

МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ З П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИМИ ДАТЧИКАМИ ВПОРСКУВАННЯ ДЛЯ СТЕНДОВОЇ ДІАГНОСТИКИ ПАЛИВНИХ НАСОСІВ

О.М. Іванов, аспірант;

В.І. Левчук, канд. техн. наук, старший викладач;*

С.О. Носик, аспірант

Дніпропетровський державний аграрний університет,

м. Дніпропетровськ;

**Полтавська державна аграрна академія, м. Полтава*

Предложена новая микроконтроллерная измерительная система для диагностики топливных насосов высокого давления за углом начала подачи топлива. Для увеличения точности измеряемого параметра была проведена модернизация датчиков впрыска путем внедрения в их конструкцию чувствительного пьезокерамического элемента.

***Ключевые слова:** угол начала впрыска топлива, частота вращения, угол поворота, датчик впрыска, пьезоэлемент, диагностический стенд, топливный насос, микроконтроллер.*

Запропонована нова мікроконтролерна вимірвальна система для діагностування паливних насосів високого тиску за кутом початку подачі палива. Для підвищення точності вимірвального параметра проведено модернізацію датчиків впорскування шляхом введенням в їх конструкцію чуттєвого п'єзокерамічного елемента.

***Ключові слова:** кут початку впорскування палива, частота обертання, кут повороту, датчик впорскування, п'єзоелемент, діагностичний стенд, паливний насос, мікроконтролер.*

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Справність та надійність роботи будь-яких силових енергетичних установок залежать, передусім від рівня досконалості роботи його ключових функціональних складових.

Для дизелів однією з таких основних складових є система паливоподачі, оскільки саме ця система за правильного підбору регулювальних параметрів та налаштувань забезпечує надійність, економічність та екологічність роботи двигуна на більшості режимах його роботи при різних умовах експлуатації.

Особливо важливим для системи паливоподачі дизеля є дотримання правильності процедури налагодження її на задані регулювальні параметри, оскільки досить несуттєві неточності та відхилення можуть призвести до суттєвого підвищення витрати пального, зниження потужнісних показників, погіршення віброакустичних якостей двигуна, задимленості відпрацьованих газів та інших негативних факторів, що виникають при несправностях у системі паливоподачі.

Водночас якісне проведення налагоджувальних робіт неможливе без застосування високоточних діагностичних систем (засобів) вимірювання. Тому розроблення таких систем є надзвичайно актуальним та необхідним.

Запропонована система вимірювання призначена для стендового діагностування дизельних паливних насосів за такими параметрами як кут початку впорскування палива форсункою та рівномірність чергування подачі палива між форсунками на різних швидкісних режимах роботи дизеля.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Переважає більшість стендів для випробування та регулювання паливної апаратури, до яких належать і найбільш поширені стенди Красноуфимського дослідно-експериментального заводу КИ-921М, КИ-921МТ та КИ-22205-01, комплектуються серійними контактними датчиками початку впорскування з підпруженою контактною парою «контактна кулька-корпус датчика». Реєстрація початку подачі палива цим датчиком відбувається в момент розірвання (з'єднання) контактної парою сигнального електричного ланцюга під дією струменя палива з розпилювача форсунки. Як фіксатор моменту початку подачі палива найчастіше виступає серійний стендовий вимірювальний блок або його модернізований варіант БЕСТ-12М [1]. Слабкою ланкою вимірювального ланцюга «контактний датчик-вимірювальний блок» є датчик впорскування. До недоліків цього датчика можна віднести такі: інерційність при реагуванні на струм палива, що призводить до похибки у визначенні кута початку подачі палива близько 0,1-0,2 градуса [2]; при циклічній роботі датчика спостерігаються спрацювання посадочного місця контактної кульки та послаблення навантажувальної пружини, що спричиняє втрату працездатності; часті порушення контакту у сигнальному електричному ланцюгу під час впорскування палива; при розбіжностях у налагодженні датчиків може спостерігатися поява похибки у визначенні фазового кута між подальшими впорскуваннями впродовж одного робочого циклу; вагома похибка при вимірюванні кута впорскування на малих оборотах паливного насоса.

Крім датчика впорскування, вимірювальний блок (його серійний варіант) містить свої негативні риси, а саме: відсутність можливості в одночасному відстежуванні зміни кута початку впорскування палива для більше ніж однієї форсунки впродовж одного робочого циклу; непередбачена функція зберігання послідовності результатів вимірювання кутів впорскування в межах певного часового інтервалу або робочих циклів; подання вимірювальної інформації лише у цифровій формі на індикаторному табло; відсутній комунікаційний зв'язок із персональним комп'ютером; ускладнена електронна будова.

На заміну контактним датчиком впорскування широкого застосування набули безконтактні датчики з чутливими елементами, виготовлені з п'єзоелектричної кераміки. Так, у роботі [2] наводиться опис одного із таких датчиків, що пропонуються як альтернативна заміна контактним датчикам для вищезгаданих стендів. Процес вимірювання початку подачі палива даними датчиками базується на опосередкованому методі вимірювання і полягає у фіксації моменту стрибкоподібного підвищення тиску в об'ємній ємності при впорскуванні до неї палива форсункою. При збільшенні тиску відбувається деформація корпусу ємності, яка сприймається п'єзоелементом, та генерується відповідний інформаційний сигнал про початок подачі палива. До недоліків такого способу вимірювання можна віднести ті самі негативні риси, що притаманні опосередкованим методам вимірювання, а також необхідно відмітити достатньо складну будову цього датчика.

Особливе місце серед п'єзоелектричних датчиків впорскування посідають накладні п'єзодатчики, що монтуються на паливні трубки високого тиску та відфіксують початок подачі палива форсункою через об'ємну деформацію цих трубок. Дані датчики застосовуються на переважній більшості сучасних закордонних паливних стендах, таких як Bosch, Motopal, MakTest та інші. Основний недолік цих датчиків схований у самому підході до процесу вимірювання початку впорскування в такий спосіб, а саме у складній та маловивченій функціональній залежності між об'ємною деформацією трубок та

зростаючим тиском у них. Це може стати причиною хибного судження про правильність визначення кута початку впорскування палива.

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою розроблення мікроконтролерної системи вимірювання є забезпечення належної точності вимірювання кута початку впорскування із застосуванням нових датчиків упорскування з п'єзокерамічними елементами. Також за мету нової системи вимірювання поставлена необхідність підвищення інформативності про досліджуваний параметр паливоподачі та організацію комунікаційного зв'язку з персональним комп'ютером.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Нові п'єзоелектричні датчики для мікроконтролерної системи вимірювання розроблялися на основі серійних контактних датчиків упорскування паливного стенда КИ-22205. З метою уникнення глибокої модернізації конструкції цих датчиків та поліпшення їх функціональних якостей суттєвих змін зазнала лише підпружинена контактна пара. Так, замість неї в конструкцію датчиків було вмонтовано чуттєвий п'єзоелектричний елемент, який розташовується в паливній камері, куди впорскується паливо. Вибір даного місця розташування дозволить у прямий спосіб відстежувати момент початку подачі палива форсункою з уникненням фіксації усіляких механічних деформацій різноманітних паливних об'ємів (трубок високого тиску, камери впорскування та інших).

Загальний вигляд датчика впорскування з умонтованим п'єзоелементом зображений на рис.1. До його складу входять циліндричні втулки 1, призначені для надійного монтажу форсунки в корпус датчика; воронка 2, що виконує функцію камери впорскування; розташований під воронкою чуттєвий п'єзоелектричний елемент 4; стакан 3 з радіальними отворами для збору та відведення палива до мірної ємності. Прокладка 8 з обмежувальним кільцем 7 служить ущільненням для форсунки. З метою гальванічної ізоляції стакану від інших конструкційних елементів датчика використовується пластикове кільце 6. Контактні гвинти 5 служать для зняття електричного сигналу з п'єзоелемента через стакан 3 та воронку 2, що контактують з цим елементом.

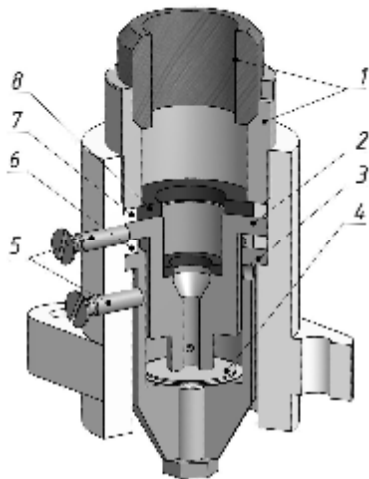


Рисунок 1 - Конструкційна схема датчика впорскування з п'єзокерамічним елементом

Під час впорскування палива форсункою в камері воронки стрибкоподібно зростає гідравлічний тиск, який, діючи на п'єзоелемент, викликає в ньому на мікрорівні певні фізичні зміни, які призводять до виникнення на його поверхні електричного потенціалу (напруги). Утворена напруга через контактні гвинти реєструється та обробляється спроектованою мікроконтролерною системою вимірювання.

Особливістю використовуваного в запропонованих датчиках впорскування п'єзоелектричного елемента є його здатність реагувати лише на динамічну зміну гідравлічного тиску та генерувати сигнал з рівнем вольтажу, пропорційного швидкості зростання або спаду цього тиску. На рис. 2

відображена тенденція зміни позитивної складової максимальної амплітуди сигналу з п'єзоелемента залежно від частоти обертання паливного насоса ЛСТН 49010 при положенні важеля керування на максимальну подачу палива. Як видно з графіка, позитивна складова сигналу змінюється за нелінійним законом, починаючи від 2,8 В при 100 хв^{-1} до майже 21В при 850 хв^{-1} . Це свідчить про достатньо високу чутливість цього п'єзоелемента навіть при невисоких тисках впорскування на малих обертах паливного насоса при пускових подачах палива.

Розроблена мікроконтролерна система вимірювання (МСВ) складається з двох взаємозв'язаних частин: апаратної та програмної. Апаратна частина, яка побудована на базі 8-розрядного мікроконтролера (МК) фірми АТМЕЛ, спроектована для збору інформації з контрольно-вимірювальних датчиків, первісної обробки зібраної інформації та передачі через комунікаційний зв'язок сформованих результатів вимірювань до персонального комп'ютера на подальшу обробку та накопичення.

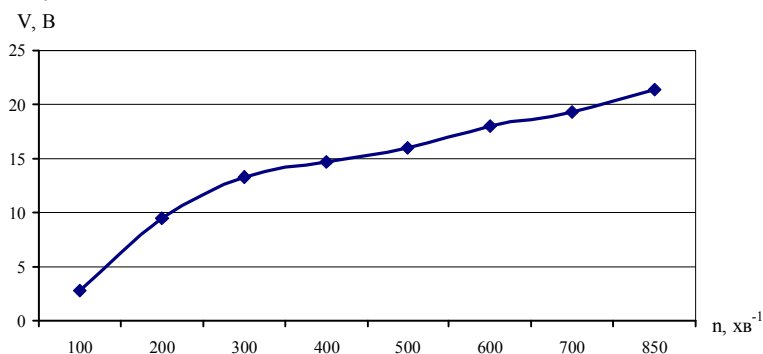


Рисунок 2 - Зміна позитивної складової амплітуди сигналу з п'єзодатчика залежно від частоти обертання при максимальній подачі палива

Крім розглянутих вище п'єзоелектричних датчиків упорскування, МСВ знімає інформацію зі стендових оптичних датчиків кутової швидкості привідного валу стенду та контрольної мітки здійснення валом повного оберту. На підставі показників з цих датчиків МСВ формує кінцеву величину кута початку подачі палива.

Методика визначення кутів початку подачі палива для паливного насоса, яка була закладена в програмному алгоритмі МК МСВ, полягає в такому.

Після здійснення кулачковим валом насоса повного оберту, на що вказує поява сигналу з датчика контрольної мітки, МК починає підрахунок кількості одиничних імпульсів з датчика кутової швидкості, тривалість яких характеризується часовим проміжком повороту валу на сталу кутову міру. В момент початку подачі палива однією із форсунок імпульс із відповідного датчика впорскування після обробки у формувачі цифрових сигналів надходить до МК та спонукає фіксацію поточного значення лічильника одиничних імпульсів. Зафіксована кількість імпульсів характеризує кутову міру початку подачі палива для першої спрацьованої форсунки. Точність отриманого значення кута початку впорскування буде кратною сталій кутовій мірі одиночного імпульсу. Для підвищення точності розрахунку кута початку впорскування у внутрішньому алгоритмі МК закладена функція обчислення кутової частки сталої кутової міри за її часовою тривалістю (тривалістю одиночного імпульсу). Розрахунок ведеться за таким математичним виразом:

$$\Delta = \alpha \cdot \left(1 - \frac{t_k - t_{\phi.в.}}{T_{\text{имп}}} \right), \quad (1)$$

де Δ - частка кутової міри, град.; α - стала кутова міра одиночного імпульсу датчика кутової швидкості, град.; t_k - час, при якому відбулася зміна фронту сигналу останнього одиночного імпульсу перед початком подачі палива форсункою, с; $t_{\phi.в.}$ - час, в який розпочалася подача палива форсункою, с; $T_{\text{имп}}$ - тривалість одиночного імпульсу, с.

З урахуванням цієї поправки остаточне значення кута початку подачі буде визначатися з виразу

$$\beta = \Delta + k \cdot \alpha, \quad (2)$$

де k - кількість імпульсів у лічильнику МК до моменту початку подачі палива форсункою.

У випадку початку подачі палива іншою форсункою в межах одного робочого циклу (оберту) підрахунок його кутової міри проводиться за аналогічною методикою. В момент здійснення валом насоса одного оберту значення лічильника імпульсів обнуляється і процес відстеження моментів початку впорскування палива форсунками повторюється.

Перевагою визначення кутів початку впорскування за кутовою мірою є виключення можливості впливу на точність результату розрахунку рівня нестабільності обертання привідного валу стенда в межах одного оберту.

За кутовими мірами МК проводить також обчислення частоти обертання привідного валу. Принцип розрахунку цього параметра зводиться до обчислення середньоарифметичного значення частоти обертання на основі кількох значень, занесених до числового масиву. Сформований числовий масив містять значення частоти обертання, що були розраховані шляхом диференціювання за часом сталого кута повороту валу насоса в інтервалі між двома послідовними впорскуваннями паливного насоса:

$$n_n = \frac{\alpha_{const}}{360 \cdot t_{\alpha_{const}}}, \quad (3)$$

де α_{const} - величина сталого кута повороту, град.; $t_{\alpha_{const}}$ - часовий інтервал, хв.

Середньоарифметичне значення частоти обертання у МК реалізується за таким математичним виразом:

$$n_{cp} = n_1 + \frac{\sum_{n=2}^N (n_n - n_1)}{N}, \quad (4)$$

де N - кількість значень частоти обертання у числовому масиві.

Цей принцип визначення частоти обертання дає змогу виявити та прослідити вплив ступеня нерівномірності обертання валу насоса в межах одного робочого циклу (при сталій частоті обертання) на зміну рівномірності кутів початку впорскування.

Точність розрахунку приведених параметрів становить: для частоти обертання - ± 1 хв⁻¹, для кута початку впорскування - $\pm 1'$. Досягнута точність вимірювання повною мірою відповідає вимогам ДСТУ ГОСТ 10578:2003 [4].

Уся зібрана та оброблена інформація через високошвидкісний комунікаційний інтерфейс USB ver.2.0 направляєтся до персонального комп'ютера, де реалізується друга програмна частина МСВ.

Програмна частина є програмним кодом, складеним за певним математичним алгоритмом, який реалізується за допомогою об'єктно-орієнтованої мови програмування.

Програмна частина служить для виконання таких функцій: організації надійних транзакційних операцій між двома частинами МСВ через комунікаційний зв'язок, дешифрування та сортування вимірної інформації, підготовки та виведення результатів вимірювань у графічній та цифровій формі на дисплей ПК, а також збереження цієї інформації у табличній формі на жорсткий диск ПК для подальшого застосування та використання в наукових та практичних цілях.

Кут початку подачі палива форсункою можна визначати як при сталій частоті обертання паливного насоса, так і досліджувати його зміну на різноманітних динамічних режимах, реалізуючи різні закони зміни частоти обертання. Остання властивість особливо корисна під час випробування електронних систем подачі палива та під час діагностики автоматичних засобів зміни кута випередження впорскування палива. При цьому характер зміни кута початку подачі можна спостерігати як в абсолютних значеннях цього параметра, так і у відхиленнях його від певної фіксованої величини.

Дослідження можна проводити для однієї та кількох форсунок одночасно, при цьому їх кількість можна змінювати в будь-який час за допомогою комплексу контактних перемикачів, за положенням яких стежить МК МСВ.

Для ілюстрації роботоздатності розробленої МСВ було проведено експериментальні дослідження паливного насоса НД-22/6Б4 з визначення кута початку подачі палива для однієї із форсунок. На рис. 3 а відображений статичний ряд величини кута початку подачі палива при сталій частоті обертання 1050 хв^{-1} , а на рис. 3 б – при динаміці розгону паливного насоса від 400 до 1050 хв^{-1} .

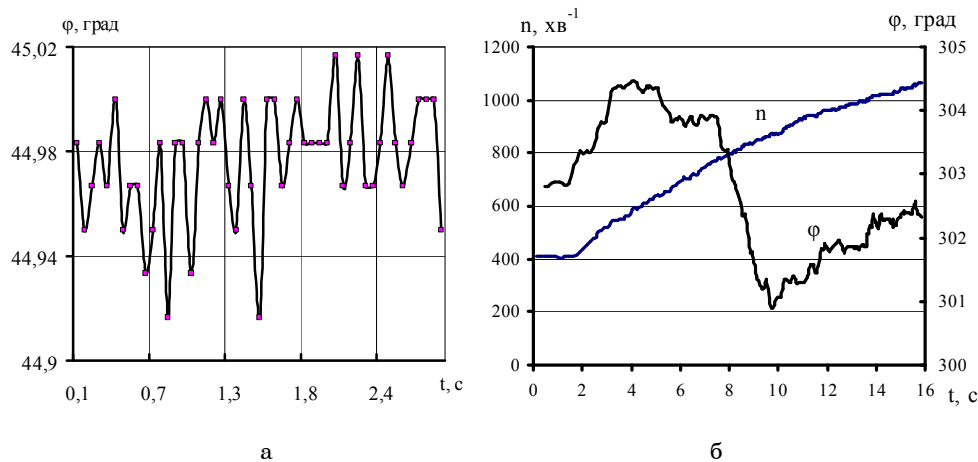


Рисунок 3 - Зміна кута початку подачі палива паливного насоса НД-22/6Б4 на номінальній частоті обертання (а) та під час розгону (б).

ВИСНОВКИ

Розглянута МСВ дозволяє більш докладно досліджувати початок подачі палива форсункою на різних режимах роботи паливного насоса, а завдяки комунікаційному зв'язку з ПК підвищити інформативність цього дослідження. При цьому необхідна точність замірів забезпечується

високопродуктивним мікроконтролерним засобом вимірювання та контролюю-вимірювальним датчикам на основі п'єзокерамічних елементів.

Загалом застосування МСВ підвищує достовірність процесу діагностики системи паливоподачі та сприяє більш якісному її налагоджуванню та регулюванню, що в кінцевому підсумку позитивним чином відобразиться на еколого-економічних показниках роботи дизелів.

SUMMARY

MICROCONTROLLER MEASUREMENT SYSTEM WITH PIEZOELECTRIC SENSORS INJECTION FOR POSTER DIAGNOSIS OF FUEL PUMP

O.M. Ivanov, V.I. Levchuk, S.O. Nosik*

Dnepropetrovsk State Agrarian University, Dnepropetrovsk;

**Poltava State Agrarian Academy, Poltava*

A new microcontroller measuring system for the diagnosis of high-pressure fuel pumps around the corner start of fuel delivery. To increase the accuracy of the measured parameter has been upgraded through the introduction of fuel injection sensors in their design sensitive piezoceramic element.

Key words: *the angle of the start of fuel injection, rotational speed, steering angle sensor fuel injection, piezo, a diagnostic, fuel pump, a microcontroller.*

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Блок измерительный для топливного стенда БЭСТ-12М // Руководство по эксплуатации. – Краснообск: НПП «Диагностические приборы», 2005. – 39 с.
2. Internet-ресурс: <http://www.dipr.ru/stati/nauka-i-razrabotki/datchiki-nachala-vpryskivaniia-topliva-forsunkoi>
3. Модернизация стендов для испытания и регулировки топливных насосов / Бобрышев Г.П., Моносзон А.А., Радченко Ю.Г. // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2005. – №12. – С.10-14.
4. Насоси паливні дизелів: ДСТУ ГОСТ 10578:2003. – [Чинний від 2004-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України. 2003. – 17 с. – (Національний стандарт України).

Надійшла до редакції 4 листопада 2009 р.