

УДК 621.436.5

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2025.55.179-184>

О.С. Гізатуллін, асп., О.В. Шаповал, асп.

*Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна**e-mail: oleksii.hizzatullin@pdau.edu.ua, oleksandr.shapoval@pdau.edu.ua*

Визначення закономірностей змінення температури паливоподачі двигуна Д-21 на базі Arduino Uno R3

У роботі наведено результати розроблення та експериментального дослідження мікроконтролерної системи вимірювання температури дизельного палива на базі Arduino Uno R3. Систему побудовано з використанням цифрового датчика DS18B20, що забезпечує точність вимірювання $\pm 0,2$ °C у діапазоні від -20 до $+80$ °C.

Встановлено:

– підвищення частоти обертання насоса призводить до відповідного пропорційного підвищення температурного перепаду ΔT в межах $0,4$ – $1,1$ °C;

– за умов роботи системи ($t > 600$ с) температура палива на вході та виході стабілізувалася, що свідчило про теплову рівновагу паливопроводу;

– у початковий період запуску ($t < 120$ с) відзначено інерційну складову фази нагріву, за якою температура підвищувалася повільніше внаслідок теплової інерції магістралі;

– зменшення частоти обертання призводило до відповідного зменшення $\Delta T(t)$, що є наслідком прямої залежності перепаду від інтенсивності циркуляції палива.

Проведено інтеграцію температурного сенсора у систему паливоподачі дизеля з паливним насосом НД-21, встановленим на стенді КІ-15711. Розроблений мікроконтролерний пристрій використаний для контролю температури палива на вході та виході насоса, що уможливило оцінити вплив теплових умов на подачу палива та стабільність роботи системи.

Перспективним виглядає використання отриманих результатів за умов розроблення автоматизованих систем електропідігріву дизельного палива.

Практичне значення полягає у підвищенні точності вимірювання та зменшенні вартості лабораторних вимірювальних систем для машинобудівних експериментів.

Arduino Uno R3, DS18B20, датчик температури, дизельне паливо, паливний насос НД-21, система паливоподачі, вимірювальний модуль

Постановка проблеми. Проблема забезпечення стабільної паливоподачі дизеля в умовах змінних температур зумовлює необхідність точного контролю теплових параметрів робочого середовища. Температура дизельного палива істотно впливає на його в'язкість, рівномірність подачі і точність дозування, що є критичним для коректної роботи паливного насоса НД-21. У наявних дослідженнях недостатньо уваги приділено інтеграції цифрових температурних датчиків у реальні паливні тракти дослідних стендів.

Сучасні промислові термометри або термопари мають високу вартість та обмежену гнучкість у підключенні до мікроконтролерних систем. У зв'язку з цим перспективним є використання відкритих апаратних платформ типу Arduino Uno R3, які дозволяють створювати вимірювальні комплекси на основі цифрових сенсорів із простим калібруванням та передачею даних у комп'ютерну систему.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У відомих роботах наведено результати досліджень систем вимірювання температури робочих рідин на базі аналогових датчиків LM35 [1–3], термісторів [4–6] та термопар [7]. До недоліків наведених систем віднесено складність калібрування, залежність від довжини дротів та аналогових шумів. Цифрові сенсори, зокрема DS18B20 (Dallas Semiconductor),

забезпечують точні вимірювання без додаткової лінійної корекції та легко інтегруються через однопровідний інтерфейс (1-Wire) [8].

Проте у науково-технічних публікаціях майже відсутні роботи, у яких наведено досвід застосування мікроконтролерних систем для моніторингу температури палива безпосередньо у системах паливоподачі дизельних насосів, зокрема типу НД-21. Зазначені насоси традиційно застосовують у дослідних дизельних стендах [8].

Актуальність досліджень полягає у розробленні компактною та надійною системи вимірювання температури палива, інтегрованою у діючий стенд. Зазначена система уможливіть підвищити ефективність управління режимами підігріву палива.

Постановка завдання. Мета досліджень полягає у підвищенні ефективності контролю температури дизельного палива в системі паливоподачі насоса НД-21 шляхом розроблення, інтеграції та експериментального дослідження мікроконтролерної підсистеми вимірювання на базі Arduino Uno R3.

Задачі досліджень:

– розробити конструкцію мікроконтролерної системи вимірювання температури палива, з використанням цифрових сенсорів DS18B20 та з урахуванням умов інтеграції у магістралі паливоподачі до і після насоса НД-21;

– встановити закономірності змінення температури дизельного палива за різних частот обертання насоса.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводили на лабораторному стенді КІ-15711, обладнаному дизельним паливним насосом НД-21, баком, фільтром, прозорими магістралями подачі та зливу палива.

Температуру вимірювали цифровими вологозахищеними датчиками DS18B20, підключеними до мікроконтролера Arduino Uno R3. Дані виводили на LCD-дисплей 1602 і паралельно реєстрували через послідовний порт на ПК.

Вимірювання здійснювали у трьох контрольних точках:

– температура палива у баку (T_1),

– температура перед входом у насос (T_2),

– температура після виходу з насоса (T_3).

Крок дискретизації становив 1 с, середнє значення обчислювали із 10 послідовних вимірів.

Особливості конструкції розробленого термодатчика у складі системи регулювання температури паливоподачі дизеля Д-21 та стенда КІ-15711. Розроблений термодатчик є складовою частиною мікроконтролерної системи контролю температури палива, призначеної для використання у паливній системі дизеля Д-21, змонтованого на випробувальному стенді КІ-15711. Його створено на базі цифрового сенсора DS18B20, що має точність вимірювання близько $\pm 0,2$ °С і працює у діапазоні температур від -20 до $+80$ °С.

Термодатчик розміщено у латунній захисній гільзі, яку вмонтовано безпосередньо в паливопровід перед паливним насосом НД-21 та після нього. Таке розташування забезпечує вимірювання температури палива до входу в насос і після його роботи, що дає можливість фіксувати перепад температури

$$\Delta T = T_3 - T_2 . \quad (1)$$

Гільза виконує роль захисту та запобігає впливу палива на електронну частину датчика.

Зібрані з датчиків показники передаються до мікроконтролера Arduino Uno R3, який виконує ініціалізацію обміну по шині 1-Wire, обробку сигналів, усереднення результатів і подальше відображення інформації на LCD-дисплей 1602. Одночасно дані

передаються через послідовний порт на комп'ютер для побудови графіків або аналізу у середовищі Excel.

Завдяки отриманим даним визначається рівень нагрівання палива в процесі роботи насоса, що використовується для оцінювання стабільності паливоподачі та розроблення режимів автоматичного підігріву.

Електронна складова системи. До складу вимірювального вузла входять:

- мікроконтролер Arduino Uno R3 (ATmega328P);
- цифровий сенсор DS18B20;
- дисплей LCD-1602 для відображення поточних температур;
- джерело живлення на 12 В.

Опис роботи електронного термометра. Схема електронного термометра (рис. 1) включає:

- Arduino Uno R3 – мікроконтролерний модуль керування;
- DS18B20 – цифровий датчик температури;
- LCD-1602 – дисплей для відображення поточних значень;
- живлення 12 В від лабораторного блока.



Рисунок 1 – Спрощена електрична схема вимірювального вузла
Джерело: розроблено авторами

Програмне забезпечення розроблено у середовищі Arduino IDE, використано бібліотеки OneWire.h та DallasTemperature.h. Система дозволяє одночасно підключати безліч сенсорів, що відкриває можливість для просторового контролю температури по різних ділянках паливопроводу.

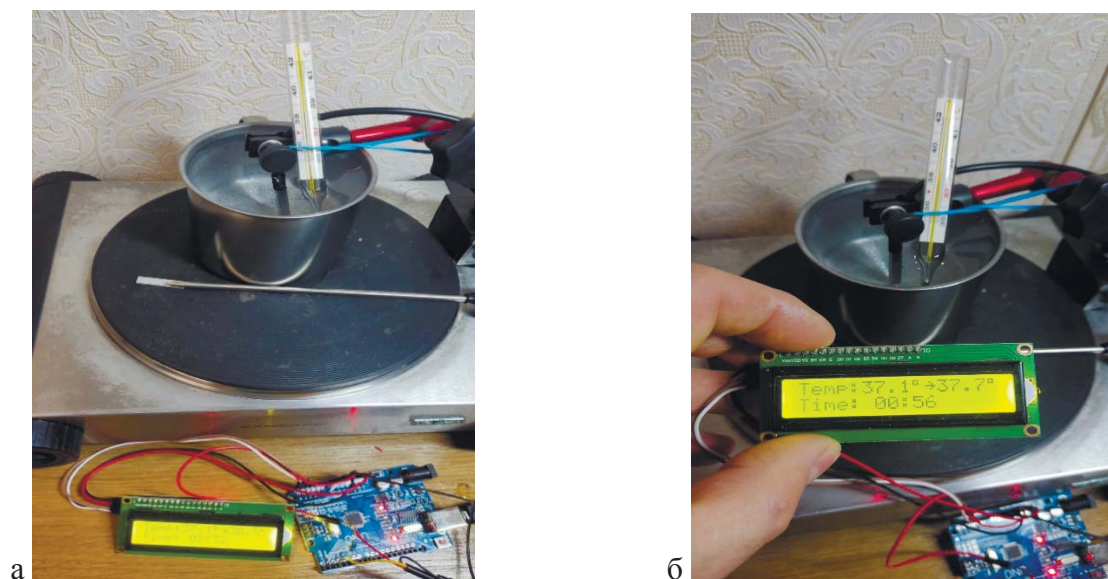
Технічні характеристики та результати досліджень. Похибка вимірювань не перевищувала $\pm 0,2$ °C у робочому діапазоні 20–60 °C. За багатогодинних досліджень системи відзначено її стійку роботу без збоїв, а різниця показників між двома паралельними датчиками не перевищувала 0,2 °C.

Використання платформи Arduino уможливило зменшити собівартість вимірювального комплексу більш ніж утричі порівняно з промисловими аналогами, зберігаючи за таких умов необхідну точність. Конструкція забезпечила просте підключення, можливість встановлення кількох сенсорів уздовж паливопроводу та надійність роботи в умовах експериментального стенда.

Система стабільно функціонувала протягом 6 годин роботи. Відхилення показів між двома послідовними датчиками не перевищувало 0,2 °C.

Середній перепад температури (ΔT) за умов роботи насоса без підігріву становив 0,4–1,1 °C, що відповідало вимогам до механічних паливних насосів високого тиску.

Калібрування виконано за допомогою ртутного термометра, діапазон 0–100 °C (рис.2), отримано коефіцієнт корекції 0,985.



а – результат калібрування у нижньому діапазоні; б – результат калібрування у робочому діапазоні

Рисунок 2 – Показники калібрування електронного термометра

Джерело: розроблено авторами

Результати досліджень наведено у табл.1. Крок дискретизації становив 1 с, а середні значення обчислювали за кожні 10 послідовних вимірів.

Таблиця 1 – Результати досліджень з визначення температури палива цифровими вологозахисними датчиками DS18B20

Режим роботи насоса	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$
Холостий хід	21,4	21,5	21,9	0,4
Частота 800 хв^{-1}	22,0	22,3	22,9	0,6
Частота 1200 хв^{-1}	23,1	23,3	24,1	0,8
Частота 1600 хв^{-1}	24,0	24,4	25,3	0,9
Частота 1800 хв^{-1}	24,7	25,0	26,1	1,1

Джерело: розроблено авторами

Під час аналізу впливу змінення температури за різних частот обертання насоса відзначено:

– підвищення частоти обертання насоса призводить до відповідного пропорційного підвищення температурного перепаду ΔT в межах $0,4\text{--}1,1 \text{ }^\circ\text{C}$;

– за умов роботи системи ($t > 600 \text{ с}$) температура палива на вході та виході стабілізується, що свідчить про теплову рівновагу паливопроводу;

– у початковий період запуску ($t < 120 \text{ с}$) відзначено інерційну складову фази нагріву, за якою температура підвищувалася повільніше внаслідок теплової інерції магістралі;

– зменшення частоти обертання призводило до відповідного зменшення $\Delta T(t)$, що є наслідком прямої залежності перепаду від інтенсивності циркуляції палива.

Аналітична форма апроксимації отриманої залежності має вигляд

$$\Delta T(t) = 0.25 + 0.00045 \cdot n, \quad (2)$$

де n – частота обертання насоса, хв^{-1} .

Аналіз результатів. Середній температурний перепад під час стабільної роботи без підігріву становив 0,4–1,1 °С, що відповідало вимогам до механічних насосів високого тиску. Збільшення навантаження насоса призводило до відповідного збільшення температурного перепаду ΔT (до 1,0–1,1 °С), що обумовлено нагріванням палива внаслідок гідравлічного тертя та підвищенням температури насоса.

Отримані результати підтвердили адекватність роботи розробленої мікроконтролерної системи, а також засвідчили її придатність для подальшого використання в системах автоматичного регулювання підігріву дизельного палива.

До науково-практичної новизни віднесено отримані закономірності змінення температури палива інтегрованим цифровим датчиком в системі керування паливоподачею НД-21 із використанням Arduino Uno R3. Перспективним виглядає використання отриманих результатів за умов розроблення автоматизованих систем електропідігріву дизельного палива.

Використання Arduino-платформи дозволило знизити вартість системи більш ніж у 3 рази порівняно з промисловими термопарами за умов збереження прийнятної точності.

Висновки. За результатами проведених досліджень розроблено й досліджено мікроконтролерну систему вимірювання температури дизельного палива на базі Arduino Uno.

Встановлено:

- підвищення частоти обертання насоса призводить до відповідного пропорційного підвищення температурного перепаду ΔT в межах 0,4–1,1 °С;
- за умов роботи системи ($t > 600$ с) температура палива на вході та виході стабілізувалася, що свідчило про теплову рівновагу паливопроводу;
- у початковий період запуску ($t < 120$ с) відзначено інерційну складову фази нагріву, за якою температура підвищувалася повільніше внаслідок теплової інерції магістралі;
- зменшення частоти обертання призводило до відповідного зменшення $\Delta T(t)$, що є наслідком прямої залежності перепаду від інтенсивності циркуляції палива.

Результати досліджень уможливили реалізувати інтеграцію цифрового термодатчика DS18B20 у систему паливоподачі насоса НД-21 на стенді KI-15711.

Список літератури

1. Allegro Microsystems. Throttle position sensor principles. *Allegro MicroSystems*. <https://www.allegromicro.com> (дата звернення 20.09.2025).
2. Arduino. *Arduino Uno R3 datasheet*. *Arduino Documentation*. <https://docs.arduino.cc> (дата звернення 10.09.2025).
3. Atmel. *ATmega328P Datasheet*. *Microchip Technology*. 2016 (дата звернення 10.09.2025).
4. Dallas Semiconductor. *DS18B20 Digital Thermometer Datasheet*. *Maxim Integrated*. 2021 (дата звернення 20.09.2025).
5. Korhonen M., Jokiniemi M. Fuel temperature influence on diesel injection process. *SAE Technical Paper*. 2020. № 2020-01-2143. <https://doi.org/10.4271/2020-01-2143>.
6. Lin C., Wang Y. Design of low-cost temperature monitoring system using Arduino and digital sensors. *Journal of Measurements and Automation*. 2021. Vol. 12, No. 3. P. 45–52.
7. Ristić D., Popović M. Integration of microcontroller-based sensors in diesel fuel supply testing. *Mechanical Engineering Letters*. 2022. Vol. 19, No. 2. P. 78–85.

8. ISO 14532:2019. Measurement of temperature in liquid fuels — General requirements. Geneva: International Organization for Standardization, 2019. 24 p.
9. Didenko O., Hrytsiuk M. Experimental evaluation of diesel fuel viscosity and temperature correlation. *Machinery and Energy Systems*. 2023. Vol. 4, No. 1. P. 61–69.
10. Lysenko V., Pavliuk R. Development of a microcontroller system for monitoring parameters of diesel engine fuel supply. *Engineering and Technology Journal*. 2024. Vol. 17, No. 2. P. 24–31.

References

1. Allegro Microsystems. (2025). *Throttle Position Sensor Principles*. Allegro MicroSystems. Retrieved September 20, 2025, from <https://www.allegromicro.com>.
2. Arduino. (2025). *Arduino Uno R3 Datasheet*. Arduino Documentation. Retrieved September 10, 2025, from <https://docs.arduino.cc>.
3. Atmel. (2016). *ATmega328P Datasheet*. Microchip Technology. Retrieved September 10, 2025
4. Dallas Semiconductor. (2021). *DS18B20 Digital Thermometer Datasheet*. Maxim Integrated. Retrieved September 20, 2025.
5. Korhonen, M., & Jokiniemi, M. (2020). *Fuel temperature influence on diesel injection process*. SAE Technical Paper, 2020-01-2143. <https://doi.org/10.4271/2020-01-2143>.
6. Lin, C., & Wang, Y. (2021). *Design of low-cost temperature monitoring system using Arduino and digital sensors*. *Journal of Measurements and Automation*, 12(3), 45–52.
7. Ristić, D., & Popović, M. (2022). *Integration of microcontroller-based sensors in diesel fuel supply testing*. *Mechanical Engineering Letters*, 19(2), 78–85.
8. International Organization for Standardization. (2019). *ISO 14532:2019 — Measurement of temperature in liquid fuels: General requirements*. Geneva: ISO.
9. Didenko, O., & Hrytsiuk, M. (2023). *Experimental evaluation of diesel fuel viscosity and temperature correlation*. *Machinery and Energy Systems*, 4(1), 61–69.
10. Lysenko, V., & Pavliuk, R. (2024). *Development of a microcontroller system for monitoring parameters of diesel engine fuel supply*. *Engineering and Technology Journal*, 17(2), 24–31.

Oleksii Hizzatullin, PhD student, **Oleksandr Shapoval**, PhD student
State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Determining the Patterns of Changes in the Fuel Supply Temperature of the D-21 Engine Based on Arduino Uno R3

The study presents the development, integration, and experimental evaluation of a microcontroller-based diesel fuel temperature monitoring system designed for the ND-21 fuel pump installed on the KI-15711 test bench. The purpose of this work is to enhance the accuracy and efficiency of fuel temperature control by implementing a multi-point digital measurement subsystem based on the Arduino Uno R3 platform.

The system architecture includes waterproof DS18B20 digital temperature sensors mounted in brass protective sleeves and positioned in three control points of the fuel supply line: the fuel tank, the pump inlet, and the pump outlet. A dedicated electronic module with 1-Wire communication, signal averaging, serial data transfer, and LCD visualization was developed. Calibration performed using a mercury thermometer produced a correction coefficient of 0.985, reducing the measurement error to ± 0.2 °C. Experimental investigations demonstrated that the temperature difference ΔT between the pump inlet and outlet increases proportionally to the pump speed. At frequencies ranging from 800 to 1800 rpm, ΔT varied from 0.4 to 1.1 °C. The system exhibited thermal inertia during the first 120 seconds of operation, followed by temperature stabilization after 600 seconds. An analytical approximation describing the relationship between ΔT and pump speed was obtained: $\Delta T = 0.25 + 0.00045 \cdot n$.

The scientific novelty of the study lies in the first-time integration of DS18B20 sensors into the actual ND-21 fuel supply system, enabling direct analysis of thermal characteristics under real operating conditions. Practical significance is expressed in the reduction of measurement system cost by more than three times compared to conventional industrial sensors while maintaining the required accuracy and ensuring multi-point monitoring capabilities. Future research should focus on the development of an automated electrical preheating system, expansion of sensor functionality to include flow and pressure measurement, and the creation of a fully automated control system for the D-21 diesel fuel supply.

Arduino Uno R3, DS18B20, temperature sensor, diesel fuel, ND-21 fuel pump, fuel supply system, measuring module

Одержано (Received) 18.11.2025

Прорецензовано (Reviewed) 10.12.2025

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2025