

**ТИМОЩУК ОЛЕКСАНДР**

Національний університет водного господарства і природокористування

<https://orcid.org/0000-0002-4367-4692>e-mail: [tymoschukos@gmail.com](mailto:tymoschukos@gmail.com)**КОЗЯР МИКОЛА**

Національний університет водного господарства і природокористування

<https://orcid.org/0000-0002-1074-886X>e-mail: [m.m.koziar@nuwm.edu.ua](mailto:m.m.koziar@nuwm.edu.ua)

## КОНЦЕПТ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ ІНТЕЛЕКТУВАЛЬНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ТОКАРНИХ ВЕРСТАТІВ З ЧПК

*В роботі наведено результати обґрунтування концепту мехатронного модуля інтелектуального охолодження різального інструменту для токарних верстатів з числовим програмним керуванням. Концепт заснований на подвійному (що дублює) контролі аналізі температурних показників теплоносія (охолоджувальної рідини), різального інструменту та зони різання. Це дозволить здійснювати автоматичний аналіз температурних показників та адаптивно регулювати інтенсивність охолодження, забезпечуючи оптимальні умови роботи інструменту.*

*Ключові слова: верстати з ЧПК, мехатроніка, мехатронний модуль, охолодження інструменту, технологічна термометрія.*

**TYMOSHCHUK OLEKSANDR, KOZYAR MYKOLO**

National University of Water and Environmental Engineering

## CONCEPT OF A MECHATRONIC MODULE FOR INTELLIGENT COOLING OF CUTTING TOOLS FOR CNC LATHES

*Existing cutting tool cooling systems on CNC machines are typically adaptations of traditional methods used on manually operated machines. The coolant supply is carried out without taking into account the thermal processes in the cutting zone, which leads to limited control capabilities and uneven heat dissipation. This, in turn, has a negative impact on tool life, workpiece surface finish and machining accuracy. Automating the turning process on CNC machines requires efficient cutting tool cooling systems to increase productivity and improve machining quality. The aim of this paper is to substantiate the concept of a mechatronic module for intelligent cooling of cutting tools in CNC metalworking lathes with dual temperature control of coolant, cutting tool and air. The concept of the module is based on an in-depth analysis of the sources of cutting tool heating and the development of a system that provides adaptive control of the cooling process. The key features of the proposed solution are: dual thermometry (simultaneous monitoring of the temperature of the cooling liquid, cutting tool and cutting zone ensures accurate monitoring of thermal processes); adaptive control (depending on the temperature data obtained, the system automatically adjusts the cooling intensity, ensuring optimal tool operation conditions); energy efficiency (due to intelligent control, the module allows efficient use of cooling resources, reducing energy consumption); and It is believed that the proposed concept of the mechatronic module will allow to: increase the service life of the cutting tool; improve the quality of the machined surface; increase machining accuracy; reduce equipment maintenance costs; and increase machine productivity. The introduction of such a module is a promising area for the development of turning technologies, as it will increase production efficiency and reduce production costs. Further research is seen in expanding the functionality of the module, optimizing its operation for different types of cutting tools and materials, and developing intelligent control systems (microcontroller control software).*

*Keywords: CNC machine, mechatronics, mechatronic module, tool cooling, process thermometry.*

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Автоматизація виготовлення деталей на токарних верстатах (ТВ) з числовим програмним керуванням (ЧПК) нині є не від'ємним складником сучасного виробництва, а підвищення продуктивності та якості обробки – важливим завданням наукової спільноти. Значною мірою на ці показники впливає ефективність охолодження оброблюваних матеріалів та різального інструменту [1–5].

Наявні підходи до охолодження різального інструменту ТВ з ЧПК здебільшого повторюють методи, які притаманні верстатам з ручним керуванням. Охолоджувальна рідина (ОР) у верстатах з ручним керуванням подається, у переважній більшості, без урахування термічного розподілу в процесі обробки. Такі системи здебільшого мають обмежені можливості регулювання параметрів охолодження, що детермінує нерівномірне відведення тепла та, як наслідок, до швидкого зносу різального інструменту, зниження якості обробленої поверхні й параметричної точності деталей.

Деякі сучасні ТВ обладнані автоматизованими засобами охолодження різального інструменту. Так зокрема деякі рішення полягають у застосуванні термічної візуалізації різального інструменту, на основі якої регулюється інтенсивність подачі ОР [6], інші засновані на внутрішньому охолодженні токарних різців (ТР) за результатами показників термічних датчиків [7], а деякі удосконалені двофазною системою охолодження теплоносієм з низькою температурою пароутворення [8].

Для підвищення ефективності охолодження доцільно послуговуватися комплексним підходом, який враховуватиме головні чинники, що впливають на термодинамічні процеси у різальному інструменті. Одним із перспективних підходів розв'язання цієї проблеми є упровадження мехатронних модулів (ММ),

котрі сприятимуть автоматизації процесу ідентифікації нагрітих ділянок різального інструменту, а також подачі ОР.

### Аналіз досліджень та публікацій

Останні дослідження, щодо багатоаспектного охолодження різального інструменту ТВ з ЧПК полягають в інтеграції додаткових модулів термічного кондиціонування обертальних деталей [9] та в створенні мікроканалів охолодження у тілі різального інструменту (різцях) з додаванням термодатчиків, показники яких впливають на інтенсивність обміну ОР [10]. Деякі дослідники пропонують підхід інтервального охолодження, що реалізоване з використанням плати мікроконтролера та реле часу [11].

Окрема група досліджень присвячена використанню засобів термометрії у поєднанні із програмним керуванням подачі тепла. Група турецьких дослідників пропонує оптимізувати систему охолодження ТВ з використанням інфрачервоного пірометра та К-подібної термопари, котрі фіксують температуру контакту «інструмент-стружка» й безпосередньо температуру інструменту [12]. Інший підхід ґрунтується на дуальному використанні К-подібних термопар, одна з яких розміщується на відстані 5 мм від вістря різання, а інша контролює температуру ТР. Залежно від зафіксованої температури автоматизована система подачі теплоносія інтенсифікує або уповільнює подачу [13].

Для оптимізації охолодження ТР при «сухій» обробці використовують термоелектричний модуль [14], принцип роботи якого заснований на ефекті Пельтьє. У такому виконанні при подачі електричного струму через модуль (набір напівпровідникових елементів n-типу і р-типу), одна його сторона поглинає тепло, а інша відводить його, при цьому сторона, що охолоджується спрямовується в бік ТР.

Результати аналізу джерельної бази засвідчили, що проблема охолодження токарного інструменту на верстатах з ЧПК є досить актуальною. Водночас вона вимагає подальших пошуків комплексного характеру спрямованих на урахування усіх чинників, які детермінують надмірне нагрівання різального інструменту.

### Формулювання цілей статті

**Метою** роботи є обґрунтування концепту ММ інтелектуального охолодження різального інструменту металообробних ТВ з ЧПК з подвійним контролем температури теплоносія, різця і повітря.

### Виклад основного матеріалу

Обґрунтування концепту ММ охолодження необхідно виконувати з урахуванням двох чинників: 1) визначення головних джерел нагрівання різального інструменту ТВ з ЧПК; 2) архітектура функціональної інтеграції засобів детектування, обробки, перетворення й виконання.

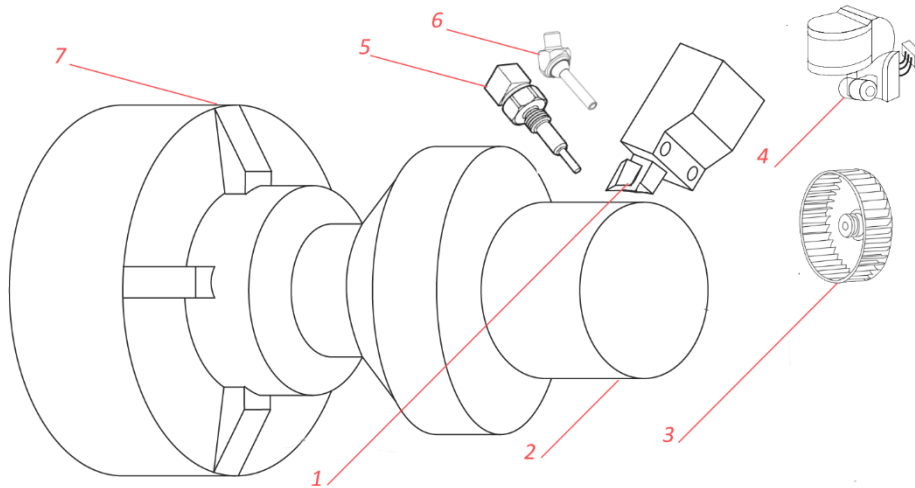
Основні джерела нагрівання різального інструменту ТВ умовно можна розподілити на дві групи. Перша група стосується утворення надлишкового тепла в зоні різання. Внаслідок ортогональної обробки деталі спостерігається деформаційне тепло, що виникає через пластичну деформацію матеріалу заготовки під дією ТР. Водночас встановлено, що хоча й матеріал різця зазвичай твердіший від заготовки, термопружні переміщення в поєднанні з тепловими потоками, також викликають деформаційне тепло в різальному інструменті [14]. Таким чином термопружні напруження, які зумовлені різницею температур між різцем і заготовкою, детермінують мікроскопічні деформації матеріалу інструменту, а відтак, додаткові тепловиділення, ймовірно досить значне при обробці твердих і жароміцних сплавів. Також значний обсяг тепла виділяється у результаті тертя між інструментом і стружкою, а також інструментом і оброблюваною деталлю. Основною причиною фрикційного перегрівання при токарній обробці є контакт стружки із задньою поверхнею різального різця [15]. На відміну від попередньої причини де основною передумовою була різниця твердості матеріалу, тут важливу роль відіграє глибина різання. Досить малодослідженою є проблема виникнення надлишкового тепла, що пов'язане із дисипацією механічної енергії. Мова йде про те, що чим менші параметри обробки та точність, тим більшою стає відносно мала площа контакту, що зумовлює більшу концентрацію тепла в певних контактних зонах [16]. Мінімізувати перегрівання, спричинених описаними чинниками, можна шляхом направлено охолодження (переважно рідинного) найбільш нагрітих ділянок різального інструменту та заготовки. Основне нагрівання відбувається в зоні різання внаслідок пластичної деформації матеріалу заготовки та фрикційних чинників, тому для цієї ділянки доцільно проводити ретельну термографію й подавати необхідну кількість теплоносія.

Друга група стосується утворення надлишкового тепла в від інших систем ТВ з ЧПК. Насамперед це стосується передавання тепла оброблюваній заготовці від шпинделя верстата, яке обумовлене тертям підшипників шпинделя та інших механізмів. Доведено, що заготовка може отримувати від шпиндельного валу ТВ від 2 до 20% тепла, залежно від оброблюваного матеріалу [17]. Ще однією вагомою причиною перегрівання при токарній обробці є тепло, що виділяється в електронних компонентах систем ЧПК. Електронні компоненти ЧПК можуть стати значним джерелом тепла, особливо під час інтенсивної обробки [18]. Вони мають не значну частку у загальному перегріванні зони різання ТВ з ЧПК. Варто зазначити, що чинники надлишкового тепла в від інших систем ТВ з ЧПК проявляються переважно при інтенсивних та довготривалих режимах металообробки й становлять менший ризик у порівнянні із чинниками першої групи.

При розробці концепту охолоджувального ММ ми розглядали першу групу чинників перегрівання зони різання, що зумовило вибір відповідних компонентів. Принцип роботи модуля полягає

в наступному: а) аналіз температурних показників ОР за допомогою датчиків і теплових параметрів різального інструменту під час обробки; б) визначення режиму охолодження передбачає виконання однієї із зазначених дій: а); якщо температура теплоносія підвищується вище встановленого рівня, модуль автоматично збільшує швидкість циркуляції та/або вмикає додатковий охолоджувач б) якщо температура в зоні різання підвищується вище встановленого рівня, модуль активує вентиляційний механізм та підсилює подачу повітряного охолодження; в) модуль в автоматичному режимі (послугуючись термодатчиками) коригує інтенсивність охолодження задля підтримання температури інструменту та зони різання в оптимальних температурних параметрах. Враховуючи температурні чинники (теплоносія та повітря), модуль перемикається між різними режимами охолодження або комбінувати їх для досягнення необхідних температурних параметрів; г) реалізація зворотного зв'язку полягає у тому, що модуль сповіщає оператора про перевищення допустимих температурних показників навіть при максимальних режимах охолодження.

Основні компоненти ММ: а) мікропроцесорна система управління, яка слугує для обробки отриманих даних від й керує засобами примусового охолодження; б) інфрачервоні теплові датчики слугують для безконтактного детектування й моніторингу температури різального інструменту; в) датчики температури повітря (терморезистори) слугують для вимірювання температури у зоні різання; г) датчики температури теплоносія (термопари) слугують для температурного контролю рідини в системі охолодження; д) засоби адаптивного охолодження (помпи, вентилятори, клапани), які керують потужністю та швидкістю подачі теплоносія, а також регулювання вентиляції залежно від температурних показників в зоні різання.



(1 – токарний різець; 2 – оброблювана деталь; 3 – вентиляторний модуль; 4 – інфрачервоний тепловий датчик; 5 – датчик температури повітря; 6 – засіб рідинного охолодження + датчик температури теплоносія; 7 – затискний патрон)

**Рис. 1. Структурно-компонентна схема мехатронного модуля інтелектуального охолодження**

Алгоритм виконання керуючої програми представлений на рис. 2.

Описати логіку виконавчої програми мікроконтролера можна наступним чином: а) старт (ініціалізація) – відбувається стартове зчитування початкових показників датчиків контролю температури; б) інтервальне опитування датчиків щодо показників температури масла й інструмента; в) крок прийняття рішень – передбачає активацію системи охолодження у разі перевищення критично порогових температурних показників будь-якого з контрольованих параметрів; г) інформування оператора шляхом подачі світлового чи звукового сигналу у разі критичного перегрівання й неможливості зняти надлишкове тепло засобами охолодження; д) завершення циклу «Стоп». Після виконання усіх ітерацій ММ повертається до першого кроку «Старт».

Переваги пропонованого ММ полягають в економічному використанні ОР шляхом збалансованого застосування теплоносія та повітряної вентиляції, що сприяє збільшенню термінів експлуатації різального інструменту, покращує якість оброблюваних поверхонь шляхом уникнення деформацій та надмірного зношування інструменту. Водночас система екстреного сповіщення оператора забезпечує превенцію критичних режимів роботи ТВ з ЧПК, як-от поломка різального інструменту чи пошкодження патрона чи супорта.

Ключова інновація пропонованого підходу полягає в комбінванні подвійної термометрії (теплоносія та повітря) для адаптивного охолодження інструменту на токарних металообробних верстатах з ЧПК. Описаний ММ дозволяє в автоматичному режимі перемикатися між різними джерелами охолодження, комбінувати їх або використовувати одночасно, залежно від зовнішніх (температура повітря в зоні різання) та внутрішніх чинників (температура теплоносія, різального інструменту). Це забезпечує енергоефективне використання ресурсів для охолодження різального інструменту токарного металообробного верстата з ЧПК.

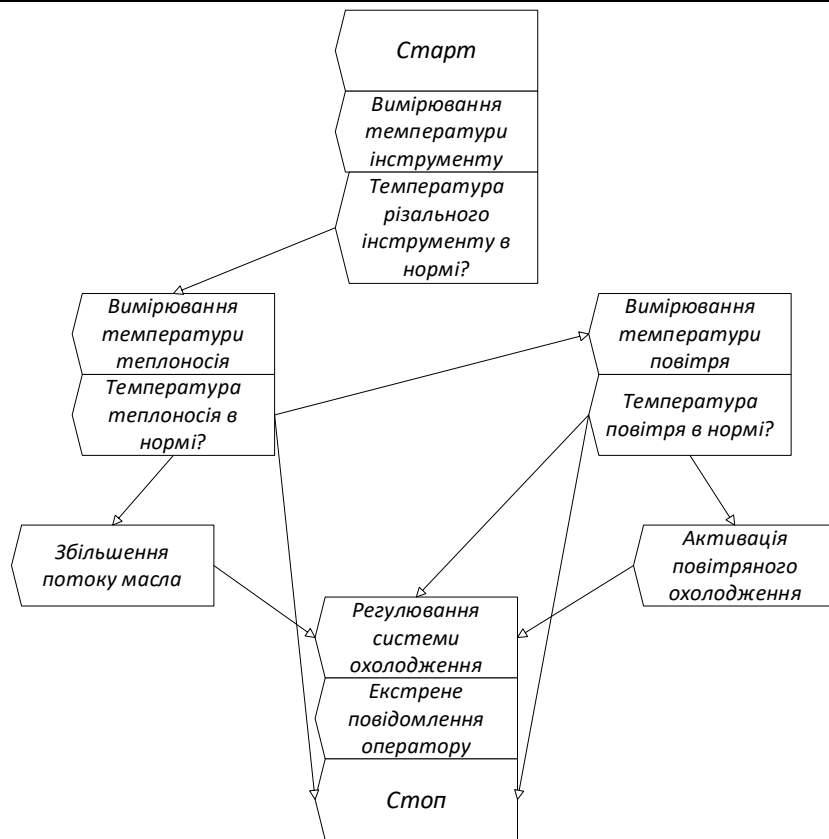


Рис. 2. Алгоритм управління системою охолодження у мехатронному модулі

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Пропонований концепт ММ інтелектуального охолодження різального інструменту металообробних ТВ з ЧПК з подвійним контролем температури теплоносія, різця і повітря є перспективним для розв'язання проблеми перегрівання різального інструменту на ТВ з ЧПК. Завдяки своїй модульності та гнучкості налаштування, він може бути інтегрований в різні типи верстатів та забезпечувати оптимальні умови охолодження для широкого спектра матеріалів та режимів обробки. Подальші дослідження вбачаються у розширенні його функціональних можливостей, оптимізації для різних типів різального інструменту й матеріалів, а також в розробці інтелектуальних систем управління.

### Література

- Oshovsky V. Influence of deep cooling on the stability of cutting tools. *The 10th International scientific and practical conference "Priority directions of science and technology development" (June 13–15, 2021)* Kyiv, Ukraine : SPC "Sci-conf.com.ua", 2021. P. 286–292.
- Selek M., Tasdemir S., Dincer K., Baskaya S. Experimental examination of the cooling performance of Ranque-Hilsch vortex tube on the cutting tool nose point of the turret lathe through infrared thermography method. *International Journal of Refrigeration*. 2011. Vol. 34, № 3. P. 807–815.
- Ejjeji T., Adedayo S. M., Bello O. W., Abdulkareem S. Effect of machining variables and coolant application on HSS tool temperature during turning on a CNC lathe. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 413, № 1. P. 012004. IOP Publishing.
- Alabi A. G. F., Ajiboye T. K. Investigation of cutting temperatures distribution in machine heat treated medium carbon steel on a lathe. *The Pacific Journal of Science and Technology*. 2012. Vol. 13, № 1. P. 48–62.
- Seah K. H. W., Li X., Lee K. S. The effect of applying coolant on tool wear in metal machining. *Journal of Materials Processing Technology*. 1995. Vol. 48, № 1–4. P. 495–501.
- Kumar R., Sharma S., Kumar R., Verma S., Rafighi M. Review of lubrication and cooling in computer numerical control (CNC) machine tools: a content and visualization analysis, research hotspots and gaps. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, № 6. P. 4970.
- Bin Che Ghani S. A. Design and analysis of the internally cooled smart cutting tools with the applications to adaptive machining : doct.th. PHD: Engineering / Brunel University School of Engineering and Design. 2013.
- Ingraci Neto R. R., Scalon V. L., Fiocchi A. A., Sanchez L. E. Indirect cooling of the cutting tool with a pumped two-phase system in turning of AISI 1045 steel. *The International Journal of Advanced*

*Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 87. P. 2485–2495.

9. Züst S., Pavliček F., Fischer L. J., Weiss L., Wegener K. Thermo-energetic modelling of machine tool spindles with active cooling based on macro models. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*. 2016. Vol. 9, № 3. P. 197–214.

10. Abid A., Hamza S. M., Alim M. K., Muaz M., Hussain S., Arif S. Thermal Analysis of Micro-Channel Internal Cooling in Cutting Tools: AMLA. *Applied Mechanics and Materials*. 2024. Vol. 922. P. 97–107.

11. Nor F. M., Jafar F. A., Jian T., Bakar M. H. A. Arduino Based Automated Coolant Supply System for CNC Machining.

12. Kus A., Isik Y., Cakir M. C., Coşkun S., Özdemir K. Thermocouple and infrared sensor-based measurement of temperature distribution in metal cutting. *Sensors*. 2015. Vol. 15, № 1. P. 1274–1291.

13. Ejieji T., Adedayo S. M., Bello O. W., Abdulkareem S. Effect of machining variables and coolant application on HSS tool temperature during turning on a CNC lathe. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 413, № 1. P. 012004. IOP Publishing.

14. Nikolić R. H., Lučić M. V., Nedić B. P., Radovanović M. R. Calculation of temperature fields during lathe machining with thermoelectric cooling by using the finite element method. *Thermal Science*. 2019. Vol. 23, № 3, Part B. P. 1889–1899.

15. Komanduri R., Hou Z. B. Thermal modeling of the metal cutting process—Part II: temperature rise distribution due to frictional heat source at the tool–chip interface. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2001. Vol. 43, № 1. P. 57–88.

16. Komanduri R., Hou Z. B. Thermal modeling of the metal cutting process—Part II: temperature rise distribution due to frictional heat source at the tool–chip interface. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2001. Vol. 43, № 1. P. 57–88.

17. Chan N. C. Analysis of Spindle Cooling System : doct.th. PHD: Engineering / UMP. 2013.

18. Jia S., Wang S., Lv J., Cai W., Zhang N., Zhang Z., Bai S. Multi-objective optimization of CNC turning process parameters considering transient-steady state energy consumption. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, № 24. P. 13803.