-2457 [6].

Обробку отриманих від датчика даних проводили на базі універсального, розробленого на кафедрі автомобілів і механіки технічних систем ЖДТУ, програмно-апаратного комплексу «Електронний протокол руху автомобіля» (ЕПРА) (Рис. 3) [1]. Цей комплекс дозволяє досліджувати швидкоплинні процеси, що мають місце в сучасних транспортних та технологічних машинах, наприклад:

- миттєві швидкість та прискорення транспортного засобу;
- загальний пройдений шлях;
- пройдений шлях за кожну транспортну їзду (цикл);
- тривалість кожної транспортної їздки (циклу);
- загальна кількість їздок (циклів);
- статистичний розподіл швидкостей та прискорень;
- спожита кількість пального (енергії) за їзду (цикл) та загальна;
- найбільш ймовірний фізіологічний стан водія (оператора);
- технічний стан транспортного засобу.

Вивчення кінетики цих процесів дає надзвичайно важливу інформацію конструктору, технологу, експлуатаційнику, економісту, юристу тощо. Це інформація про період, амплітуду, динаміку змін та час протікання таких фізичних явищ та технологічних параметрів, як:

- стаціонарні та нестаціонарні поля напруг та деформацій, в тому числі і від силових та теплових навантажень вузлів і деталей транспортного засобу;
- потужність приводу;
- переміщення, швидкості і прискорення транспортного засобу, як в цілому, так і його вузлів;
- гальмівні властивості транспортного засобу тощо.

Програмно-апаратний комплекс ЕПРА дає можливість збирати дані, як аналогові так і цифрові, обробляти їх, та зберігати у цифровому носії, навіть протягом всього життєвого циклу машини.

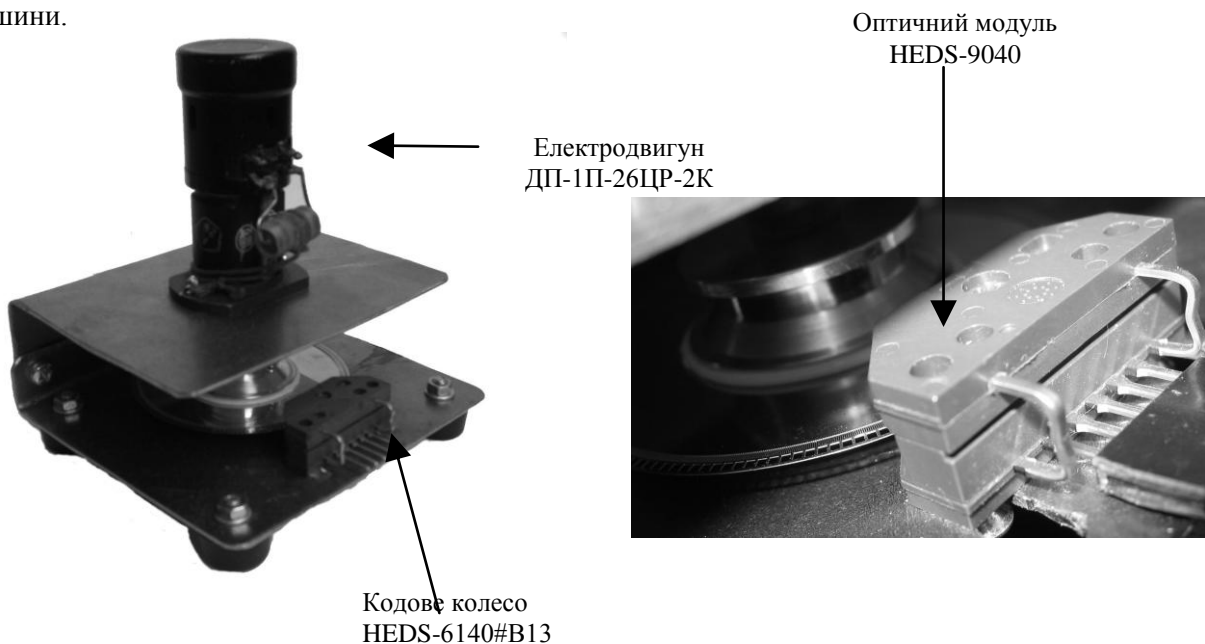


Рис. 2. Загальний вигляд перевірного стенда для перевірки енкодера

Таблиця 2

Основні технічні характеристики двигуна ДП-1П-26ЦР-2К

Параметр	Значення
Номинальна потужність, Вт	1,44
Номинальна частота обертання, об/хв	7000
Номинальний крутний момент, мН·м	1,96
Номинальна сила струму, А	0,3
ККД, %	18
Напрямок обертання,	праве
Маса, кг	0,065

При дослідженні флуктуації частоти ДВЗ за допомогою модуля HEDS-9040 та кодового колеса HEDS-6140#B13 основними проблемами є величезний, як для МК, потік даних в одиницю часу та необхідна висока точність вимірювання часу.

Для безперервного запису даних при обертанні КВ двигуна MeM3-2457 на максимальній частоті 5600 об/хв та за умови використання 16 розрядних чисел, необхідно щосекунди зберігати 93427 значень періодів між імпульсами ($1001 \times 5600 / 60 \approx 93427$), що складає 182,5 кбайт/с. Для забезпечення зберігання інформації з такою швидкістю було використано SD карту пам'яті в режимі SPI, який дозволяє виконувати запис зі швидкістю передачі до 25 Мбод.

Для забезпечення достатньої точності вимірювання інтервалів часу було використано кварцовий резонатор 24,576 МГц, який забезпечив максимальне значення похибки дискретизації на рівні 0,38 % при частоті обертання двигуна 5600 об/хв.



Рис.3. Загальний вигляд ЕПРА

Оскільки на автомобілі «Славути» відсутній штатний тахометр для проведення експериментальних досліджень, створено систему візуалізації середньої частоти обертання КВ двигуна. В якості сигналів для відображення було використано сигнал положення ВМТ модуля HEDS-9040, період якого співпадає з періодом обертання КВ. Шляхом нескладних перетворень цього сигналу розраховується середня частота обертання КВ, яка і відображається на дисплеї. Загальний вигляд ПАК «ЕПРА», адаптованого для дослідження флуктуації частоти обертання КВ

ДВЗ МеМЗ-2457 за допомогою оптичного модуля HEDS-9040 та кодового колеса HEDS-6140#B13 фірми AVAGO technologies, разом з тахометром (без корпусу) наведено на рис. 4.

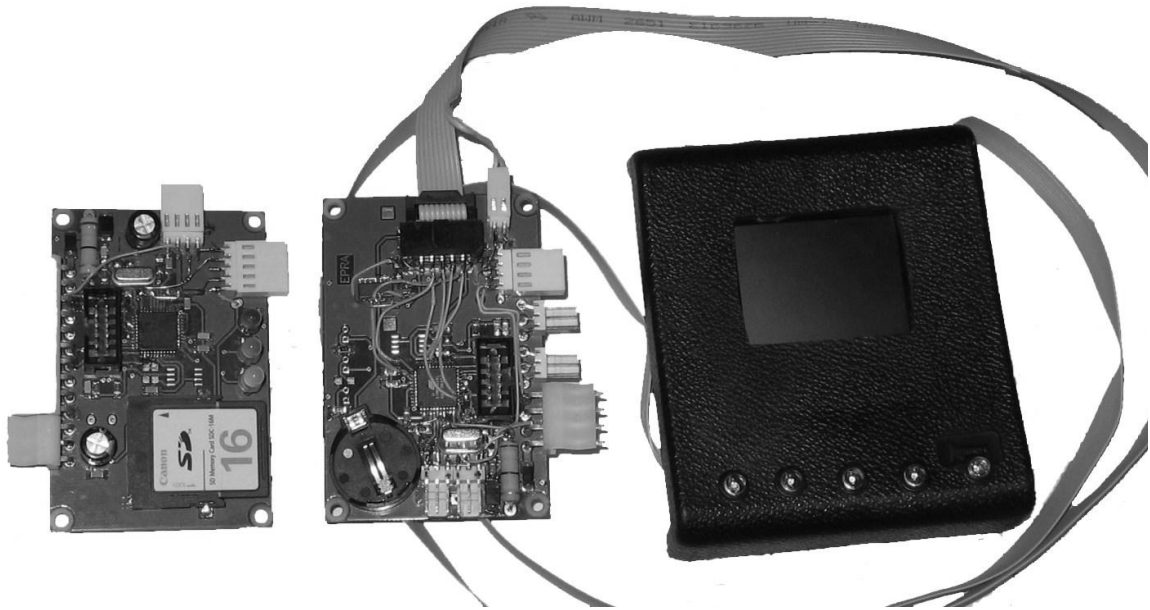


Рис. 4. Загальний вигляд ПАК енкодера на КВ ДВЗ МеМЗ-2457

Висновки:

1. Обґрунтовано вимоги щодо точності датчика для аналізу флуктуації частоти двигуна МеМЗ-2457, який повинен забезпечити частоту слідування імпульсів не менше 14 кГц.
2. Створено програмно-апаратний комплекс на базі «Електронного протоколу руху автомобіля», що дозволяє проводити експериментальні дослідження флуктуації частоти обертання колінчастого вала двигуна МеМЗ-2457 з максимальними відносною похибкою визначення його положення 0,19% за оберт, та похибкою дискретизації інтервалів часу при максимальній частоті обертання 0,38 %.

1. Електронний паспорт руху транспортного засобу / Грабар І.Г., Іванченко В.М., Калінкін Д.Л., Кухарчук О.П. // Вісник ЖДТУ. – 2010. – в друці.
2. Г.М. Басалыгин Моделирование динамики кривошипно-шатунного механизма как упруго-инерционной системы с одной степенью свободы // Двигателестроение Л.: Машиностроение .- № 9. –1990. – С. 16 –19.
3. Абрамчук Ф.І., Гутаревич Ю.Ф., Долганов К.С., Тимченко І.І. Автомобільні двигуни: Підручник. –3-тє видання. – К.: Арістей, 2007. – 476с.
4. Грабар І.Г., Ільченко А.В., Ломакін В.О. Математичне моделювання процесу зміни моменту інерції кривошипно-шатунного механізму двигуна внутрішнього згоряння // Вісник ЖДТУ №4 (43), 2007 р. – с. 15-25.
5. A.V. Pchenko, E.V. Zabashta, V. A. Lomakin Change Of The Moment Of Inertia Of V-Type Crank-Connecting Rod Mechanism Of Internal Combustion Engine // // Proceedings Of The International Scientific Conference MECHANICS 2008.–Rzeszów, June 2008. –P. 129-136.
6. Райков И.Я. Испытания двигателей внутреннего сгорания. Учебник для вузов.- М: Высш. школа, 1975. – 320 с.
7. Быков К.П., Шленчик Т.А. Автомобили «Таврия»,«Славута» ЗАЗ-1102, ЗАЗ-1103, ЗАЗ-1105 и их модификации. Устройство, эксплуатация, ремонт, пособие по ремонту/ Ред. Т.А. Шленчак.- ПКФ «Ранок», 2006.-256с.:ил.