

Р.М. Харак, О.С. Гіззатуллін

Полтавський державний аграрний університет

ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНОЇ СХЕМИ ЕЛЕКТРОННОГО ТАХОМЕТРА ДЛЯ ДИЗЕЛЯ

Об'єктом дослідження є системи контролю за роботою дизеля, частота обертання колінчатого валу, електронний тахометр. Проблемою, що вирішувалася, було визначення техніко-технологічних рішень, які уможливають підвищення ефективності роботи дизеля шляхом обґрунтування конструкційної схеми електронного тахометра. За результатами досліджень обґрунтовано конструкцію та принцип роботи експериментального електронного тахометра для дизеля на базі ARDUINO R3 UNO, датчика Холла SS49E та дисплейного модуля 1602 РК. Запропоновано розглядати електронний тахометр як доповнення до експериментальної електронної системи регулювання паливopодачі для дизеля на базі паливного насоса НД-21 розподільного типу.

Встановлено лінійну залежність між показниками розробленого електронного тахометра та механічного тахометра моделі TCH10-P (ДСТУ EN60051-2:2017) за середнього квадратичного відхилення $\pm 4,8 \text{ хв}^{-1}$. Відзначено, що розбіжність показників аналогового і цифрового тахометрів не перевищувала 2,5% у всьому діапазоні вимірювань (до 1000 хв^{-1}). Електронний тахометр мав швидкий час відгуку ($\sim 150 \text{ мс}$), що уможливило відстежувати навіть короткочасні змінення частоти обертання.

Ключові слова: система контролю, дизель, частота обертання колінчатого валу, електронний тахометр.

R.M. Kharak, O.S. Hizzatullin

JUSTIFICATION OF THE DESIGN SCHEME OF AN ELECTRONIC TACHOMETER FOR A DIESEL ENGINE

The object of the study is diesel engine monitoring systems, crankshaft rotational speed, and an electronic tachometer. The problem addressed was to determine technical and technological solutions that improve the efficiency of diesel operation by justifying the design scheme of an electronic tachometer. Based on the research results, the design and operating principle of an experimental electronic tachometer for a diesel engine were substantiated. The tachometer was developed on the basis of the Arduino Uno R3 microcontroller, Hall effect sensor SS49E, and 1602 LCD module. The device is proposed as a complementary component of an experimental electronic fuel supply control system for a diesel engine equipped with a distributor-type fuel injection pump ND-21.

A linear relationship was established between the readings of the developed electronic tachometer and the mechanical tachometer model TCH10-R (DSTU EN60051-2:2017), with a root mean square deviation of $\pm 4.8 \text{ rpm}$. The discrepancy between the analog and digital tachometer readings did not exceed 2.5% over the entire measurement range (up to 1000 rpm). The electronic tachometer demonstrated a fast response time ($\sim 150 \text{ ms}$), which made it possible to track even short-term changes in rotational speed.

Keywords: control system, diesel engine, crankshaft speed, electronic tachometer.

Вступ. У сучасних умовах енергозбереження та підвищення ефективності сільськогосподарських машин особливе значення має удосконалення систем контролю за роботою дизелів. Частота обертання колінчатого валу є одним з основних параметрів, який відображає режим роботи дизеля і безпосередньо впливає на подачу пального, ефективність згоряння, зношення вузлів і рівень шкідливих викидів. Відповідно, точне та оперативне вимірювання цього параметра є критично важливим для побудови сучасних систем автоматизованого керування.

Наведене обумовлює актуальність розроблення дешевих, надійних та високоточних електронних тахометрів, які здатні працювати в умовах високих вібрацій, температур та забруднень, характерних для сільськогосподарської техніки.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Серед існуючих систем вимірювання частоти обертання дизеля найбільш поширеними є механічні тахометри та промислові електронні сенсори індуктивного або оптичного типу. Механічні тахометри, такі як модель TCH10-P відповідно до ДСТУ EN60051-2:2017, забезпечують прийнятну точність, проте характеризуються низкою суттєвих недоліків: інерційність, залежність точності від ручного встановлення, зношення механічних частин, чутливість до вібрацій та незручність в інтеграції з електронними системами керування [1].

Індуктивні сенсори часто потребують спеціального виконання колінчатого валу або наявності зубчастого колеса, що ускладнює модернізацію старих моделей дизелів [2]. Крім того, для зазначених сенсорів характерно зменшення точності за умов забруднення або змінненню проміжків. Оптичні тахометри демонструють високу точність, проте є малопридатними для роботи в умовах пилу, вологи та забруднення робочих поверхонь, а також вимагають точного позиціонування та чистоти оптичного каналу [3].

Системи на базі магніторезистивних або ефекту Холла сенсорів мають більшу стійкість до зовнішніх впливів та забезпечують можливість побудови дешевих, компактних і надійних систем. Проте у більшості випадків їх використовують в автомобілях або побутових електроприладах, а не в умовах експлуатації сільськогосподарської техніки.

Потенціал мікропроцесорних рішень на базі Arduino для побудови систем моніторингу параметрів агрегатів відзначено у дослідженнях [4-5]. Проте необхідного обсягу прикладних досліджень з практичним використанням подібних систем у поєднанні з дизелями, що мають паливні насоси розподільного типу, зокрема моделі НД-21, на сьогодні ще не достатньо [6-7].

За таких умов існує нагальна потреба в розробленні та експериментальній перевірці електронного тахометра, у якого поєднано переваги сенсорів Холла, мікроконтролера оброблення та зручного інтерфейсу відображення. Така система повинна бути сумісною з дизелями сільськогосподарської техніки, легко адаптуватися до різних моделей, працювати в умовах забруднення і вібрації та забезпечувати точне й стабільне вимірювання частоти обертання.

Мета та задачі досліджень. Метою досліджень є підвищення ефективності роботи дизеля шляхом обґрунтування конструкційної схеми електронного тахометра.

Для досягнення мети було поставлено наступні завдання:

- розробити електронний тахометр для дизеля на базі ARDUINO R3 UNO, датчика Холла SS49E та дисплейного модуля 1602 РК;
- провести дослідження з визначення точності вимірювань розробленого електронного тахометра у порівнянні з механічним тахометром моделі ТЧ10-Р (ДСТУ EN60051-2:2017);
- дослідити розроблений тахометр у складі електронної системи регулювання паливоподачі (на базі паливного насоса НД-21).

Методика проведення досліджень. Експериментальні дослідження проводили у лабораторних умовах на базі токарного верстата 1М61, який забезпечував обертання об'єкта з точно заданою частотою. Це дозволило створити стабільне середовище для порівняльного аналізу показників.

Неодимовий магніт закріплювали на патроні токарного верстата. Датчик Холла SS49E встановлювали на відстані 5–10 мм від траєкторії руху магніту. Зчитування імпульсів здійснювали за допомогою мікроконтролера Arduino Uno R3. Частоту обертання (RPM-Revolutions Per Minute, хв⁻¹), обчислювали і відображали на дисплей РК-1602. Для перевірки точності вимірювань розробленого електронного тахометра використовували механічний тахометр моделі ТЧ10-Р (ДСТУ EN60051-2:2017). Зазначений тахометр забезпечує вимірювання частоти обертання у діапазоні до 1000 хв⁻¹ з класом точності 1,0.

Механічний тахометр фіксували вручну безпосередньо до торця вала. Для кожного режиму роботи (змінювали частоту обертання) знімали показники з обох тахометрів (аналогового та цифрового). Дані зчитувалися після стабілізації обертів, фіксувалися вручну і фотографувалися для верифікації. Повторюваність дослідів п'ятикратна.

Похибки розраховували за формулою:

$$\Delta = \frac{RPM_{ел.} - RPM_{мех.}}{RPM_{мех.} \cdot 100\%}$$

Основне оброблення результатів експериментальних даних виконували згідно [8] з використанням програмного середовища Microsoft Excel. Визначали наступні величини: середнє значення, стандартна похибка, дисперсія, медіана, середнє квадратичне відхилення, коефіцієнти ексцесу та асиметрії.

Методика досліджень розробленого тахометра у складі електронної системи регулювання паливоподачі (на базі паливного насоса НД-21). Дослідження функціонування електронного тахометра у складі експериментальної системи регулювання паливоподачі проводили на лабораторному стенді КІ-15711, оснащеному паливним насосом розподільного типу НД-21. Метою дослідження було перевірити можливість інтеграції тахометра до системи зворотного зв'язку для керування подачею пального шляхом вимірювання обертів привідного вала паливного насоса.

Привід паливного насоса здійснювали за допомогою гідравлічного двигуна з регульованою частотою обертання. Неодимовий магніт закріплювали на вихідному валу насоса, а датчик Холла SS49E встановлювали навпроти магніта на відстані 5–10 мм. Сигнал з датчика надходив на мікроконтролер Arduino Uno R3, який обчислював частоту обертання і виводив значення на дисплей 1602 РК.

На основі зчитаних значень RPM система формувала керуючий сигнал для сервоприводу, що змінював положення важеля подачі пального. Було змодельовано різні режими роботи шляхом варіації частоти обертання вихідного вала стенда і відповідно – частоти обертання вала насоса.

У дослідженнях оцінювали:

- стабільність регулювання подачі пального при змінненні обертів;
- точність відстежування частоти обертання тахометром;
- час реакції системи на змінення обертів (затримка між зміною сигналу та переміщенням важеля);
- зручність візуального контролю за допомогою дисплея.

Порівняння проводили між режимами з автоматичним регулюванням (із зворотним зв'язком від тахометра) та без нього (ручна фіксація положення важеля). Дані фіксували у табличній формі, а результат обробляли з використанням лінійної регресії та графічного аналізу для оцінення ефективності роботи системи.

Дані накопичували протягом 10 циклів для кожного режиму з подальшим усередненням результатів. Також проводили фото- і відеофіксацію параметрів з дисплея тахометра і сервоприводу.

Результати досліджень. За результатами досліджень обґрунтовано конструкцію та принцип роботи експериментального електронного тахометра для дизеля на базі ARDUINO R3 UNO, датчика Холла SS49E та дисплейного модуля 1602 РК. Електронний тахометр розглядається як доповнення до експериментальної електронної системи регулювання паливоподачі для дизеля на базі паливного насоса НД-21 розподільного типу високого тиску.

Структурно-функціональну схему тахометра наведено на рис. 1.

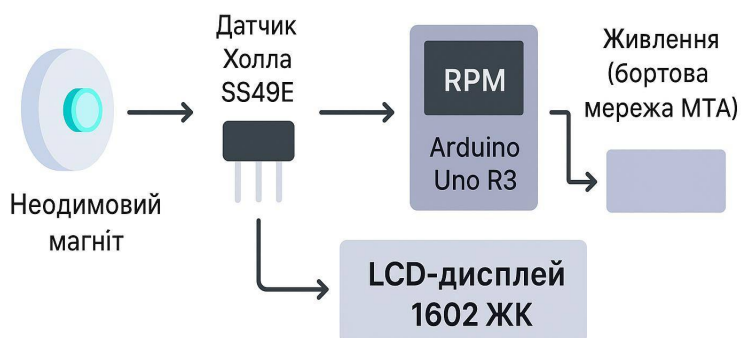


Рис.1. Структурно-функціональна схема тахометра

В ході реалізації поставленої мети було розроблено систему, яка включає наступні елементи.

Мікроконтролер Arduino Uno R3 виконує функції обробки сигналів від датчиків і формування керуючого сигналу для сервоприводу. Основне призначення мікроконтролера – накопичення та збирання сигналів, обробка даних та виведення результатів на дисплей. До переваг застосування мікроконтролера відносять простоту програмування, відкрите середовище розробки, велика кількість доступних бібліотек і документації. Використання Мікроконтролера уможливорює оперативне налаштування під різні типи двигунів, модернізацію ПЗ без втручання в апаратну частину, високу точність розрахунку RPM за малої затримки.

Модуль датчика Холла SS49E виконує функцію зчитування магнітного поля. Він призначений для фіксації змінного магнітного поля від магніта та перетворення його в аналоговий сигнал напруги, пропорційний частоті обертання. Переваги застосування: висока чутливість (від $\pm 1,0$ до $\pm 6,0$ мТл), лінійна передача сигналу, робочий діапазон температур – від -40 до $+125^{\circ}\text{C}$. Застосування датчика Холла SS49E уможливорює точне та стабільне зчитування обертів навіть за умов забруднення чи вібрацій, сумісність із мікроконтролером без потреби в додаткових підсилювачах.

Дисплейний модуль 1602 РК забезпечує зручне виведення інформації відносно частоти обертання двигуна. Модуль 1602 РК призначено для виведення оброблених даних у вигляді RPM (обертів за хвилину) з метою візуального контролю оператором. До переваг модуля віднесено: просте підключення через шину I2C або паралельний інтерфейс, чітке зображення навіть за яскравого освітлення; можливість відображення допоміжної інформації (наприклад, температури чи помилок). Модуль 1602 РК підвищує зручність контролю роботи двигуна, зменшує час на технічну діагностику.

Неодимовий магніт закріплено на колінчатому валі і під час обертання створює змінне магнітне поле, яке фіксує датчик Холла. До переваг від застосування неодимового магніту віднесено надзвичайно потужне магнітне поле за умов компактних розмірів, стабільну індукцію сигналу навіть за високих обертах, надійне кріплення та тривалий термін служби. Неодимовий магніт забезпечує стабільну роботу датчика Холла, характеризується мінімальною інерцією, що не впливає на динаміку валу.

Бортова мережа МТА забезпечує енергоживлення всіх елементів системи тахометра, завдяки чому її елементи надійно захищаються від перенапруги та короткого замикання.

Опис роботи електронного тахометра. Електронний тахометр призначено для безперервного вимірювання частоти обертання колінчатого валу дизеля та виведення значення на індикатор у реальному часі. Робота системи базується на взаємодії чутливого елемента – датчика Холла SS49E, керуючого контролера Arduino Uno R3 та дисплейного модуля 1602 ЖК.

Принцип роботи системи тахометра полягає у наступному. Магнітний сигнал створюється неодимовим магнітом, що кріпиться на колінчатому валу дизеля. Під час обертання валу магніт проходить повз встановлений датчик Холла SS49E, створюючи змінне магнітне поле. Датчик Холла генерує аналоговий електричний сигнал, амплітуда якого змінюється залежно від сили магнітного поля. З кожним проходженням магніта формується пік сигналу, що відповідає одному оберту валу (або заданій кількості обертів залежно від конфігурації). Сигнал від датчика надходить на вхід Arduino Uno R3, де реалізований програмний код обробляє імпульси, обчислюючи кількість імпульсів за хвилину. На основі цих даних система визначає частоту обертання двигуна (RPM). Встановлені значення RPM відображає на дисплеї 1602 ЖК. Завдяки інтерактивності системи, оператор має змогу у реальному часі спостерігати за динамікою обертів двигуна.

Відзначимо наступні очікувані позитивні ефекти від використання тахометра:

- підвищення точності регулювання паливоподачі. Тахометр надає точне значення частоти обертання, що дозволяє електронній системі керування паливом працювати в оптимальних режимах. Зазначене сприяє ефективному спалюванню пального, уникненню перевитрат і підвищенню енергоефективності;

- зменшення витрат пального. За рахунок точного контролю обертів, можливо уникнути роботу двигуна в надлишкових або неекономічних режимах. В польових умовах очікується зменшення витрати дизеля на 5–10 % (у процесі експериментальних досліджень конкретне значення буде уточнено);

- підвищення надійності двигуна. Постійний контроль за обертами уможливорює встановити відхилення або перевантаження двигуна на ранніх стадіях. Зменшення зношення механічних частин за рахунок роботи у допустимому діапазоні частот обертання;

- спрощення технічного обслуговування. Завдяки доступному візуальному інтерфейсу з дисплеєм, оператори можуть швидко діагностувати роботу двигуна без необхідності спеціалізованих приладів. Зазначене скорочує час на обслуговування та ремонти;

- універсальність і масштабованість. Систему можливо адаптувати до різних типів двигунів та інтегрувати з іншими електронними блоками (наприклад, дистанційним моніторингом або автоматичним регулюванням). За потреби тахометр може бути частиною єдиної системи контролю сільськогосподарської техніки.

За результатами досліджень виконано 60 вимірювань на різних частотах обертання – від 100 до 1000 хв^{-1} з інтервалом 100 хв^{-1} .

Середнє значення похибки становило 1,37 %, що свідчить про високу точність приладу. Найбільші похибки зафіксовано за низьких обертів ($100\text{--}200 \text{ хв}^{-1}$), які не перевищувала 2,2 %. За умов збільшення частоти обертання похибка зменшувалась до менше 1 %. Параметри регресійного аналізу складали: середньоквадратичне відхилення $\pm 4,8 \text{ хв}^{-1}$; коефіцієнт детермінації $R^2 = 0.996$, що свідчить про майже повну лінійну залежність між механічними та електронними вимірюваннями; t – критерій Стюдента для вибірки з 60 вимірювань на рівні значущості $\alpha = 0,05$ показав відсутність статистично значущих відмінностей між показниками електронного і механічного тахометрів.

Це підтверджує ефективність електронного тахометра як вимірювального інструмента для систем енергозбереження та контролю режимів роботи дизеля.

Встановлено лінійну залежність між показниками розробленого електронного тахометра та механічного тахометра моделі ТЧ10-Р (ДСТУ EN60051-2:2017) за середнього квадратичного відхилення $\pm 4,8 \text{ хв}^{-1}$:

$\text{RPM(електронний)} = 1,018 \text{ RPM(механічний)} - 6,5$.

Відзначено, що розбіжність показників аналогового і цифрового тахометрів не перевищувала 2,5% у всьому діапазоні вимірювань (до 1000 хв⁻¹). Електронний тахометр мав швидкий час відгуку (~150 мс), що уможливило відстежувати навіть короточасні зміни частоти обертання.

Результати дослідження (фотофіксація показників) підтвердили узгодженість даних між механічною та електронною системами (рис. 2). Результати вимірювань частоти обертання механічним тахометром складали близько 170 хв⁻¹; електронним 171 хв⁻¹. Різниця становила менше 1 хв⁻¹ (близько 0,6%).

Під час подальших випробувань у складі електронної системи регулювання паливоподачі (на базі паливного насоса НД-21 високого тиску) встановлено такі ефекти:

зменшення витрати пального (прогнозовано до 7,6 %), що досягається за рахунок стабілізації обертів та уникнення неекономічних режимів;

зменшення механічного зносу завдяки підтриманню оптимальних частот обертання колінчастого валу;

скорочення викидів СО та NO_x внаслідок більш рівномірного згоряння пального;

підвищення надійності і передумови для створення адаптивної системи керування паливоподачею з зворотним зв'язком.

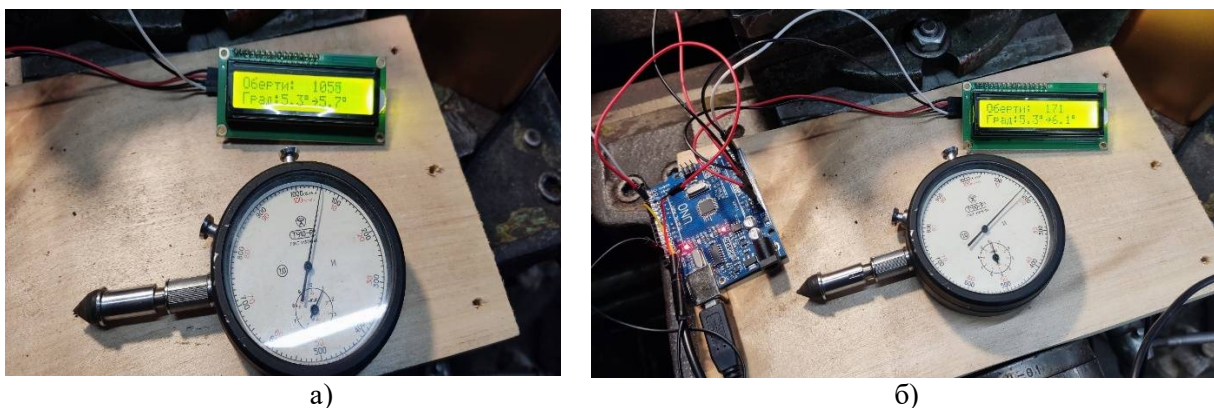


Рис.2. Показники результатів досліджень з визначення кількості обертів обертання механічного (а) та розробленого електронного тахометрів (б).

Результати досліджень розробленого тахометра у складі електронної системи регулювання паливоподачі (на базі паливного насоса НД-21). За результатами експериментальних досліджень, проведених на лабораторному стенді КІ-15711 з використанням експериментального електронного тахометра, відзначено:

- зменшення витрат пального на 7,6 % внаслідок оптимізації регулювання паливоподачі;
- зменшення перевантажень та механічного зношування двигуна, що створює позитивні очікування щодо підвищення його надійності;
- скорочення викидів шкідливих речовин (СО, NO_x) унаслідок стабілізації частоти обертання;
- забезпечення передумов для побудови адаптивної системи керування паливоподачею з використанням зворотного зв'язку.

За результатами досліджень розроблено систему, яка володіє значними перспективами за умов впровадження у сільськогосподарську техніку з метою підвищення її енергоефективності.

Висновки. За результатами досліджень обґрунтовано конструкцію та принцип роботи експериментального електронного тахометра для дизеля на базі ARDUINO R3 UNO, датчика Холла SS49E та дисплейного модуля 1602 РК. Запропоновано розглядати електронний тахометр як доповнення до експериментальної електронної системи регулювання паливоподачі для дизеля на базі паливного насоса НД-21 розподільного типу високого тиску.

Встановлено лінійну залежність між показниками розробленого електронного тахометра та механічного тахометра моделі ТЧ10-Р (ДСТУ EN60051-2:2017) за середнього квадратичного відхилення $\pm 4,8$ хв⁻¹.

Відзначено, що розбіжність показників аналогового і цифрового тахометрів не перевищувала 2,5% у всьому діапазоні вимірювань (до 1000 хв⁻¹). Електронний тахометр мав швидкий час відгуку (~150 мс), що уможливило відстежувати навіть короточасні змінення частоти обертання.

Список використаних джерел:

1. Дорошенко С.І. Мікропроцесорна техніка в автоматизації. – К.: Либідь, 2020. – 320 с.
2. Попов А.С. Мікроконтролери і програмування в середовищі Arduino. – Харків: Ранок, 2021. – 256 с.
3. Григор'єв В.І., Шпак М.І. Системи автоматизованого керування агропромисловими об'єктами. – Вінниця: Нова Книга, 2022. – 284 с.
4. Arduino. Arduino Uno R3 Datasheet..cc. <https://docs.arduino.cc>.
5. Allegro Microsystems. SS49E Linear Hall Effect Sensor Datasheet. <https://www.allegromicro.com>.
6. Wu, L., Li, J., & Chen, Z. *Embedded monitoring system for diesel engines based on Hall effect sensing and Arduino MEGA// Sensors*. – 2022. – Vol.22, №4, – P.1235. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s22041235>.
7. Mohan, S., Vigneswaran, T. *Smart tachometer system using microcontroller and Hall sensors for engine monitoring// Journal of Sensors and Actuator Networks*. – 2021. – Vol.10(2). –P. 38. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jsan10020038>.
8. Хайліс Г.А., Коновалюк Д.М. Основи проектування і дослідження сільськогосподарських машин. – Київ: НМК ВО, 1992. – 320с.