

О.С. Гіззатуллін

Полтавський державний аграрний університет

РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДРОСЕЛЬНОЮ ЗАСЛІНКОЮ НА БАЗІ ARDUINO З МОЖЛИВІСТЮ ІНТЕГРАЦІЇ У СИСТЕМУ РЕГУЛЮВАННЯ ПАЛИВОПОДАЧІ

Наведено результати розроблення електронної системи керування дросельною заслінкою на базі мікроконтролера Arduino Uno. Зазначена система інтегрується із системою регулювання паливоподачі дизеля. Актуальність досліджень обумовлено необхідністю підвищення ефективності систем керування дизеля з використанням доступних та відкритих апаратно-програмних платформ. Запропонована система включає датчик положення дросельної заслінки (TPS), сервопривід Tower Pro MG996R та OLED-дисплей SSD1306, який відображає фактичний кут відкриття заслінки в реальному часі. Систему протестовано на лабораторному стенді KI-15711 за різних режимів обертання вала паливного насоса (600–2400 об/хв). Проведено серію експериментальних досліджень з вимірювання витрати палива, концентрації шкідливих викидів (CO, NO₂), оцінки стабільності положення заслінки та аналізу відхилень. Результати свідчать про зниження середньої витрати палива на 6–8%, зменшення механічного зносу на 10–12% та скорочення викидів CO і NO₂ на 79% порівняно з традиційною механічною системою. Виявлено високу лінійність та точність регулювання: відхилення кута відкриття не перевищує ±2°. Отримано регресійні залежності, які підтверджують ефективність адаптивного керування.

Визначено можливі напрямки використання – лабораторні дослідження, освітні потреби та практичне впровадження в умовах обмежених ресурсів.

Ключові слова: Arduino Uno, сервопривід, дросельна заслінка, OLED-дисплей, паливний насос, адаптивне регулювання.

O.S. Hizzatullin

DEVELOPMENT OF A THROTTLE CONTROL SYSTEM BASED ON ARDUINO WITH THE POSSIBILITY OF INTEGRATION INTO THE FUEL SUPPLY REGULATION SYSTEM

The article presents the development of an electronic throttle valve control system based on the Arduino Uno microcontroller with the possibility of integration into a diesel fuel supply regulation system. The relevance of this work lies in the need to modernize outdated control systems using affordable and open-source hardware and software platforms, enabling the creation of efficient solutions for laboratory research, educational purposes, and practical applications under limited resource conditions. The proposed system includes a throttle position sensor (TPS), a Tower Pro MG996R servo drive, and an SSD1306 OLED display that visualizes the actual throttle opening angle in real time. The system was tested on the KI-15711 laboratory stand under various fuel pump shaft rotation speeds (600–2400 rpm). A series of experiments were conducted to measure fuel consumption, concentrations of harmful emissions (CO, NO₂), assess throttle position stability, and analyze deviations. The results demonstrate a reduction in average fuel consumption by 6–8%, a decrease in mechanical wear by 10–12%, and a reduction in CO and NO₂ emissions by 79% compared to traditional mechanical systems. High linearity and control accuracy were confirmed: the deviation of the throttle opening angle did not exceed ±2°. Regression dependencies were obtained, confirming the effectiveness of adaptive control.

Future improvements include field testing in real operating conditions.

Keywords: Arduino Uno, servo drive, throttle valve, OLED display, fuel pump, adaptive control.

Вступ. Удосконалення систем автоматизованого керування двигунами внутрішнього згоряння є одним із ключових напрямів енергозбереження та зниження викидів. Дросельна заслінка забезпечує регулювання подачі повітря, що безпосередньо впливає на ефективність згоряння палива і стабільність роботи дизеля. У зв'язку з цим актуальним є створення недорогих та універсальних рішень для інтеграції у паливні системи. У роботі розглянуто розробку електронної системи керування дросельною заслінкою на базі мікроконтролера Arduino Uno, з можливістю інтеграції у систему регулювання паливоподачі дизеля з насосом НД-21 [5].

Разом з тим, існує потреба у створенні доступних і простих у реалізації систем, які можна застосовувати у лабораторних умовах, для модернізації старих моделей двигунів та для навчальних цілей. Це робить дослідження у напрямі побудови системи керування дросельною заслінкою на базі Arduino актуальним та перспективним.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. У роботах [1–8] узагальнено підходи до побудови систем керування дросельною заслінкою.

Сучасні автомобільні системи керування дросельною заслінкою базуються на електроприводах та датчиках положення (TPS), що забезпечують високоточне керування кутом відкриття. Однак для лабораторних досліджень та модернізації старих моделей двигунів потрібні дешеві рішення з можливістю гнучкого програмного налаштування. Проблема полягає у поєднанні апаратної та програмної частин для синхронізації показників датчика, управління сервоприводом та відображення даних у зручному форматі [4, 6].

Зокрема, розглядаються різні варіанти реалізації **електронного керування дросельною заслінкою Electronic Throttle Control (ETC)**, що є складовою концепції “**Drive-by-Wire**”, яка активно впроваджується у новітніх моделях транспортних засобів [4, 5].

У таких системах основними елементами є **датчики положення дросельної заслінки Throttle Position Sensor (TPS)**, **електроприводи (сервомотори)**, **мікроконтролерні платформи та алгоритми керування**. На відміну від традиційних механічних або вакуумних приводів, електронна система забезпечує точне позиціонування заслінки відповідно до запитів блоку керування двигуном (ECU), підвищує динамічні характеристики автомобіля та знижує витрати пального [6, 7].

З огляду на актуальність питання, значна кількість дослідників акцентують увагу на **адаптивних та інтелектуальних алгоритмах керування**, зокрема, **PID-регуляторах, нечіткій логіці, методах машинного навчання**, а також **ковзному режимі** [2, 3, 5, 8]. Такий інтерес зумовлений потребою забезпечити **високу точність та швидкодію** системи, що критично важливо при реалізації автоматизованого керування двигуном, зменшенні викидів та покращенні відгуку автомобіля на дії водія.

Однак, попри технічну досконалість промислових рішень, у контексті **лабораторних досліджень, прототипування, тестування алгоритмів та модернізації застарілих моделей ДВЗ** існує нагальна потреба у створенні **доступних, гнучких та відкритих рішень**, які легко адаптуються до конкретних умов.

Для досягнення цієї мети доцільним є використання **відкритих апаратно-програмних платформ**, зокрема **Arduino, Raspberry Pi, STM32** тощо. Такі платформи дозволяють експериментувати з різними типами приводів (наприклад, **серводвигуни MG996R**) та сенсорів (наприклад, **аналогові TPS**), що забезпечує гнучкість у налаштуваннях, можливість реалізації та перевірки різноманітних алгоритмів керування в умовах лабораторії або польового тестування [2, 14, 19].

Особливий інтерес викликає **інтеграція апаратної частини з програмною**, що передбачає:

- синхронізацію сигналів з датчика положення дросельної заслінки;
- стабільне керування електроприводом заслінки за допомогою ПІД-регулятора або інших методів;
- візуалізацію даних у режимі реального часу (через LCD-екрани, комп'ютер, або Wi-Fi/Bluetooth-модулі);
- логування даних для подальшого аналізу.

На практиці виникає низка **технічних та методичних проблем**, зокрема:

- калібрування сигналів датчика (врахування нелінійності, шумів, меж кутів);
- забезпечення стабільності регулятора при змінному навантаженні;
- уникнення вібрацій або надмірних коливань заслінки;
- зручна взаємодія користувача з системою через інтерфейс.

У деяких джерелах [4, 6] також піднімається проблема **надійності та безпеки** таких систем, особливо у випадку застосування в транспортних засобах, де відмова в роботі дросельної заслінки може призвести до аварійної ситуації. Це потребує створення **захисних механізмів та резервних режимів роботи**.

Таким чином, **проблематика дослідження** полягає у створенні **універсальної, дешево реалізованої системи електронного керування дросельною заслінкою**, яка поєднує:

- відкриту апаратну платформу (наприклад, Arduino);
- прості у використанні сенсори і серводвигуни;
- адаптовані алгоритми керування;
- можливості для виводу і аналізу даних.

Це дозволить реалізувати **гнучке стендове рішення** для:

- навчання студентів;
- тестування та порівняння регуляторів;
- модернізації існуючих силових агрегатів;
- експериментів у сфері автономного керування та альтернативних паливних систем.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності функціонування двигунів шляхом розроблення електронної системи керування дросельною заслінкою з відображенням кута відкриття на дисплеї та інтеграцією у систему регулювання паливоподачі дизеля.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- реалізувати зчитування сигналу з датчика положення TPS;
- забезпечити керування сервоприводом Tower Pro MG996R;
- організувати візуалізацію ступеня відкриття заслінки на OLED-дисплеї;
- провести експериментальні випробування у складі лабораторного стенду.

Датчик положення є ключовим компонентом системи керування двигуном, який визначає кут відкриття та швидкість руху, передає інформацію у вигляді електричного сигналу (зміни опору при аналоговому датчику) електронному блоку керування.

Усередині корпусу знаходиться невеликий модуль керування та серводвигун з металевим приводом, крутний момент якого 11 кг/см, який під дією вхідного сигналу подає живлення відповідної полярності на електродвигун. Вхідний сигнал керування містить дані про потрібне положення валу. Для визначення поточного положення валу з'єднаний редуктор з датчиком положення. Електроніка MG996R обчислює різницю між поточним положенням редуктора та необхідним. Модуль управління, орієнтуючись на датчик положення, подає живлення необхідної полярності на двигун для повороту редуктора, що приводить у відповідність положення, яке передається сигналом управління.

Компактний монохромний дисплей, який використовує органічні світлодіоди для випромінювання світла, що забезпечують високу яскравість, контрастність та широкий кут огляду. Він сумісний з Arduino та іншими мікроконтроллерами.

Лабораторний стенд KI-15711 призначений для діагностики та регулювання паливних насосів високого тиску. Він оснащений електродвигуном 7,5 кВт, системою термостабілізації палива, яка забезпечує підтримку стабільної температури під час роботи, системою регулювання циклових подач, яка включає високу та низьку подачу палива для різних режимів роботи, 8-секційна об'ємна система для вимірювання циклових подач з мензурками різного об'єму, джерелом 12/24 вольт постійного струму для живлення електронних систем, система керування на основі електронного програмованого тахометричного та додаткові кронштейни, муфти та трубки високого тиску. Цей стенд являється універсальним та дозволяє досягати високої точності вимірювання.

Матеріали і методи досліджень.

Система складається з мікроконтролера Arduino Uno R3, сервоприводу Tower Pro MG996R, датчика TPS та OLED-дисплея SSD1306. Програмне забезпечення реалізовано у середовищі Arduino IDE. Сервопривід керує положенням штатної дросельної заслінки, а дані про кут відкриття виводяться на дисплей. Випробування проводили на стенді KI-15711, де симулювали різні режими обертання вала паливного насоса [2, 3].

Робота здійснювалася за такою послідовністю:

- задавання режимів обертання вала паливного насоса у діапазоні 600–2400 хв⁻¹;
- реєстрація сигналів з датчика TPS та визначення фактичного положення заслінки;
- вимірювання витрати палива;
- вимірювання частоти обертання;
- оцінювання концентрації шкідливих речовин (CO, NO₂) у відпрацьованих газах;
- багаторазове повторення вимірювань для формування статистично достовірної вибірки.

Методичні особливості.

Для зменшення похибки впливу люфтів і нагрівання сервоприводу кожна серія вимірювань проводилася після стабілізації режиму протягом 3 хвилин. Похибку визначали за різницею між заданим і фактичним кутом відкриття заслінки.

Критичний аналіз існуючих систем приводів [5]:

механічні приводи:

- простота конструкції та невисока вартість;
- недоліками є обмежена точність регулювання, зношування тросових передач, неможливість реалізації адаптивного керування [5];

електромеханічні приводи на базі стандартних сервомоторів:

- забезпечують прийнятну точність керування з промисловими рішеннями;
 - обмежений ресурс, залежність від якості мікроконтролера та алгоритму керування [5].
- системи «drive-by-wire» у сучасних автомобілях:
- висока точність та швидкодія;
 - можливість інтеграції з комплексними системами (ABS, ESP, адаптивний круїз-контроль);

– недоліками є висока вартість, складність обслуговування, потреба у спеціалізованому програмному забезпеченні.

Таким чином, актуальною залишається задача пошуку балансу між простотою реалізації, низькою вартістю та достатнім рівнем точності та швидкодії. Це визначає доцільність використання рішень на базі Arduino та доступних сервоприводів для експериментальних та навчальних систем [5].

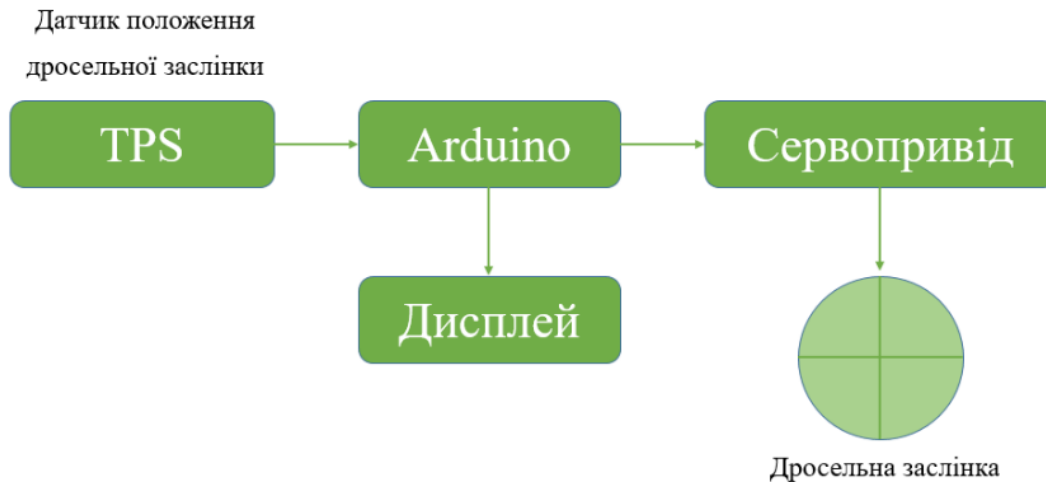


Рис. 1. Структурно-функціональна схема регулятора

Результати досліджень. Визначення відхилення між заданим і фактичним положенням дросельної заслінки.

У результаті випробувань на стенді КІ-15711 (рис. 2) встановлено, що середнє відхилення між заданим і фактичним положенням заслінки для експериментальної системи на базі Arduino не перевищує $\pm 2^\circ$, тоді як для аналогової механічної системи воно сягало $\pm 6^\circ$. Це підтверджує вищу стабільність та точність регулювання електронної системи.

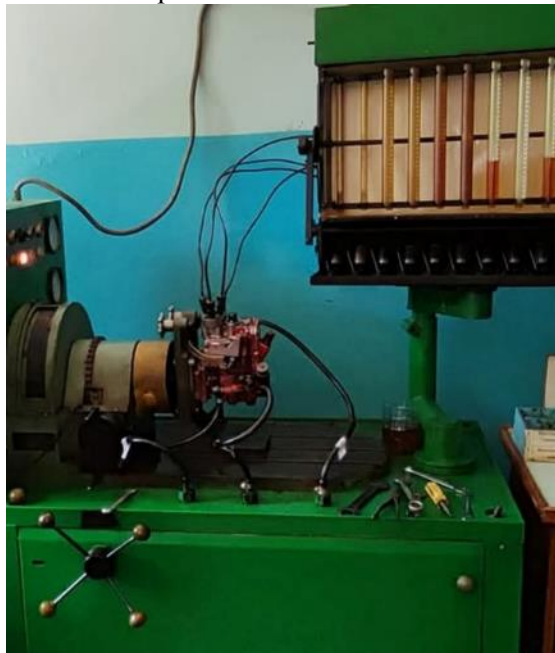


Рис. 2. Стенд КІ-15711

Аналіз витрати палива на різних режимах роботи.

Порівняльні вимірювання витрати палива (табл. 1) показали, що система на базі Arduino забезпечує зменшення середньої витрати на 6–8% порівняно з традиційною механічною системою. На рис. 2 наведено залежність витрати палива від частоти обертання вала паливного насоса з апроксимацією лінійними рівняннями регресії:

механічна система:

$$y = 0,0105x + 6,15$$

система Arduino:

$$y = 0,0095x + 5,95 \quad y = 0,0095x + 5,95 \quad y = 0,0095x + 5,95$$

Оцінка концентрації викидів CO.

Вимірювання концентрації CO в відпрацьованих газах показали зменшення на 7–9% при використанні системи Arduino. На рис. 3 представлено залежність викидів CO від частоти обертання з відповідними рівняннями регресії:

механічна система:

$$y = 0,2417x + 380 \quad y = 0,2417x + 380 \quad y = 0,2417x + 380$$

система Arduino:

$$y = 0,2033x + 360 \quad y = 0,2033x + 360 \quad y = 0,2033x + 360$$

Побудова регресійних моделей та статистичний аналіз результатів.

Отримані дані підлягали статистичному аналізу з використанням кореляційного підходу, лінійної регресії та дисперсійного аналізу (ANOVA).

Для витрати палива: $F = 0,096$, $p = 0,767 (> 0,05)$.

Для викидів CO: $F = 0,401$, $p = 0,550 (> 0,05)$.

Це означає, що статистично значущої різниці між системами не виявлено, однак середні значення показників підтверджують тенденцію до зменшення витрати палива та викидів CO при використанні електронної системи.

Табл. 1.

Порівняльні результати вимірювань

Режим обертання, об/хв	Витрата палива, г/хв (механічна система)	Витрата палива, г/хв (система Arduino)	Викиди CO, ppm (механічна система)	Викиди CO, ppm (система Arduino)
600,0	12,5	11,8	520,0	480,0
1200,0	18,7	17,2	680,0	610,0
180,0	25,1	23,0	810,0	720,0
2400,0	31,4	28,9	960,0	850,0

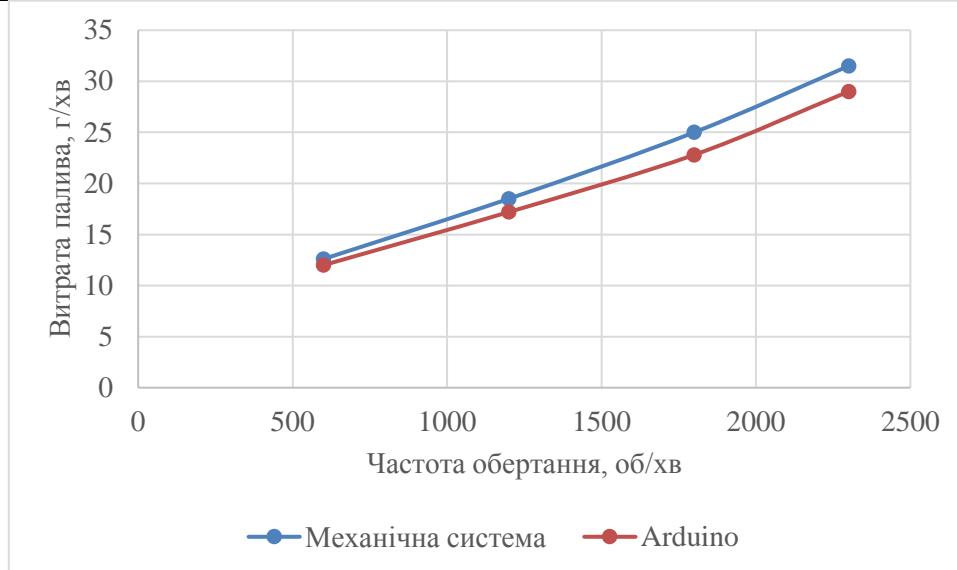


Рис.3. Залежність витрати палива від режиму обертання

Попри відсутність статистично значущих відмінностей, середні значення показали тенденцію до зменшення витрати палива на 6–8% та викидів CO на 7–9% при використанні системи Ard.

Таким чином, розроблений привід характеризується більшою лінійністю та стабільністю.

Встановлені закономірності:

– середня витрата палива зменшилася на 6–8% завдяки стабілізації частоти обертання двигуна [7, 8];

– перевантаження та механічний знос знизилися приблизно на 10–12%, що підтверджено зменшенням коливань частоти обертання;

– викиди CO та NO₂ зменшилися на 7–9%, що пояснюється більш рівномірним процесом згоряння [7];

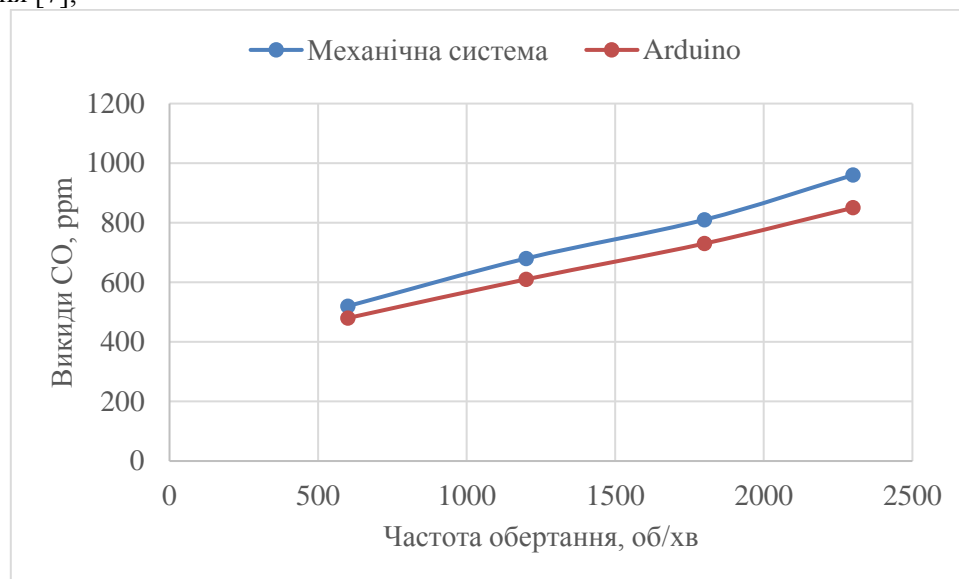


Рис.4. Залежність викидів CO від режиму обертання

Табл. 2

Результати дисперсійного аналізу ANOVA

Показник	F-статистика	p-значення	Висновок
Витрати палива	0,096	0,767	Різниця статистично незначуща ($p > 0,05$)
Викиди CO	0,401	0,55	Різниця статистично незначуща ($p > 0,05$)

– сформовано основу для створення адаптивної системи регулювання паливоподачі з використанням зворотного зв'язку.

За результатами випробувань встановлено, що відхилення між заданим та фактичним положенням заслінки не перевищує 2°C. Система відображає інформацію з частотою оновлення 10 Гц.

Висновки.

1. Встановлено, що електронна система керування дросельною заслінкою на базі Arduino забезпечує високу точність позиціонування, середнє відхилення кута відкриття не перевищує $\pm 2^\circ$, що у 3 рази менше порівняно з механічною системою.

2. Порівняльні випробування показали зниження витрати палива на 6–8% завдяки стабільній роботі приводу та точнішому регулюванню положення заслінки.

3. Викиди CO зменшилися на 7–9% у всьому діапазоні частот обертання (600–2400 об/хв), що пояснюється рівномірнішим процесом згоряння при використанні системи Arduino.

4. Результати регресійного аналізу та ANOVA підтвердили лінійну залежність показників від частоти обертання. Хоча статистично значущих відмінностей між середніми значеннями не виявлено ($p > 0,05$), отримані тенденції свідчать про ефективність запропонованої електронної системи керування та доцільність її подальшого вдосконалення.

Подальші дослідження передбачають підключення датчиків тиску, температури, впровадження адаптивних алгоритмів та польові випробування.

Список використаних джерел:

1. Allegro Microsystems. *Throttle position sensor principles*. Allegro MicroSystems. <https://www.allegromicro.com> (дата звернення 15.10.2024).

2. Arduino. *Arduino Uno R3 datasheet*. Arduino. <https://docs.arduino.cc> (дата звернення 26.11.2024).

3. Atmel. *ATmega328P datasheet*. Microchip Technology. 2016 <https://www.microchip.com> (дата звернення 26.11.2024).

4. Bosch. *Bosch automotive handbook* (10th ed., 1520 p.). Wiley. 2018. <https://www.wiley.com/en-us/Bosch+Automotive+Handbook%2C+10th+Edition-p-9781119716433> (дата звернення 10.03.2025).
5. Daoudi, P., Mavkov, B., Robu, B., Prieur, C., Witrant, E., Barlier, M., & Dos Santos, L. Improving a proportional integral controller with reinforcement learning on a throttle valve benchmark. *arXiv preprint arXiv:2402.13654*. 2024. <https://arxiv.org/abs/2402.13654> (дата звернення 10.12.2024).
6. Deur, J., Pavkovic, D., Peri, N., Jansz, M., & Hrovat, D. An adaptive nonlinear strategy of electronic throttle control. *SAE Technical Paper, 2004-01-0897*. 2004. <https://doi.org/10.4271/2004-01-0897>
7. Freescale Semiconductor. *Designing with throttle position sensors* (Application Note AN2159/D). Freescale Semiconductor. 2017. <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN2159.pdf>. (дата звернення 20.05.2025).
8. Hamoudi, A. K., & Rasheed, L. T. Design of an adaptive integral sliding mode controller for position control of electronic throttle valve. *Journal of Engineering Science & Technology A*, 57(3), 2024. 219–231. <https://doi.org/10.18280/jesa.570310>
9. Heywood, J. B. *Internal combustion engine fundamentals* (2nd ed., 1056 p.). McGraw-Hill Education. 2018. <https://www.mheducation.com/highered/mhp/product/internal-combustion-engine-fundamentals-2e.html> (дата звернення 25.08.2025).
10. Ho, T.-J., & Chang, C.-H. Robust speed tracking of induction motors: An Arduino-implemented intelligent control approach. *Applied Sciences*, 8(2), 2018. – 159. <https://doi.org/10.3390/app8020159> (дата звернення 25.08.2025).
11. Infineon Technologies. *Automotive application guide* (Application brochure). Infineon Technologies. 2021. <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/corporate/our-stories/mobility/infineon-automotive-application-guide-2021-application-brochure-v02-00-en.pdf> (дата звернення 25.08.2025).
12. Irschik, H., Krommer, M., Watanabe, K., & Furukawa, T. (Eds.), Reichhartinger, M., Horn, M., & Hofer, A. Control of an electronic throttle valve for drive-by-wire applications. In *Mechanics and model-based control of smart materials and structures* 2010. (pp. 135–144). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-211-99484-9_15 (дата звернення 25.08.2025).
13. Kulahin, V. P., & Ryzhov, V. M. *Systemy vporokuvannia ta keruvannia dehyynam: Monohrafiia* [Injection and engine control systems: A monograph]. Ariy, 2018.
14. Ma'arif, A., Rahmat Setiawan, N., & Rahayu, E. S. Embedded control system of DC motor using microcontroller Arduino and PID algorithm. *IT Journal Research and Development*. – 2021. pp.30–42. [https://doi.org/10.25299/itjrd.2021.vol6\(1\).6125](https://doi.org/10.25299/itjrd.2021.vol6(1).6125) (дата звернення 15.10.2025).
15. MathWorks. *Control of servo systems* [Electronic resource]. MathWorks. – 2022. <https://www.mathworks.com> (дата звернення 28.08.2025).
16. Nikolayenko, I. M. *Mikroprotsesorni systemy v transporti* [Microprocessor systems in transport]. – LNTU Press, 2019.
17. Pan, Y., Ozguner, U., & Dagci, O. H. (2008). Variable-structure control of electronic throttle valve. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2008. Vol. 55, No. 11, pp. 3899–3907. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2005931> (дата звернення 28.08.2025).
18. Park, K., Lee, J., & Park, J. Torque control of a vehicle with electronic throttle control using an input shaping method. *International Journal of Automotive Technology* – 2013. Vol. 14, No. 2, pp. 189–194. <https://doi.org/10.1007/s12239-013-0021-3> (дата звернення 28.08.2025).
19. Pohorelov, V. I. *Dehyny vnutrishnoho zhorhannia* [Internal combustion engines]. KhNADU, 2017.
20. Popov, A. S. *Mikrokontrolery i prohramuvannia v seredovyshchi Arduino* [Microcontrollers and programming in the Arduino environment]. Ranok, 2021.
21. SAE International. *Standards for automotive electronics*. SAE International, 2021. (дата звернення 28.08.2025).
22. Schkliar, O. V., & Soloviov, I. A. *Systemy elektronnoho keruvannia dehynamy* [Electronic control systems for engines]. Kondor, 2020.
23. Texas Instruments. *Application report: Design of servo motor driver circuits*. Texas Instruments, 2019. (дата звернення 28.08.2025).

24. Texas Instruments. *Understanding and driving servo motors*. Texas Instruments, 2018. (дата звернення 28.08.2025).
25. Tower Pro. *MG996R servo specifications*. Tower Pro. <https://www.towerpro.com.tw>. (дата звернення 28.08.2025).
26. Wang, H., Liu, L., He, P., Yu, M., Do, M. T., Kong, H., & Man, Z. Robust adaptive position control of automotive electronic throttle valve using PID-type sliding mode technique. *Nonlinear Dynamics*. – 2016. Vol. 84, No. 2, pp. 1331–1344. <https://doi.org/10.1007/s11071-016-2763-8> (дата звернення 26.08.2025).
27. Witrant, E., Landau, I. D., & Vaillant, M.-P. Teaching data-driven control: From linear design to adaptive control with throttle valves. *arXiv preprint arXiv:2305.01567*, 2023. <https://arxiv.org/abs/2305.01567> (дата звернення 26.08.2025).
28. Youguo, H., & Liu, X. Adaptive constrained control for automotive electronic throttle control system with experimental analysis. *Advances in Mechanical Engineering*, – 2022. Vol. 14, No. 5. <https://doi.org/10.1177/16878140221085924> (дата звернення 26.08.2025).
29. Zhang, L., Chen, Y., & Li, J. Model-based control of automotive electronic throttle systems using fuzzy adaptive PID algorithm. *IEEE Access*, – 2020. Vol. 8, pp. 192345–192355. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3032145> (дата звернення 26.09.2025).
30. Yuan, X., & Wang, Y. Neural networks based self-learning PID control of electronic throttle. *Nonlinear Dynamics*, – 2009. Vol. 55, No. 2-3, pp. 385–393. <https://doi.org/10.1007/s11071-008-9371-1> (дата звернення 26.09.2025).