

УДК 681.518.3

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-17

Мережа А. С., Пташенчук В. В.

Луцький національний технічний університет

ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ ПРИ ШЛІФУВАННІ

У статті представлено систему моніторингу температури різання матеріалів в ході їх оброблення. Наведено структурну та функціональну схему виміральної системи. Для визначення температури матеріалів, особливо в ході їх технологічної обробки (різання, гартування) застосовано термоелектричний датчик, який забезпечує необхідний верхній поріг вимірювань до 1500°C та має високу точність. Висока чутливість та мала інерційність сприяють застосуванню датчиків цього типу для вимірювання температури різання металів. Проведено розробку виміральної системи дослідження температури при шліфуванні побудованої на використанні термоелектричних датчиків температури з наступним підсиленням сигналу та його цифровізацію. Використання мікроконтролера, ізотермічного блоку та оптоелектронного блоку дають змогу проводити обробку інформації, дистанційної передачі та підвищення її точності. Наведений алгоритм керування теплонапруженістю процесу абразивного оброблення металів та їх сплавів як правило включає в себе аналіз існуючих теплових навантажень в схемі технологічної обробки та застосування технічних засобів контролю температури та впливу на неї для забезпечення стабільності обробки та уникнення теплових дефектів.

Ключові слова: вимірвальна система, температура, шліфування, управління, алгоритм, контроль.

Постановка проблеми. Значення температурних вимірювань у сучасній техніці є надзвичайно значимим, що проявляється у великій кількості таких вимірювань в різних галузях, таких як машинобудування, приладобудування, верстатобудування, космічна галузь та інші. Використання металевих конструкційних матеріалів високої точності в усіх наведених галузях забезпечується фінішними операціями обробки, які супроводжуються високими контактними температурами при їх обробці та впливають на експлуатаційні та надійнісні параметри виробу та технічної системи в цілому. Температурні вимірювання являються основою для вивчення енергетичних та міцнісних характеристик технічних систем, оптимізації ефективності їх роботи та надійності в ході експлуатації. Експлуатація складних технічних систем, які мають рухомі елементи та піддаються впливу різного роду динамічних навантажень залежить від якості поверхневого шару матеріалу на який значний вплив має температура в ході його оброблення. Температура є невід'ємним ключовим фактором, який має безпосередній вплив на властивості матеріалу, може їх змінювати як в кращу так і в гіршу сторону. Надто висока температура може призвести до припиків, тріщин та викришування поверхневого шару, низька призводить до зниження режимних параметрів та зменшення ефективності процесу маханобробки та виробництва в цілому. Високі некритичні значення температури є корисними, дозволяють покращувати твердість за рахунок гартування матеріалу а при необхідності досягати необхідної пластичності за рахунок відпуску металевих залізвуглецевих сплавів.

Вплив температури на поверхневий шар при термоциклічному характері її зміни має позитивний ефект на якість та експлуатаційні характеристики виробів [1]. Однак, забезпечення необхідного рівня якості поверхневого шару матеріалу при переривчастому шліфуванні можливе при цілеспрямованому та контрольованому впливі температури на оброблювану поверхню [2] та залишається актуальним питанням у зв'язку з термоциклічним характером зміни температури та складністю її визначення, пов'язаною з низькою чутливістю датчиків температури та досить швидкою зміною теплонапруженості процесу переривчастого шліфування.

Аналіз досліджень і публікацій за темою роботи. Дослідження температури процесу переривчастого шліфування включає в себе дослідження факторів, які мають вплив на теплонапруженість процесу обробки, таких як швидкість різання, подача матеріалу, тип абразиву, конструкція різального інструменту та властивості матеріалу заготовки. Важливе місце при дослідженні температури переривчастого шліфування має характер зміни температури під

впливом конструктивних параметрів різального інструменту та її вплив на властивості оброблюваного матеріалу. Температура в зоні контакту переривчастого абразивного інструменту та досліджуваної заготовки являється визначальним параметром, який характеризує якість новоутвореної поверхні, зношення інструменту та ефективності процесу загалом [3]. Для аналізу температури різання переривчастим інструментом повинні застосовуватися сучасні моделі та методи її вимірювання, враховуючи нестабільний та динамічний характер процесу термоциклічного оброблення переривчастими різальними інструментами.

Переривчасте шліфування є сучасним та прогресивним методом обробки металевих конструкційних матеріалів, особливо важкооброблюваних [4, 5]. На даний момент теоретично обґрунтовано ефективність застосування такого методу, який проявляється в зменшенні теплонапруженості процесу різання, стабілізації якості поверхневого шару та можливості інтенсифікації режимних параметрів, що дає змогу підвищити ефективність процесу обробки. Складність застосування переривчастого абразивного оброблення вимагає застосування спеціального складнопрофільного різального інструменту з подальшим балансуванням в ході використання, що значно ускладнює процес його практичного застосування.

Дослідження температури з використанням експериментальних методів є найбільшим достовірним способом визначення температури в зоні різання, який дає змогу встановити реальні значення температури, що важко при теоретичних методах дослідження, які не дають змогу врахувати всі фактори впливу через надмірне спрощення реальності під час побудови моделей, відсутності адекватних емпіричних даних для перевірки, а також через суб'єктивні помилки в логічних висновках.

Викладення основного матеріалу. Принцип роботи вимірювальної системи дослідження температури при шліфуванні побудований на використанні термоелектричних датчиків температури з наступним підсиленням сигналу та цифровізацію його за допомогою аналого-цифрового перетворювача для зручності сприйняття та обробки інформації. На рисунку 1 представлена структурна схема вимірювального каналу.

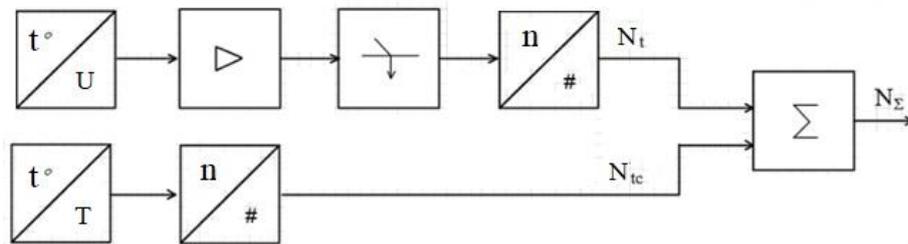


Рисунок 1 – Структурна схема вимірювального каналу

Датчики температури T1, T2 та T3 розміщуються у різних точках контакту різального інструменту з заготовкою в напрямку її руху з метою кращого її контролю. Для забезпечення більшої точності температури різання в ході обробки матеріалу використана компенсація температури холодних спаїв за рахунок застосування термічного блоку, який забезпечує мале значення градієнта температур між вільними кінцями термодавачів а значення їх температури забезпечується датчем ДТ.

Сформовані термоелектричними датчиками сигнали передаються в термоблок, в якому проходить компенсація через різницю гарячого та холодного спаю термопар, підвищуючи при цьому точність вимірювання. Напряга сформована термопарою складає мале значення (4,1276 мВ) на кожні 100 °С та при температурі навіть 1000 °С складе всього 41 мВ, що є досить малою величиною. З метою підвищення сигналу термопарі вимірювальна система передбачає наявність підсилювачів постійного струму для подальшої передачі підсиленого сигналу вимірювальної інформації до мікроконтролера для цифровізації.

Значення напруги на виході термоелектричного датчика визначається наступною залежністю:

$$U_{ТП} = k_{ТП} \cdot (t_p - t_{xc}) \quad (1)$$

де $k_{ТП}$ – коефіцієнт перетворення термоелектричного датчика;

t_p – досліджувана температура;

t_{xc} – значення температура холодного спаю термоелектричного датчика.

Забезпечення компенсації температури термопари забезпечується датчиком TMP05, який має можливість перетворення температури на електричні імпульси з затримкою у часі залежно від величини температури

Датчик температури має наступну функцію перетворення вимірювального сигналу:

$$U_T = k_d \cdot t_p \quad (2)$$

де U_T – напруга датчика;

k_d – коефіцієнт перетворення датчика;

t_p – досліджувана температура

Вираз перетворення вимірювального каналу відповідно матиме вигляд:

$$N_t = U_t \cdot K_{пс} \cdot K_{ак} \cdot K_{ацп} \quad (3)$$

де N_t – цифровий код на виході;

U_t – напруга з термоелектричного давача;

$K_{пс}$ – коефіцієнт підсилення;

$K_{ак}$ – коефіцієнт передачі сигналу аналоговим комутатором;

$K_{ацп}$ – коефіцієнт перетворення сигналу аналого-цифровим перетворювачем.

Перетворення сигналу холодного спаю термопари описується виразом:

$$N_{tc} = T \cdot K_{ацп} \quad (4)$$

де T – час імпульсу;

$K_{ацп}$ – коефіцієнт перетворення сигналу аналого-цифровим перетворювачем.

Вираз сумарного перетворення вимірювального каналу матиме вигляд:

$$N = (U_t \cdot K_{пс} \cdot K_{ак} \cdot K_{ацп}) + (T \cdot K_{ацп}) \quad (5)$$

Похибка вимірювального каналу описується виразом [6]:

$$\gamma = \gamma_{пс} + \gamma_{ак} + \gamma_{ацп} \quad (6)$$

де $\gamma_{пс}$ – приведена похибка підсилювача сигналу;

$\gamma_{ак}$ – приведена похибка передачі сигналу аналоговим комутатором;

$\gamma_{ацп}$ – приведена похибка перетворення сигналу аналого-цифровим перетворювачем.

Функціональна схема вимірювальної системи наведена на рисунку 2. Вимірювання температури різання починається з визначення контактних температур круга з заготовкою за допомогою термоелектричних давачів T_1 , T_2 , T_3 , які перетворюють її в аналогову термо ЕРС. Далі аналогові сигнали підсилюються та надходять на входи комутатора $AIN1$, $AIN2$, $AIN3$ який перемикає їх поетапно один за одним які підсилюють надсилає його на вихід (OUT). З вихідного каналу комутатора вимірювальний сигнал передається до АЦП з наступним його перетворенням на цифровий. Далі сигнал надходить до мікроконтролера (CPU) для його обробки. Для підвищення точності, у вимірювальній системі передбачений датчик температури холодного спаю термопари ($T_{хс}$). Сигнал з нього надходить на цифровий вхід CPU та забезпечує компенсацію температури.

Процесор (CPU) забезпечує обробку цифрових даних та керує роботою інших частин системи, зберігаючи необхідні дані в пам'яті EEPROM та застосовуючи пам'ять (RAM) для накопичення інформації в ході обробки. Постійна пам'ять (PROM) застосовується для зберігання прошивки та необхідних програмних продуктів.

Слідкуючий таймер (WDT) здійснює контроль роботоздатності CPU та забезпечує його перезавантаження у разі його підвисання. Опрацьована інформація за допомогою приймача/передавача (UART) надходить на інтерфейс RS-485 для можливості дистанційної її передачі, який забезпечує передачу даних на великі відстані та можливості підключення додаткових пристроїв обробки інформації.

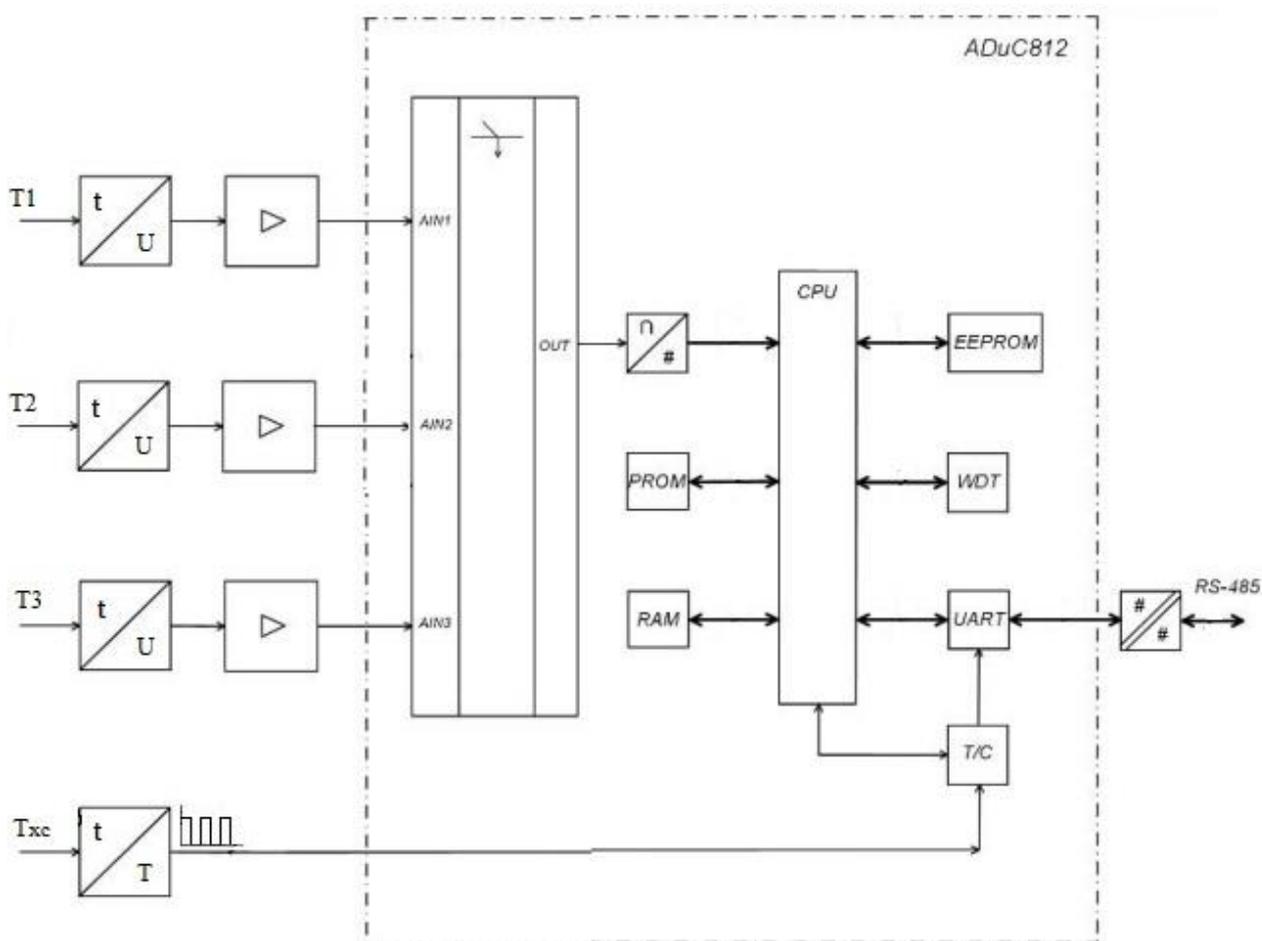


Рисунок 2 – Функціональна схема вимірювальної системи:

T_1, T_2, T_3, T_4 – термоелектричні давачі; T_{xc} – давач температури холодного сну; Δ – підсилювачі; CPU – процесор; PROM – постійний пристрій запам'ятовування; RAM – оперативна пам'ять; WDT – слідкуючий таймер; EEPROM – запам'ятовуючий пристрій з електричним стиранням; UART – інтерфейс; ∇ – комутатор; RS-485 – системний інтерфейс

Рівень температури на глибині δ від поверхні заготовки можна знайти за формулою [7]:

$$T_{\delta, \max} = T_{0, \max} \left(1 - 0.5 \sqrt{\frac{V}{ah}} \cdot \delta \right), \quad (7)$$

де $T_{\delta, \max}$ – температури заготовки на глибині δ від її поверхні;

$T_{0, \max}$ – допустиме значення температури поверхні заготовки в ході її абразивного оброблення;

V – швидкість руху заготовки в зоні різання;

a – коефіцієнт теплопровідності середовища;

h – напівширина теплового джерела;

δ – глибина зняття припуску.

Моніторинг та контроль рівня теплонапруженості процесу різання відбувається згідно алгоритму, зображеного на рисунку 4: В блоці умов заноситься допустиме значення температури різання матеріалу залежно від його фізичних властивостей та режимних параметрів. Відбувається порівняння реальної та допустимої температури різання. Електричний сигнал сформований термоелектричним давачем аналізується контролером та застосовується для управління швидкістю подачі заготовки в зону різання та теплонапруженістю процесу зокрема.

Дотримання допустимої температури шліфування дає змогу стабілізувати якість абразивної обробки та уникнути припиків та інших теплових дефектів.

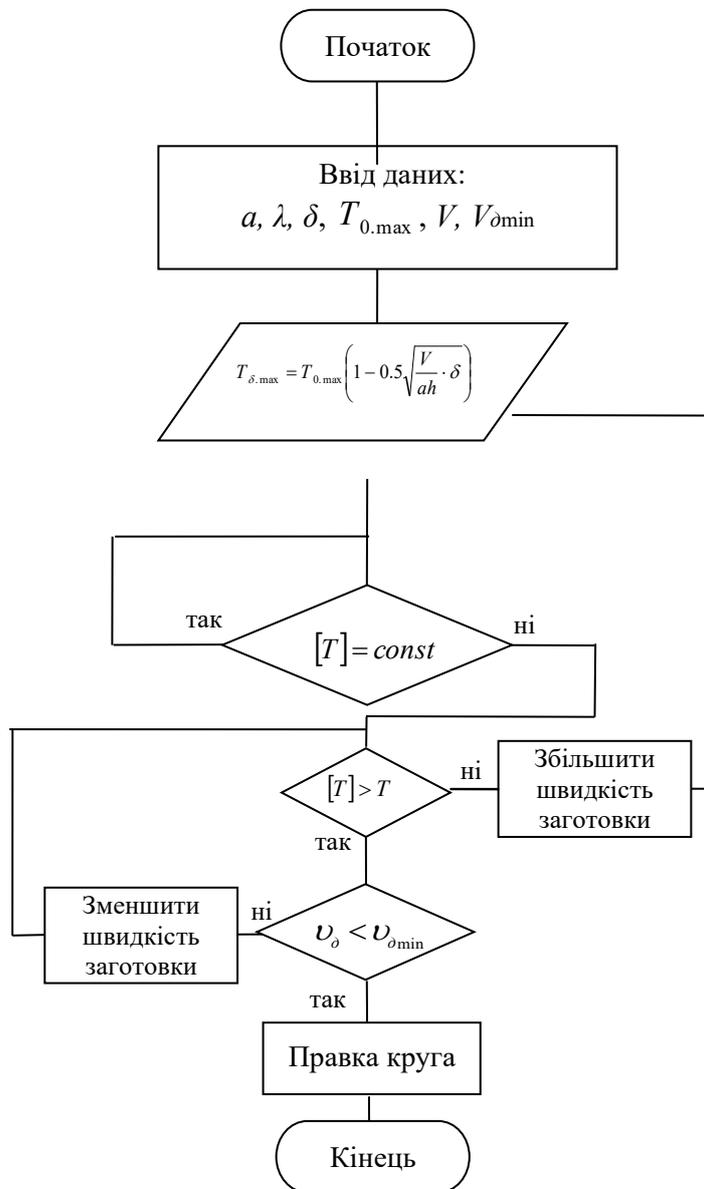


Рисунок 3 – Алгоритм контролю температури різання матеріалу в процесі його обробки

Висновки. Проведений аналіз показав, що процеси у функціональних блоках ІВС, зокрема АЦП, мають стохастичний характер, що потребує застосування методів ймовірнісного аналізу для оцінювання точності та прогнозування метрологічних характеристик. Запропоновано використання феноменологічних моделей, які дозволяють описати зміну стану вимірювальних засобів у часі та враховують як аналітичні, так і статистичні залежності між параметрами. Обґрунтовано доцільність застосування аналітико-ймовірнісного підходу до прогнозування стану ІВС, який поєднує точність математичного аналізу з гнучкістю статистичного моделювання стохастичних процесів.

Розроблена методологія дає можливість підвищити достовірність оцінювання точності блоків ІВС, скоротити ризики метрологічних відмов та забезпечити стабільність роботи програмно-визначуваних вимірювальних платформ у реальному часі. Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні та експлуатації сучасних ІВС для побудови систем автоматичного контролю точності та прогнозування метрологічної надійності їх компонентів.

Інформаційні джерела

1. Сьох О. М., Пташенчук В. В. Формування та дослідження мікрогеометрії торців кілець підшипників. Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку: матеріали VI-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції (23-25 жовтня 2024 р.): збірник тез. Луцьк: ЛНТУ, 2024. С. 114-115.
2. Пташенчук В. В., Васькевич В. О. Дослідження мікротвердості залізвуглецевих сплавів сформованих в середовищі швидкозмінного температурного поля. Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку: Матеріали VI-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції (23-25 жовтня 2024 р.): збірник тез. Луцьк: ЛНТУ, 2024. С. 101.
3. Температура макропереривчастого і мікропереривчастого шліфування. URL: <http://bornik.college.ks.ua/downloads/sbornik4/pdf/2.pdf> (дата звернення: 09.09.2025).
4. Визначення температури переривчастого шліфування. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Roru_2012_2_13 (дата звернення: 09.09.2025).
5. Зниження теплового фактору при плоском абразивне шліфування. URL: http://dspace.op.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/9915/1/tnt_2017_4_4.pdf (дата звернення: 09.09.2025).
6. Защепкіна Н. М., Шульга О. В., Наконечний О. А., Метрологічне забезпечення інформаційно-вимірвальних систем: навч. посіб. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 176 с.
7. Теплові процеси при звичайному та переривчастому шліфуванні: навчальний посібник / Якімов А. В. та інші. URL: <https://repository.hneu.edu.ua/jspui/handle/123456789/11156> (дата звернення: 12.10.2025).

Network A., Ptashenchuk V.

Lutsk National Technical University

**MEASURING SYSTEM FOR TEMPERATURE MONITORING
CUTTING DURING GRINDING**

The article presents a system for monitoring the cutting temperature of materials during their processing. The structural and functional diagram of the measuring system is given. To determine the temperature of materials, especially during their technological processing (cutting, hardening), a thermoelectric sensor is used, which provides the necessary upper measurement threshold up to 1500°C and has high accuracy. High sensitivity and low inertia contribute to the use of sensors of this type for measuring the temperature of metal cutting. A measuring system for studying the temperature during grinding has been developed, built on the use of thermoelectric temperature sensors with subsequent signal amplification and its digitalization. The use of a microcontroller, isothermal block and optoelectronic block allows information processing, remote transmission and increasing its accuracy. The presented algorithm for controlling the thermal stress of the abrasive processing of metals and their alloys usually includes an analysis of existing thermal loads in the technological processing scheme and the use of technical means of temperature control and influence on it to ensure the stability of processing and avoid thermal defects.

Keywords: measuring system, temperature, grinding, control, algorithm, control.

Дата першого надходження
статті до видання
15.10.2025 р

Дата прийняття статті
до друку
16.11.2025 р.

Дата
оприлюднення
25.12.2025 р.