

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Голобородько Володимир Володимирович

УДК 006.91:681.2.083

ДИСЕРТАЦІЯ
РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ
ТЕПЛОВІЗІЙНОГО КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ ЗОВНІШНЬОГО ТОЧІННЯ

152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

15 Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії. Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ В.В. Голобородько
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: Оборський Геннадій Олександрович,
доктор технічних наук, професор

Одеса – 2025

АНОТАЦІЯ

Голобородько В.В. Розробка інформаційно-вимірювальної системи тепловізійного контролю процесу зовнішнього точіння. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 15 – Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». – Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, 2025.

Дисертація присвячена дослідженню актуальної науково-технічної проблеми вимірювання параметрів теплового стану в зоні різання при зовнішньому точінні із застосуванням інформаційно-вимірювальної системи тепловізійного контролю. Для досягнення цієї мети в роботі проаналізовано основні закономірності теплоутворення та теплообміну процесу різання, проведено порівняльний аналіз існуючих методів та засобів вимірювання температури, придатних для застосування при обробці різанням.

Для підвищення інформативності та достовірності результатів тепловізійного спостереження було визначено підхід до моделювання теплового стану зони різання на основі рівняння теплопровідності з урахуванням початкових та крайових умов. Описано спрощену математичну модель для верифікації експериментальних температур отриманих методом тепловізійного контролю.

Визначено методики оцінювання метрологічних характеристик тепловізійних систем, які містять: визначення просторової та температурної роздільної здатності (теплової чутливості), з урахуванням характеристик поля зору тепловізійної камери.

Для підвищення точності та достовірності отриманих результатів вимірювань, було оцінено вплив кута депресії на відбитки проєкцій вертикальних та горизонтальних складових поля зору з урахуванням випромінювальної здатності оброблюваних матеріалів.

Запропоновано алгоритм для розпізнавання та автоматичної обробки термограм з використанням згорткової штучної нейронної мережі на базі архітектури U-Net. Для забезпечення якісного навчання був використаний алгоритм навчання з «Вчителем», а для формування якісної навчальної вибірки – було розроблено гібридний алгоритм бінаризації термограм з метою створення масок для виділення зон різання. За допомогою інференсу реалізовано можливість опрацювання інших термограм на базі вже навченої моделі.

У вступі наведено загальну характеристику роботи, підкреслено її актуальність, визначено мету та завдання, об'єкт, предмет дисертаційного дослідження, відповідність науково-дослідним роботам. Сформульовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів та особистий внесок автора.

В першому розділі зроблено аналіз літературних джерел, який дозволив проаналізувати особливості теплообміну у процесі різання та основні закономірності теплоутворення. Розглянуто існуючі методи та засоби вимірювання температури, зроблено порівняльний аналіз методів та засобів вимірювання температури, придатних для застосування при обробці різанням. Визначено переваги застосування методу тепловізійного контролю, який дає змогу не впливати на процес різання та навколишнє середовище, який не потребує зміни конструкцій інструменту та заготовки, підходить як для миттєвого визначення температури так і для моніторингу в реальному часі. Підкреслено важливість врахування метрологічних характеристик застосування тепловізорів у вимірювальних задачах та складнощі, які виникають у процесі збору та аналізу даних.

В другому розділі для підвищення інформативності та достовірності результатів тепловізійного спостереження було визначено підхід до моделювання теплового стану зони різання на основі рівняння теплопровідності з урахуванням початкових та крайових умов. Запропоновано спрощену математичну модель для верифікації експериментальних температур отриманих методом тепловізійного контролю. Визначено методики оцінювання метрологічних характеристик тепловізійних систем, які містять визначення просторової роздільної здатності та

теплової чутливості, з урахуванням характеристик поля зору тепловізійної камери. Запропоновано залежність для оцінювання стандартної невизначеності зміни температури за часом $T(t)$ для результатів вимірювання, отриманих з тепловізійних відеокамер через стандартне відхилення залишків апроксимованої моделі.

В третьому розділі було проаналізовано та обрано декілька алгоритмів бінаризації для комбінації з метою розробки гібридного методу бінаризації. Сформована та розгорнута архітектура згорткової нейронної мережі з використанням фреймворків TensorFlow та Keras, що дало змогу реалізувати архітектуру U-Net, яка є одною з передових у розпізнаванні кадрів з нетиповою структурою та пошуку цікавих, для дослідників, об'єктів.

В четвертому розділі на основі проведених експериментів із застосуванням різних тепловізорів різних моделей опрацьовано результати та оцінено невизначеності вимірювання температури методом інфрачервоної термографії для камери пістолетного типу та відеокамери. Опрацьовано результати роботи штучної нейронної мережі з обробкою відео записів термограм з тепловизору Flir R640 та проведено їх верифікацію, з урахуванням реальних показників термограм.

Наукова новизна отриманих результатів:

Вперше запропонована нейромережева модель для інтелектуального аналізу тепловізійних зображень зони різання з метою автоматичного виявлення теплових аномалій та підвищення надійності управління тепловим процесом різання за рахунок використання згорткової нейронної мережі з архітектурою U-Net, що навчається на комбінованих експериментальних і модельних даних, і характеризується високою чутливістю, а також можливістю адаптивної інтерпретації теплових карт в реальному часі при мінливих умовах різання, що вигідно відрізняє її від існуючих методів аналізу, заснованих на пороговій фільтрації або ручній інтерпретації тепловізійних зображень.

Вперше запропоновано аналітичну залежність для оцінювання невизначеності апроксимаційної моделі зміни температури з часом за результатами вимірюваної радіометричної інформації з інфрачервоних

тепловізійних відео шляхом врахування залишків моделі, що дає змогу підвищити достовірність оцінювання комбінованої стандартної невизначеності.

Отримала подальший розвиток математична модель, що описує фізичні закономірності теплоутворення та теплообміну в зоні різання шляхом введення коригувального коефіцієнту, який враховує вплив зміни форми стружки із зміною режиму різання та уточнює складові приросту температури для джерел тепла, що дозволяє здійснювати верифікацію результатів тепловізійного контролю теплових процесів зовнішнього точіння.

Отримали подальший розвиток підходи до оцінювання складових комбінованої невизначеності вимірювання температури при тепловізійному контролі методом статистичного аналізу, безпосередньо на основі аналізу ROI, реальних термограм з обробкою піксельних значень як множини експериментальних вимірювань та методом наближеного аналітичного представлення вимірювання температури для врахування внеску від впливу температури відбиття, яку визначено на основі моделі розподілу випромінювання між власною та відбитою складовими, що дозволяє оцінити вплив джерел невизначеності в умовах реального експерименту.

Практичне значення отриманих результатів – результати дисертаційного дослідження використано як складову держбюджетних науково-дослідних робіт, зокрема № 244-27 «Дослідження технічних систем і їх метрологічне забезпечення» (ДР № 0124U002860) та № 117-27 «Ресурсозберігаючі технології в машинобудуванні; технологічна динаміка металообробляння» (ДР № 0116U004530) та можуть бути використанні в якості рекомендацій при проведенні тепловізійних досліджень процесів різання. Отримані результати використовуються в навчальному процесі для підготовки здобувачів Національного університету «Одеська політехніка».

Ключові слова: тепловий стан процесу різання, температура, методи вимірювання температури, тепловізійний контроль, неруйнівний контроль, нейронна мережа, інформаційно-вимірювальна система, бінаризація, математична модель, верифікація, вимірювання, метрологічні характеристики, похибка,

невизначеність вимірювання, точність, термopара, радіометрична інформація, інфрачервоне випромінювання, випромінювальна здатність.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Список публікацій здобувача за темою дисертації, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Oborsky, G.A., **Goloborodko, V.V.**, Perperi, L.M. 2024. Implementation of the hybrid binarisation method for thermogram analysis. Proceedings of Odessa Polytechnic University. 2(70) (2024), 123–130. <https://doi.org/10.15276/opu.2.70.2024.14> (Реєстр наукових фахових видань України, **категорія Б**)
2. Oborskyi, G., Gugnin, V., Perperi, L., Goloborodko, G., **Goloborodko, V.** (2024). Evaluation of Dust Concentration Using Computer Measurement Technologies. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_50 (**Scopus**)
3. Gugnin, V., Perperi, L., Oborskyi, G., Goloborodko, G., **Goloborodko, V.** (2025). Development of a Simulator Program for Studying the Effect of Cutting Modes on Cutting Temperature. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G. (eds) Advanced Manufacturing Processes VI. Interpartner 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_25 (**Scopus**)
4. **Голобородько В.**, Перпері Л. Верифікація результатів тепловізійного контролю теплових процесів зовнішнього точіння на основі математичного моделювання теплового стану зони різання // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». – 2025. – № 2. – С. 142–150. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-82-19>. [ISSN 2219-9365](https://doi.org/10.31891/2219-9365) (Реєстр наукових фахових видань України, **категорія Б**)

Список публікацій здобувача за темою дисертації які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Н. Oborskyi, V. Gugnin, L. Perperi, G. Goloborodko, **V. Goloborodko**. Simulation modelling in the tasks of digital engineering in the creation of information-measuring systems. Proceedings of Odessa Polytechnic University, Issue 1(65), 2022. P. 129 – 136. URL: <https://doi.org/10.15276/opu.1.65.2022.15>

6. **Голобородько В.В.**, Оборський Г.О., Перпері Л.М. Цифрові трансформації Industry 4.0: виклики та можливості в сфері метрології / Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 6-7 грудня 2023 р., м. Одеса. – Одеса: 2023. – С. 64 – 65. <https://drive.google.com/file/d/1p8DLQpjO483tkaO55Px66qc01x74r-Jc/view>

7. **Голобородько В.В.**, Оборський Г.О., Перпері Л.М. Застосування тепловізора для вимірювання температури в зоні різання при токарній обробці / Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 11–12 грудня 2024 р., м. Одеса. – Одеса: 2024. – С. 188 – 190. <http://rp.onmu.org.ua/handle/123456789/4117>

8. Перпері Л.М., Голобородько Г.М., Гугнін В.П., **Голобородько В.В.** Застосування сучасних комп'ютерних технологій в підготовці здобувачів за інженерними спеціальностями / Всеукраїнський науково-педагогічний форум «Інноваційні технології в освіті», 21-22 жовтня 2024 р., м. Івано-Франківськ, ІФНУНГ (секція "Організація освітнього процесу із застосуванням сучасних технологій дистанційного, змішаного навчання і дуальної форми навчання"), С. 33-34. <https://drive.google.com/file/d/1W-WBi3HRAeexBl2kgewHx4y-3QcMiUHQ/view>

ABSTRACT

Goloborodko V.V. Development of an Information-Measuring System for thermal imaging control of the external turning process. – A qualification scientific work in manuscript form.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 15 – Automation and Instrumentation in the specialty 152 – Metrology and information and measuring technology. – Odesa Polytechnic National University, Odesa, 2025.

The dissertation addresses a pressing scientific and technical problem of measuring thermal state parameters in the cutting zone during external turning using an information-measurement system for thermal imaging control. To achieve this objective, the study analyses the fundamental principles of heat generation and heat transfer in the cutting process and conducts a comparative analysis of existing methods and tools for temperature measurement applicable to machining processes.

To enhance the informativeness and reliability of thermal imaging observations, an approach to modelling the thermal state of the cutting zone was developed based on the heat conduction equation, incorporating initial and boundary conditions. A simplified mathematical model is described for verifying experimental temperatures obtained through thermal imaging control.

Methods for evaluating the metrological characteristics of thermal imaging systems were defined, which include: determining the spatial and temperature resolution (thermal sensitivity), taking into account the characteristics of the field-of-view of the thermal imaging camera.

To improve the accuracy and reliability of the measurement results, the impact of the depression angle on the projections of the vertical and horizontal components of the field of view was assessed, taking into account the emissivity of the materials being machined.

An algorithm for recognising and automatically processing thermograms has been proposed, utilising a convolutional neural network based on the U-Net architecture. A supervised learning algorithm was employed to ensure high-quality training, while a

hybrid thermogram binarisation algorithm was developed to create masks for isolating cutting zones and generating a robust training dataset. Inference capabilities have been implemented to process additional thermograms using the pre-trained model.

In the introduction, a general overview of the work is provided, emphasizing its relevance, defining the aim and objectives, as well as specifying the object and subject of the dissertation research. The alignment with scientific research projects is also highlighted. The scientific novelty and practical significance of the obtained results, as well as the author's personal contribution, are formulated.

Chapter One provides a comprehensive review of the literature, which facilitated the analysis of heat exchange phenomena during cutting processes and the underlying regularities of heat generation. Various methods and instruments for temperature measurement are considered, with a comparative evaluation conducted to determine their applicability to cutting processes. Particular attention is given to the advantages of infrared thermographic techniques, which offer non-contact, non-intrusive temperature measurement without influencing the cutting operation or its environment. This approach does not require any modification to the geometry of the cutting tool or the workpiece and is suitable for both instantaneous temperature determination and continuous real-time thermal monitoring. The analysis highlights the necessity of accounting for the metrological performance of thermal imaging systems in measurement applications, as well as the challenges encountered during data acquisition and interpretation.

Chapter Two addresses the enhancement of the informativeness and reliability of infrared thermographic observations by establishing an approach to modelling the thermal state of the cutting zone based on the heat conduction equation, incorporating relevant initial and boundary conditions. A simplified mathematical model is proposed to verify the experimental temperature data obtained via infrared thermography. Methodologies for assessing the metrological characteristics of thermal imaging systems are defined, including the determination of spatial resolution and thermal sensitivity, taking into account the characteristics of the camera's field of view. A relationship is proposed for estimating the standard uncertainty of temperature variation over time, $T(t)$,

based on the standard deviation of the residuals of the approximated model, for temperature measurements acquired using infrared video cameras.

Chapter Three presents the analysis and selection of several binarisation algorithms for integration into a hybrid binarisation method. The architecture of a convolutional neural network was developed and implemented using the TensorFlow and Keras frameworks, enabling the realisation of the U-Net architecture – one of the state-of-the-art solutions for recognising frames with atypical structures and detecting objects of research interest.

Chapter Four is dedicated to the processing of experimental results obtained using various models of thermal imaging devices. The measurement uncertainties associated with infrared thermography were evaluated for both a handheld infrared camera and a thermal video camera. The outputs of the artificial neural network were analysed through the processing of thermal video recordings acquired from a FLIR P640 camera, with verification performed based on the actual characteristics observed in the thermograms.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

For the first time, the neural network model has been proposed for the intelligent analysis of thermographic images in the cutting zone. This model aims to automatically detect thermal anomalies and enhance the reliability of thermal process control in cutting operations. It employs a convolutional neural network with the U-Net architecture, trained on combined experimental and model data. The model demonstrates high sensitivity and supports adaptive interpretation of thermal maps in real time under dynamic cutting conditions. This approach offers significant advantages over existing methods based on threshold filtering or manual interpretation of thermographic images.

For the first time, the analytical dependency has been proposed to assess the uncertainty of the approximation model describing temperature changes over time based on radiometric information obtained from infrared thermographic video data. This approach incorporates model residuals, enabling an improvement in the reliability of evaluating the combined standard uncertainty.

The mathematical model describing the physical patterns of heat generation and transfer in the cutting zone has been further developed by introducing a corrective

coefficient. This coefficient accounts for the influence of changes in chip shape with varying cutting modes and refines the components of temperature increase for heat sources. This enhancement enables the verification of thermographic monitoring results for thermal processes during external turning.

Approaches to assessing the components of combined uncertainty in temperature measurement during thermographic monitoring have been further developed. These approaches employ statistical analysis directly based on the analysis of ROI and real thermograms, treating pixel values as a set of experimental measurements. Additionally, an approximate analytical representation method for temperature measurement has been introduced to account for the contribution of reflection temperature. This reflection temperature is determined using a model of radiation distribution between the inherent and reflected components. These advancements enable the evaluation of uncertainty sources under real experimental conditions.

The practical significance of the obtained results lies in their application as part of state-funded research projects, including №244-27 “Investigation of Technical Systems and Their Metrological Support” (SR №0124U002860) and №117-27 “Resource-Saving Technologies in Mechanical Engineering; Technological Dynamics of Metalworking” (SR №0116U004530). These results can be utilised as guidelines for conducting thermal imaging studies of cutting processes. Furthermore, the findings are incorporated into the educational process for training students at the Odesa Polytechnic National University.

Keywords: thermal state of the cutting process, temperature, temperature measurement methods, thermal imaging control, non-destructive testing, artificial neural network, information-measurement system, binarisation, inference, Convolutional Neural Networks (CNN), U-Net, mathematical model, verification, measurement, metrological characteristics, error, measurement uncertainty, accuracy, thermocouple, radiometric information, infrared radiation, emissivity.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE ACQUIRER

List of publications by the candidate on the dissertation topic, presenting the main scientific results:

1. Oborsky, G.A., **Goloborodko V.**, Perperi L.M. 2024. Implementation of the hybrid binarisation method for thermogram analysis. Proceedings of Odessa Polytechnic University. 2(70) (2024), 123–130. <https://doi.org/10.15276/opu.2.70.2024.14> (Ukrainian Scientific Journals Register, **Category B**)
2. Oborskyi, G., Gugin, V., Perperi, L., Goloborodko, G., **Goloborodko, V.** (2024). Evaluation of Dust Concentration Using Computer Measurement Technologies. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_50 (Scopus)
3. Gugin, V., Perperi, L., Oborskyi, G., Goloborodko, G., **Goloborodko, V.** (2025). Development of a Simulator Program for Studying the Effect of Cutting Modes on Cutting Temperature. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G. (eds) Advanced Manufacturing Processes VI. Interpartner 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_25 (Scopus)
4. **Goloborodko V.**, Perperi L. Verification of thermographic monitoring results of external turning thermal processes based on mathematical modelling of the thermal state in the cutting zone // International Scientific-technical journal «Measuring and computing devices in technological processes». – 2025. – Issue 2. – P. 142–150. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-82-19>. ISSN 2219-9365 (Ukrainian Scientific Journals Register, **Category B**)

List of publications confirming the presentation of dissertation materials:

5. H. Oborskyi, V. Gugin, L. Perperi, G. Goloborodko, **V. Goloborodko.** Simulation modelling in the tasks of digital engineering in the creation of information-

measuring systems. Proceedings of Odessa Polytechnic University, Issue 1(65), 2022. P. 129 – 136. URL: <https://doi.org/10.15276/opu.1.65.2022.15>

6. **Goloborodko, V.**, Oborsky, G., Perperi, L. (2023). Digital Transformations of Industry 4.0: Challenges and Opportunities in Metrology. New and Unconventional Technologies in Resource and Energy Conservation: Materials of the International Scientific-Technical Conference, December 6 – 7, Odesa, P. 64 – 65. <https://drive.google.com/file/d/1p8DLQpjO483tkaO55Px66qc01x74r-Jc/view>

7. **Goloborodko, V.**, Oborsky, G., Perperi, L. Application of a Thermal Imager for Measuring Temperature in the Cutting Zone during Lathe Machining. New and Unconventional Technologies in Resource and Energy Conservation: Materials of the International Scientific-Technical Conference, December 11 – 12, Odesa, P. 188 – 190. <http://rp.onmu.org.ua/handle/123456789/4117>

8. Perperi, L., Goloborodko, G., Gugnin, V., **Goloborodko, V.** Application of Modern Computer Technologies in Training Engineering Students. All-Ukrainian Scientific-Pedagogical Forum “Innovative Technologies in Education” October 21 – 22, Ivano-Frankivsk, P. 33 – 34. <https://drive.google.com/file/d/1W-WBi3HRaexBl2kgewHx4y-3QcMiUHQ/view>

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	17
ВСТУП.....	19
1 АНАЛІЗ КОНТРОЛЮ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ЗОНІ РІЗАННЯ ПРИ ТОЧІННІ.....	26
1.1 Передача тепла: випромінювання, теплопровідність, конвекція у контексті процесів різання	26
1.2 Аналіз існуючих методів вимірювання температури різання.....	28
1.3 Фізичні основи тепловізійного контролю технологічних процесів.....	37
1.3.1 Закон Кірхгофа	37
1.3.2 Залежність інтенсивності випромінювання від температури тіла (закон Стефана–Больцмана)	39
1.3.3 Закон Планка	40
1.3.4 Закон зміщення Віна.....	41
1.4 Класифікація тепловізорів.....	42
1.5 Принцип роботи тепловізора з неохолоджуваним мікроболометром.....	46
1.6 Аналіз впливу характеристик тепловізорів на вимірювання температури	48
Висновки до розділу 1	54
2 МЕТОДОЛОГІЯ ТА ЗАСОБИ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ У ЗОНІ РІЗАННЯ	55
2.1 Математична модель теплового стану процесу різання як інструмент верифікації результатів тепловізійного контролю	55
2.2 Розробка програми-тренажеру для вивчення впливу режимів різання на температуру різання.....	66
2.3 Методики оцінювання метрологічних характеристик тепловізійного контролю	72
2.3.1 Просторова роздільна здатність та поле зору	76
2.3.2 Теплова чутливість тепловізора NETD	81

2.4 Методика оцінювання невизначеності вимірювання температури методу інфрачервоної термографії на прикладі тепловізійного контролю процесу точіння	86
Висновки до розділу 2	92
3 МЕТОДИ ОБРОБКИ ТЕРМОГРАМ У ЗАДАЧАХ ВИЗНАЧЕННЯ	
ТЕМПЕРАТУР ЩО ВИНΙΚАЮТЬ В ЗОНІ РІЗАННЯ.....	94
3.1 Структура розробки програмного забезпечення для реалізації аналізу термограм.....	94
3.2 Аналіз методів бінаризації тепловізійних зображень	99
3.3 Перетворення кадрів термограм на монохромне зображення.....	104
3.4 Аналіз нейронних мереж.....	107
3.5 Реалізація бінаризації.....	109
3.6 Накладання масок на кадри.....	112
3.7 Складання нейронної мережі	113
3.8 Навчання запропонованої нейронної мережі для обробки термограм....	116
Висновки до розділу 3	119
4 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ	
ДОСЛІДЖЕНЬ.....	121
4.1 Верифікація результатів тепловізійного контролю теплових процесів на основі математичного моделювання теплового стану зони різання.....	121
4.1.1 На прикладі застосування тепловізора UTi720E	121
4.1.2 На прикладі застосування тепловізора FLIR E8	125
4.2 Результати застосування методик визначення метрологічних характеристик тепловізійного контролю на основі експериментальних досліджень	132
4.3 Оцінювання невизначеності вимірювання температури методу інфрачервоної термографії на прикладі тепловізійного контролю	138
4.4 Верифікація передбачених нейронною мережею показників	141
Висновки до розділу 4	145

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	147
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	149
ДОДАТОК А. ДОКУМЕНТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	160
ДОДАТОК Б. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА.....	163

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

ДСТУ – Державний стандарт України;

ЗВТ – засіб вимірювальної техніки;

ІЧ – інфрачервоний;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПК – персональний комп'ютер;

ШІ – штучний інтелект;

ШНМ – штучна нейронна мережа;

API – прикладний програмний інтерфейс, який дозволяє програмам обмінюватися даними та функціональністю, не розкриваючи внутрішню структуру один одного;

CNN – згорткові нейронні мережі;

CPU – Центральний процесор ПК;

CUDA – архітектура спеціалізованих ядер процесорів для взаємодії з нейронними мережами;

FNN – прямі нейронні мережі

FOV – Field of View (поле зору або кутовий розмір поля сцени);

GAN – Generative Adversarial Network (Генеративно-змагальна мережа);

GPU – графічні процесори;

HFOV – Horizontal Field of View (горизонтальне поле зору або кутовий розмір сцени по горизонталі);

Ifov – Instantaneous Field of View (миттєве поле зору або кутовий розмір одного пікселя);

ISO – International Organization for Standardization (Міжнародна організація з стандартизації);

LWIR – довгохвильовий діапазон ІЧ випромінювання;

MRTD – мінімальна роздільна різниця температур;

MWIR – середньохвильовий діапазон ІЧ-випромінювання;

NETD – Noise Equivalent Temperature Difference (різниця температур еквівалентна шуму);

RGB – стандарт передачі кольорів у трьох каналному форматі Червоний, Зелений та Синій;

RNN – рекурентна нейронна мережа;

ROI – Region Of Interest (область аналізу);

SWIR – короткохвильовий діапазон ІЧ випромінювання;

TPU – тензорні процесори призначені для роботи тільки з ШІ;

VFOV – Vertical Field of View (вертикальне поле зору або кутовий розмір сцени по вертикалі).

ВСТУП

Актуальність роботи. Вивчення теплових зон контакту різального інструменту з поверхнею обробки заготовки процесів механічної обробки є актуальною темою і сьогодні, що підтверджено великою кількістю проведених досліджень в цьому напрямку. Температура впливає на знос інструменту, якість оброблюваної поверхні, в тому числі висока температура може впливати на мікроструктуру оброблюваного матеріалу, викликаючи напруження в поверхневих шарах або тріщини. Відомо, що на температуру в процесі різання впливає твердість оброблюваного матеріалу, режим різання та застосування мастильно-охолоджувальних технологічних середовищ. Безумовно, необхідно враховувати фактори що безпосередньо впливають на сам процес різання, але необхідно враховувати і те що з розвитком техніки та технологій змінюються підходи до проведення досліджень із застосуванням сучасних засобів вимірювальної техніки для контролю температури. Контроль температури різання дозволяє підібрати оптимальні режими різання, запобігаючи перегріву інструменту, підвищити його стійкість, а також підвищити точність та якість виготовлення деталей. Керування температурним режимом допоможе заощадити на енергоспоживанні, витратах на інструменти та матеріали. Останнім часом, дослідники з питань вивчення теплових процесів механообробки, приділяють увагу безконтактним тепловізійним методам контролю, які дозволяють оперативно оцінювати розподіл температур на поверхні різального інструменту та заготовки.

Актуальним є вивчення особливостей проведення термографічних досліджень процесу механічної обробки на прикладі точіння, визначення послідовності етапів для методики вимірювань та умов їх проведення для отримання достовірної експериментальної інформації. Також слід відмітити, що особливий інтерес в цій області викликає застосування засобів вимірювання не тільки під час контролю технологічних процесів в статичних умовах, а й в режимі

реального часу для оптимізації цих процесів тобто в умовах нестационарності контрольованого теплового процесу.

Для реалізації завдань стійкого розвитку в рамках концепції «Індустрія 4.0» даний метод контролю може бути використаний для оптимізації технологічних процесів і забезпечення випуску якісних виробів на ринок з урахуванням раціонального використання ресурсів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота пов'язана з науково-дослідними роботами кафедри цифрових технологій в інжинірингу Національного університету «Одеська політехніка», а саме № 244-27 «Дослідження технічних систем і їх метрологічне забезпечення» (ДР № 0124U002860) та № 117-27 «Ресурсозберігаючі технології в машинобудуванні; технологічна динаміка металообробляння» (ДР № 0116U004530).

Метою даної роботи – розробка інформаційно-вимірювальної системи тепловізійного контролю теплового стану процесу зовнішнього точіння шляхом створення програмного забезпечення з інтеграцією згорткових нейронних мереж для автоматизації аналізу отриманих даних вимірювань з урахуванням оцінювання метрологічних характеристик для отримання достовірної експериментальної інформації.

Для досягнення поставленої мети в роботі поставлено та розв'язано **наступні задачі:**

- проаналізовано джерела виділення теплоти в процесі різання та існуючі системи контролю теплового стану, виявлено фактори, що впливають на ефективність використання методів та їх метрологічні характеристики;
- визначено математичну модель теплового стану об'єкту дослідження при тепловізійному контролі;
- визначено характеристики, що впливають на процеси вимірювання та контролю теплового стану, такі як: відстань до об'єкту дослідження та кут спостережень, роздільна здатність та поле зору тепловізорів, випромінювальна здатність оброблюваних матеріалів;

- визначено методологію та підходи проведення експериментальних досліджень теплового стану процесу різання механічної обробки із застосуванням тепловізійного контролю;
- визначено ключові аспекти розробки інформаційно-виміральної системи тепловізійного контролю та обґрунтовано вибір нейромережевої моделі;
- проаналізовано метрологічні характеристики розробленої інформаційно-виміральної системи тепловізійного контролю;
- наведено ґрунтовний аналіз складових невизначеності вимірювань при проведенні тепловізійних досліджень;
- проведено практичну апробацію методики використання розробленої інформаційно-виміральної системи тепловізійного контролю.

Наукова новизна отриманих результатів, які виносяться на захист, полягає в наступному.

Вперше запропонована нейромережева модель для інтелектуального аналізу тепловізійних зображень зони різання з метою автоматичного виявлення теплових аномалій та підвищення надійності управління тепловим процесом різання за рахунок використання згорткової нейронної мережі з архітектурою U-Net, що навчається на комбінованих експериментальних і модельних даних, і характеризується високою чутливістю, а також можливістю адаптивної інтерпретації теплових карт в реальному часі при мінливих умовах різання, що вигідно відрізняє її від існуючих методів аналізу, заснованих на пороговій фільтрації або ручній інтерпретації тепловізійних зображень.

Вперше запропоновано аналітичну залежність для оцінювання невизначеності апроксимаційної моделі зміни температури з часом за результатами вимірюваної радіометричної інформації з інфрачервоних тепловізійних відео шляхом врахування залишків моделі, що дає змогу підвищити достовірність оцінювання комбінованої стандартної невизначеності.

Отримала подальший розвиток математична модель, що описує фізичні закономірності теплоутворення та теплообміну в зоні різання шляхом введення коригувального коефіцієнту, який враховує вплив зміни форми стружки із зміною

режиму різання та уточнює складові приросту температури для джерел тепла, що дозволяє здійснювати верифікацію результатів тепловізійного контролю теплових процесів зовнішнього точіння.

Отримали подальший розвиток підходи до оцінювання складових комбінованої невизначеності вимірювання температури при тепловізійному контролі методом статистичного аналізу, безпосередньо на основі аналізу ROI, реальних термограм з обробкою піксельних значень як множини експериментальних вимірювань та методом наближеного аналітичного представлення вимірювання температури для врахування внеску від впливу температури відбиття, яку визначено на основі моделі розподілу випромінювання між власною та відбитою складовими, що дозволяє оцінити вплив джерел невизначеності в умовах реального експерименту.

Об'єктом дослідження – процес вимірювання параметрів теплового стану що виникає при зовнішньому точінні з використанням тепловізійних камер.

Предмет дослідження – методи і засоби вимірювання теплового стану процесу різання з використанням тепловізійних камер.

Методи та засоби дослідження. У даній дисертаційній роботі для вирішення поставлених задач використовувалися теоретичні та експериментальні методи дослідження на базі:

- теорії різання матеріалів та основних положень математичного моделювання для аналізу та визначення математичної моделі теплового стану об'єкту дослідження при тепловізійному контролі;

- методів математичної статистики для аналізу та обробки отриманих експериментальних результатів досліджень;

- теорії математичного та обчислювального моделювання, теорії алгоритмів та використанні основних положень методів бінаризації з використанням мови програмування Python 3 та фреймворку OpenCV для подальшого аналізу зображень та відео за допомогою нейромережевих технологій;

- методів та засобів при розробці інформаційно-вимірювальної системи, зокрема: з використанням бібліотек обробки зображень, інтерфейсів для роботи з

радіометричними файлами, алгоритмів автоматизованого аналізу температурних полів;

- теоретичних методів, що базуються на теорії вимірювань та оцінці невизначеності вимірювань для оцінювання точності методу тепловізійних досліджень.

Практичне значення отриманих результатів. Запропоновані науково-технічні рішення дозволяють підвищити точність аналізу температурних характеристик теплового стану процесу зовнішнього точіння при проведенні безконтактних вимірювань з використанням інформаційно-вимірювальних систем тепловізійного контролю. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення систем керування технологічними процесами обробки матеріалів у режимі реального часу. Напрацьовані положення можуть слугувати основою для створення рекомендацій з проведення та оцінювання точності термографічних досліджень у галузі обробки матеріалів різанням. Результати впроваджено у навчальний процес підготовки здобувачів з метрології та інформаційно-вимірювальних технологій, а також можуть бути використані на підприємствах машинобудівної галузі та для підготовки фахівців в сфері механічної інженерії та технічної діагностики.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати, положення, висновки та рекомендації, викладені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем самостійно. Автору належать основні ідеї, пов'язані з: розробкою інформаційно-вимірювальної системи тепловізійного контролю процесу зовнішнього точіння, складання математичної моделі теплового стану об'єкта, а також розробкою підходів до врахування метрологічних характеристик, що впливають на точність температурних вимірювань. Здобувачем самостійно сформовано наукову концепцію дослідження, запропоновано відповідні математичні моделі, структуру та алгоритми функціонування інформаційно-вимірювальної системи, обґрунтовано доцільність використання нейромережевих технологій для аналізу термограм, а також проведено моделювання, експериментальні дослідження та верифікацію отриманих результатів.

У наукових публікаціях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать такі основні результати:

- постановка наукових завдань і формулювання цілей дослідження [1-4];
- проведення теоретичного аналізу літературних джерел та визначення підходів до проведення термографічних досліджень теплового стану процесів різання [1, 2, 4];
- опис спрощеної математичної моделі теплових процесів зовнішнього точіння та проведення верифікації результатів тепловізійних досліджень з використанням тепловізійної камери [4];
- визначення впливу параметрів режимів різання на теплоутворення в зоні контакту різального інструменту із заготовкою за допомогою створеного програмного тренажеру за результатами опрацювання експериментальних даних отриманих методом вимірювання температури термопарами [3, 7];
- обґрунтовано вибір та реалізовано метод бінаризації термограм для автоматизованого виділення зони різання [1];
- планування та виконання експериментальних досліджень, обробка експериментальних даних [1-7];
- формулювання висновків і підготовка основного тексту публікацій [1-8].

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися на Міжнародних науково-технічних конференціях та Всеукраїнському форумі, зокрема:

- Нові та нетрадиційні ресурсо- та енергозберігаючі технології, грудень 2023 р., м. Одеса;
- 5th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner 2023), вересень 2023 р., м. Одеса;
- 6th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner 2024), вересень 2024 р., м. Одеса;
- Всеукраїнський науково-педагогічний форум «Інноваційні технології в освіті», жовтень 2024 р., м. Івано-Франківськ;

- Нові та нетрадиційні ресурсо- та енергозберігаючі технології, грудень 2024 р., м. Одеса;

- International Conference on Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems (SIEMS-2025) SIEMS-2025, травень 2025 р., м. Запоріжжя.

Окремі результати були впроваджені у навчальний процес, що підтверджено відповідним документом про впровадження результатів дослідження.

Публікації. Результати наукових досліджень опубліковані у 8 друкованих працях, з них 4 – у спеціалізованих наукових виданнях (2 публікації – у міжнародній науково метричній базі SCOPUS, 2 публікації – у наукових фахових виданнях України, категорії «Б»), 1 публікація апробаційного характеру та 3 – тези доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях та всеукраїнському форумі.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 97 найменувань та 2 додатків. Загальний обсяг роботи становить 165 сторінок (з них 131 – основного тексту). Робота також містить 34 рисунка та 15 таблиць.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМ КОНТРОЛЮ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ЗОНІ РІЗАННЯ ПРИ ТОЧІННІ

1.1 Передача тепла: випромінювання, теплопровідність, конвекція у контексті процесів різання

Перший описаний в літературі метод вимірювання температури різання належить Бенджаміну Томпсону (більш відомому як граф Румфорд), який в 1799 році при свердлінні латунних гармат занурив заготовку, свердло та стружку у відому кількість води та вимірював підвищення температури. Ці експерименти фактично створили нову концепцію про природу теплової енергії. І лише у 20-х роках минулого століття, майже одночасно, у Німеччині (Готвейн), Великобританії (Герберт), США (Шор) запропонували методи вимірювання середньої температури різального інструменту за допомогою термопари [1].

Відомо, що джерелом виділення теплоти є механічна робота. Так само і при обробці матеріалів різанням тепло є результатом здійснення роботи затрачуваної на зрізання поверхневого шару та перетворення його у стружку. Для визначення теплового балансу процесу різання при точінні необхідно описати теплові явища, які виникають в процесі різання та саме вони визначають температуру в зоні різання. На рисунку 1.1 схематично представлено тепловий стан технологічної підсистеми різання, опрацьований на основі [2 – 5].

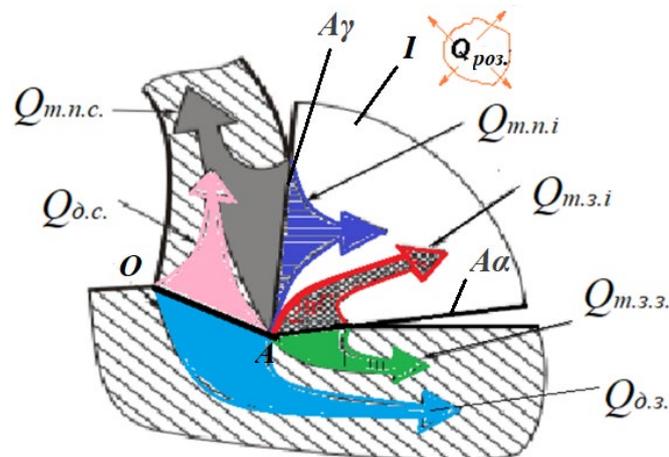


Рис. 1.1 – Теплові потоки у зоні різання

Механічна робота здійснюється в зонах первинної деформації (умовній площині зсуву OA) та зонах тертя по передній A_γ та задній A_α поверхням різального інструменту I . При різанні спостерігається складне переплетення теплових потоків між заготовкою, інструментом, стружкою та навколишнім середовищем.

Теплообмін між твердими тілами які перебувають у контакті (стружкою, інструментом, заготовкою) протікає, в основному, теплопровідністю [6]. До навколишнього середовища тепловіддача здійснюється конвекцією та випромінюванням, при чому при більших температурах переважає випромінювання. Для спрощеного запису рівняння теплового балансу можна зробити наступні умовні припущення: розподіливши потоки тепла наступним чином [2, 4, 5]:

$$Q = Q_{д.} + Q_{т.п.} + Q_{т.з.} = Q_{с.} + Q_{і.} + Q_{з.} + Q_{роз.}, \quad (1.1)$$

де $Q_{д.}$ – кількість теплоти що виділилася в зоні деформування;

$Q_{т.п.}$ – кількість теплоти що виділилася від роботи затрачуваної на подолання сил тертя стружки по передній поверхні інструменту;

$Q_{т.з.}$ – кількість теплоти що виділилася від роботи затрачуваної на подолання сил тертя між задньою поверхнею інструмента та заготовки;

$Q_{с.}$ – кількість теплоти що виноситься із зони тепловиделення стружкою;

$Q_{і.}$ – кількість теплоти що розповсюджується у тіло інструменту;

$Q_{з.}$ – кількість теплоти що розповсюджується у тіло заготовки;

$Q_{роз.}$ – кількість теплоти що розсіюється у навколишнє середовище.

При чому слід зазначити, умовно, тепло виділене в зоні деформації стружки розповсюджується і у стружку $Q_{д.с.}$ і у заготовку $Q_{д.з.}$, а тепло виділене в зоні тертя стружки по передній поверхні розповсюджується у тіло інструмента $Q_{т.п.і.}$ і стружку $Q_{т.п.с.}$, а тепло утворене в зоні тертя по задній поверхні – в тіло інструменту $Q_{т.з.і.}$ та заготовки $Q_{т.з.з.}$.

Експериментально встановлено, що при обробці звичайних конструкційних сталей тепло відводиться із зони різання стружкою у відсотковій кількості 25 – 85 % від всього виділеного тепла, заготовкою поглинається 10 – 50% , інструментом 2 – 8 % та розсіюється у навколишнє середовище до 2 %. Теплота яку отримують елементи технологічної системи (інструмент та заготовка) формує температурне поле цих елементів. На тепловиділення в зоні обробки впливають рід та механічні властивості матеріалу заготовки, елементи режиму різання, застосування мастильно-охолоджувальних технологічних середовищ (МОТС) та ступінь зношення різального інструменту [2, 4, 5].

1.2 Методи вимірювання температури різання

Велика кількість досліджень відомих вчених здавна була присвячена вивченню питань оцінювання кількості тепла, яке виникає внаслідок механічної обробки різних матеріалів [1 – 5]. Відомо, що теплові явища, що виникають у процесі різання визначають температуру в зоні різання, яка впливає на характер пластичної деформації, утворення стружки, наріст, усадку стружки, сили різання та мікроструктуру поверхневого шару оброблюваної деталі [1, 4]. Про ще більший вплив температури різання на інтенсивність зношування та стійкість інструменту зазначено в роботах багатьох дослідників процесу різання [5 ,7, 8]. З цього випливає неабиякій вплив температури різання на якість готової продукції та забезпечення конкурентоспроможності в умовах економії витрат на різальний та оброблюваний матеріали.

Дослідження [10] ґрунтується на застосуванні двох підходів – експериментального для вимірювання температури та моделювання, засноване на нефакторних та багатофакторних випробуваннях, що дозволило інтегрувати температуру різання до розрахунку стійкості інструменту. В роботі [7] проведено аналіз застосування різних методів вимірювання температури з змінними умовами різання та підкреслено, що найкраща методика для вимірювання – метод вимірювання з використанням термопар. Робота [8] присвячена дослідженню

вимірювання температури різання сталі AISI 1045 методом вбудованої термопари та інфрачервоною камерою.

Автори робіт [10, 11] зробили ґрунтовний аналіз існуючих методів вимірювання температури, в тому числі, сучасних за допомогою інфрачервоних технологій.

Зробивши аналіз сучасної літератури можна зазначити, що температура різання це скалярне поле, яке змінюється в системі і його не можливо однозначно описати значенням, на відміну від сили різання, яка є векторною величиною, яку можливо описати трьома координатами. Тому розроблено багато методів для вимірювання температури в зоні різання, які засновані на різних фізичних принципах, причому частина з них дає лише обмежену інформацію про розподіл температури.

Існує безліч методів визначення температури в зоні різання, більшість з яких відносяться до контактних методів вимірювання, які часто потребують додаткової зміни конструкції різального інструменту, наприклад, просвердлювання отворів для розміщення в ньому термопари [2, 5].

Засоби вимірювання температури класифікують в залежності від природи вимірювального сигналу, в який перетворюється температура. Так можна виділити дві групи методів вимірювання контактні та безконтактні. Класифікацію методів та засобів вимірювання температури запропоновану вченими «Одеської політехніки» наведено на рисунку 1.2 [5].

До контактних методів відносяться методи коли датчик температури та досліджуваний об'єкт знаходяться в безпосередньому контакті. Із вище наведених засобів та методів не всі можливо застосувати під час різання. Найпоширенішими контактними методами вимірювання температури в зоні різання є термопари різного конструктивного виконання. Принцип дії у цих датчиках полягає у тому що термоелектрорушійна сила (ТЕРС) однозначно пов'язана із різницею температур робочого та вільних спаїв та завдяки відомої залежності $TEPC - ^\circ C$, яка є стандартною характеристикою термопари [5].

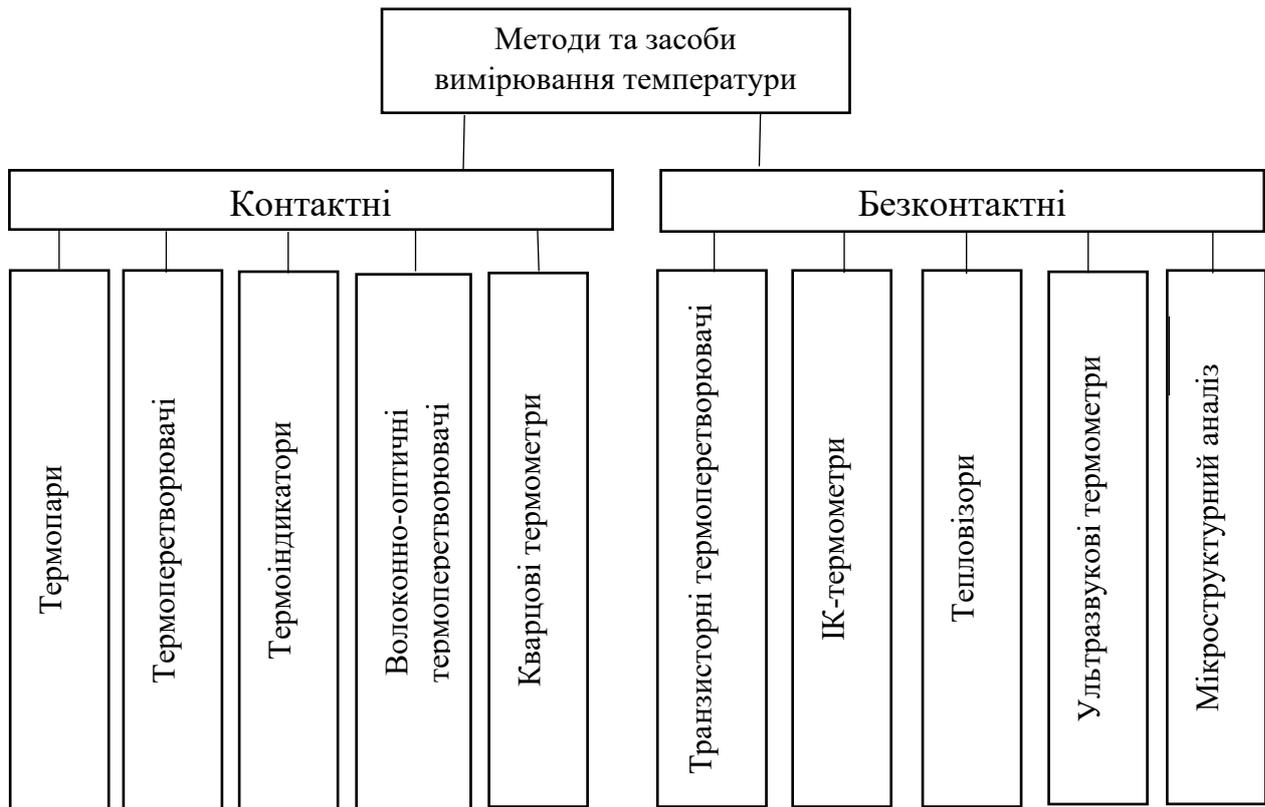
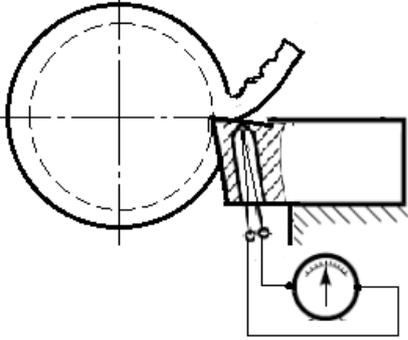
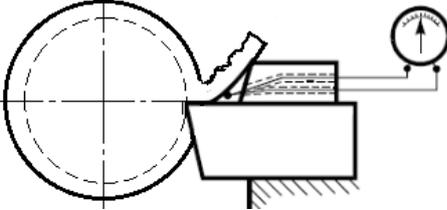
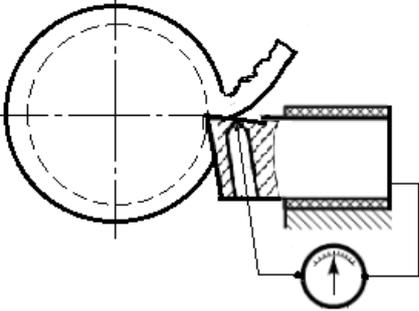


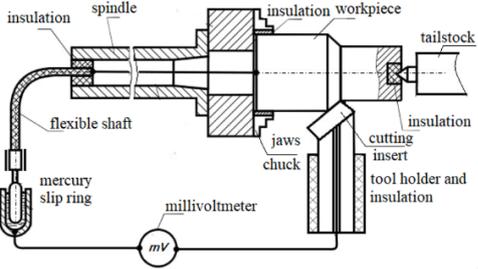
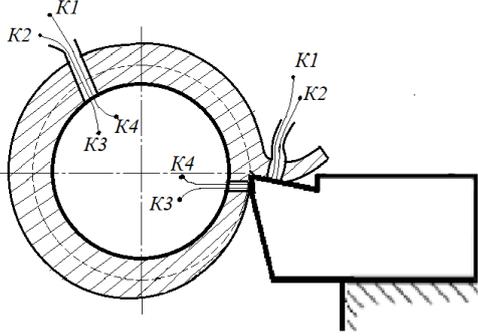
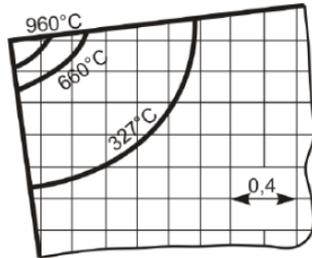
Рисунок 1.2 – Класифікація методів та засобів вимірювання температури

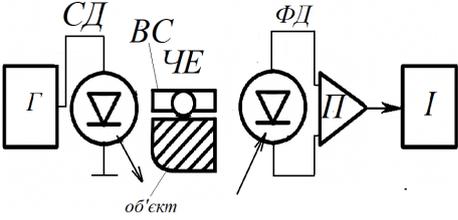
Даний метод дозволяє отримати середні значення температури по всій довжині контакту різальної кромки і заготовки, хоча зазначені і труднощі з розміщення термопари у безпосередній близькості до зони контакту. Також слід відмітити й простоту застосування методів теплового бачення, що не заважає процесу різання. та перспективність застосування аналітичних методів, заснованих на математичному або фізичному моделюванні із застосуваннях комп'ютерних програмних середовищ.

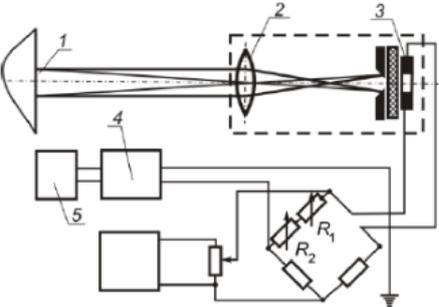
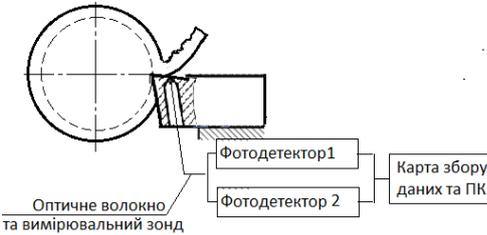
Для оцінки методів по технічним, економічним та експлуатаційним параметрам, співставлення переваг й недоліків, вартості та спрощення вибору методу для вирішення конкретної задачі визначення температури різання для операцій обточування у таблиці 1.1 наведено порівняльну характеристику методів вимірювання температури в зоні різання.

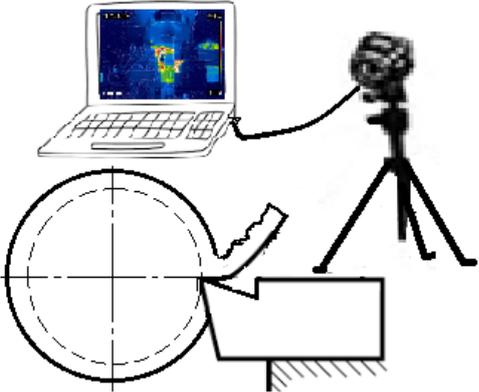
Таблиця 1.1 – Порівняння методів вимірювання температури різання

Метод вимірювання, коротка характеристика	Схема вимірювання	Переваги та недоліки
1	2	3
Контактні методи		
<p>Метод штучної термопари дозволяє визначити температуру різних точок на передній та задній поверхнях інструменту.</p>		<p>Низька вартість, добра відтворюваність залежності ТЕРС від температури, стабільність параметрів. Але складна конструкція пристрою та неможливість визначити дійсну температуру контакту, непостійність показників через знос перемички, що відокремлює термопару від поверхні контакту.</p>
<p>Метод ковзаючої по прирізцевому боку стружки термопари</p>		<p>Низька вартість, добра відтворюваність залежності ТЕРС від температури, більш точні значення отримуваних температур. Але постійний контакт з гарячою поверхнею швидко руйнує термопару. Низька точність через віддаленість вимірювання від зони контакту.</p>
<p>Метод напівштучних термопар. В якості одного з провідників застосовують або інструмент або заготовку</p>		<p>Низька вартість, більш точні значення отримуваних температур. Але недоліком є відсутність стандартних залежностей ТЕРС – °С для оброблюваного або інструментального матеріалів та неможливість оцінки впливу елементів режиму різання на найвищу температуру різання.</p>
<p>Метод природної термопари Термопару утворюють інструмент та заготовка, в зоні контакту яких виникає робочий спай,</p>		<p>Низька вартість, дає змогу визначити середню температуру різання по контактних поверхнях інструменту. Недоліком є відсутність стандартних</p>

<p>1</p> <p>обумовлений самим процесом різання.</p>	<p>2</p> 	<p>3</p> <p>залежностей ТЕРС - °С для оброблюваного та інструментального матеріалів та необхідність отримання тарувальних графіків для конкретних пар матеріалів заготовка-різальний інструмент.</p>
<p>Перерізувані термопари (за А.М. Резніковим). У поверхневому шарі заготовки заздалегідь розміщують трубки з ізовольованими провідниками емаллю, розімкненими до початку різання. В процесі різання в момент перерізання термо-електродів утворюється дві термопари через замикання провідників на контактній поверхні стружки та поверхні різання. Виникає ТРС (напруга) пропорційна температурі в зоні різання.</p>		<p>Помірно дорогий порівняно з термопарою, вбудованою в інструмент. Висока точність локального вимірювання безпосередньо в зоні різання. Підходить для дослідницьких цілей та калібрування інших методів. Але складний у виготовленні заготовки з вбудованими термопарами, непридатен для безперервного моніторингу температури, трудомісткий при багаторазових вимірюваннях через необхідність заміни термопар та заготовок.</p>
<p>Термоіндикаторні методи. Застосовують індикатори: хімічні, рідкокристалічні, люмінесцентні та плавлення. Метод плавких плівок: на поверхню інструменту наносять тонкі шари (плівки) різних матеріалів з відомою температурою плавлення (Sn, Pb, Zn, Al та ін.), які обираються в залежності від діапазону очікуваних температур різання. В процесі різання плівки починають плавитися. Візуально можна визначити інтервали</p>		<p>Простота методу, додатково не потребує складної апаратури. Та дає можливість візуально оцінити температуру. Але підходить лише для разових вимірювань та дає лише інтервали температур, тому є неточним. Може бути застосованим з навчальною метою, а також для орієнтовного калібрування інших датчиків, або у дослідженнях які не потребують високої точності.</p>

1	2	3
<p>температур в залежності від того які півки розплавлялися.</p>		
<p>Волоконно-оптичні термоперетворювачі використовують коли неможливо застосувати термопари, або індикаторні датчики, переважно у важкодоступних місцях (наприклад, свердління). Полягає у передачі теплового випромінювання через оптичне волокно до чутливого елемента (пірометра або спектрометра). Інфрачервоне випромінювання, що утворюється внаслідок тертя та деформування металу заготовки в зоні контакту з різальним інструментом уловлюється волокном.</p>	 <p>Г – генератор імпульсів СД – світлодіод ВС – волоконний світловод ЧЕ – чутливий елемент ФД – фотодіод П – підсилювач І – індикатор</p>	<p>Забезпечують високу точність вимірювання, особливо при калібруванні. До переваг також можна віднести мініатюрність та можливість здійснювати вимірювання в реальному часі й стійкість до електромагнітних перешкод. Але потребують оптики високої прозорості та складного настроювання. Можливість швидкого забруднення і навіть пошкодження волокна при потраплянні стружки або пилу. Також слід відмітити більшу вартість в порівнянні з термопарами.</p>
<p>Безконтактні методи</p>		
<p>Транзисторні датчики (термоперетворювачі) особливо на основі кремнієвих транзисторів можуть бути застосовані для визначення температури в зоні різання але лише для визначення температури інструменту, для визначення температури в зоні різання та стружки не використовують. Слід відмітити що транзисторні датчики можуть виконувати роль приймача випромінювання у пристроях при безконтактних методах</p>		<p>Використовують в лабораторних умовах для досліджень на моделях. Обмеження застосування через високі температури, що виникають під час різання, що призводить до виходу з ладу вже при температурах 150 °С, а також стружка, вібрації та удари швидко руйнують хлипкі елементи. Низька швидкість відклику. Транзисторні ланцюги чутливі до завад, тому потребують екранування. До переваг можна віднести дешевизну.</p>

1	2	3
<p>вимірювання температури</p> <p>Інфрачервоні перетворювачі температури: фотоелектричний пірометр для виміру температури заготовки, інструменту та стружки принцип дії якого полягає у перетворенні енергії випромінювання об'єкта на електричний сигнал. Випромінювання з нагрітої ділянки 1 за допомогою лінз 2 спрямовується на фотоелемент 3. В результаті у фотоелементі виникає струм, що проходить через підсилювач 4 і реєструється пірометром 5.</p>		<p>Безконтактне вимірювання, яке не впливає на процес різання та конструкції заготовки та інструменту; висока швидкодія. Але до недоліків можна віднести залежність від емісійної здатності поверхні, тобто через блискучий метал можуть бути похибки вимірювання. А також залежність точності вимірювання від умов навколишнього середовища (пил, дим) та обмежене поле зору.</p>
<p>Двоколірний волоконно-оптичний пірометр ближнього інфрачервоного діапазону [12]. застосовується для вимірювання температури різання на передній поверхні інструменту. В інструменті свердляр мікроотвір на відстані 0.8 мм від вершини інструменту. Введений кінець волокна захищають втулкою з нержавіючої сталі на відстані 1 мм від нижньої поверхні всередині мікроотвору вставки за допомогою спеціального пристосування. Електричні сигнали, перетворені з інфрачервоних променів</p>		<p>Метод може бути використано для дослідження температури різання в реальному часі. Забезпечує достатню точність вимірювання. Але до недоліків можна віднести складність конструкції, та необхідність зміни конструкції інструмента (просвердлювання отвору), застосування додаткового електроерозійного обладнання для отримання мікроотворів в інструменті та деталі.</p>

1	2	3
<p>фотодетекторами, збираються в режимі реального часу платою збору даних з частотою дискретизації 10 кГц, щоб забезпечити збір високочастотних даних.</p>		
<p>Тепловізори призначені для безконтактного вимірювання температури всіх точок поверхні досліджуваного об'єкту одночасно. Сучасні тепловізори працюють за принципом реєстрування інфрачервоного (теплого) випромінювання об'єктів та перетворюють його у візуальне зображення розподілу температури на екрані тепловізора.</p>		<p>Безконтактне вимірювання, що не порушує конструкції інструменту та заготовки; забезпечує миттєве відображення температури по всій поверхні; Висока чутливість, що дозволяє виявити перегрів та знос інструменту. Але недоліками є залежність від емісійної здатності матеріалів; залежність від умов навколишнього середовища через можливість створення оптичних перешкод таких як дим, пил, скло; висока вартість професійних моделей тепловізорів.</p>

За останні десятиріччя отримали розвиток нові методи інфрачервоної термографії, які перетворилися на ефективний інструмент моніторингу стану контролю температури об'єктів або процесів в реальному часі безконтактним способом [12, 13]. Так автори статей [14 – 16] для дослідження теплових процесів, що супроводжують процес різання різних методів металообробки різних матеріалів застосовували різні тепловізійні камери для дослідження різних параметрів режиму різання, або зносу інструментів, дослідження залежності якості обробленої поверхні від температури різання. Дослідники відмічають простоту застосування методу, зазначають переваги та певні недоліки, але сходяться на придатності застосування даного способу контролю для процесів різання.

Дослідники [17] порушують питання про те, як визначити знос ріжучого інструменту, що виключає прийняття рішення оператором на якого сьогодні і

покладено таке завдання, хоча від цього безпосередньо залежить якість виробу, що виготовляється. Для мінімізації впливу людського чинника пропонується використовувати термографічні зображення різальних інструментів після токарної обробки визначення зносу інструменту.

Як показує аналіз літературних джерел, дослідження температури різання різних методів механообробки із застосуванням методів інфрачервоної термографії переважно освячені в наукових статтях в форматі “case study”. Як правило такі публікації спрямовані на вивчення окремих питань застосування такої техніки в залежності від поставлених задач конкретних досліджень. На відміну від контактних методів вимірювання температури, які добре забезпечені засобами вимірювальної техніки та освітлені розкритими метрологічними питаннями, методи вимірювання температури із застосуванням інфрачервоної техніки, що відносяться до безконтактних методів, в основі яких лежить теорія про тепловий потік і його щільність, на жаль, станом на сьогодні не містить рекомендацій для метрологічного забезпечення та методик вимірювання для механообробки. А відповідно вивчення даного питання залишається актуальним завданням [18].

Слід відмітити, що і сьогодні дослідження температури, що виникає в зоні різання, є актуальним питанням. Насамперед, це пов'язано з появою нових, як оброблюваних, так й інструментальних матеріалів, нових технологій обробки, технологічного та вимірювального обладнання. Діяльність виробничого та наукового потенціалу різних країн, з метою реалізації стратегії сталого розвитку, спрямована на врахування економічних та екологічних аспектів при організації своєї діяльності з раціонального ресурсоспоживання та збереження навколишнього середовища [19, 20]. Саме тому ми звернули увагу на метод тепловізійного контролю, який не впливає на процес різання та навколишнє середовище, не потребує зміни конструкцій інструменту та заготовки, підходить як для аналізу миттєвого визначення температури так і для визначення температур в реальному часі за допомогою тепловізійних камер. Тепловізор дозволяє

візуалізувати розподіл температури по всій зоні різання, безпосередньо, під час різання.

Таким чином вимірювання температури різання за допомогою тепловізора є актуальною задачею, що відповідає сучасним трендам.

1.3 Фізичні основи тепловізійного контролю у технологічних процесах

1.3.1 Закон Кірхгофа

Тепловізійний – це неруйнівний контроль, що базується на реєстрації та перетворенні інфрачервоного випромінювання, яке природньо випромінюється поверхнею тіл, температура яких перевищує абсолютний нуль. Застосування тепловізії у технологічних процесах дозволяє здійснювати безконтактний, дистанційний та візуалізований моніторинг температурного поля об'єкта в реальному часі, що є особливо актуальним для контролю теплового стану в зонах локального нагріву, зокрема в процесі різання [21].

Інтенсивність випромінювання тілом залежить від температури тіла. Тепловізор реєструє відбите випромінювання ρ , випромінювання пропущене наскрізь досліджуваного об'єкту τ та випромінювання що випромінює об'єкт в залежності від властивостей матеріалу, або від його температури ε (рис. 1.3) [22 – 24].

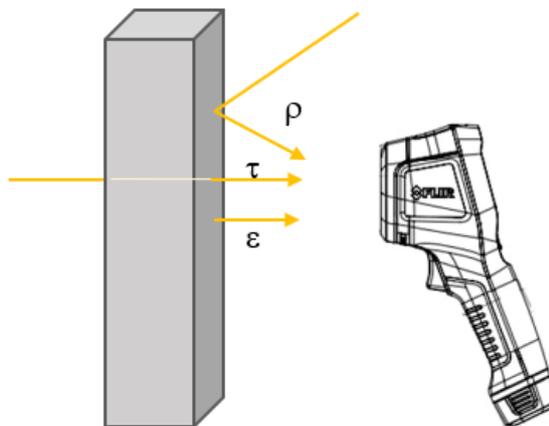


Рисунок 1.3 – Схематичне зображення типів випромінювання

Закон Кірхгофа є одним з основних законів теплового випромінювання і не поширюється на інші види випромінювання. Він стверджує, що тіло, яке при заданій температурі поглинає сильніше – має інтенсивніше випромінювання теплоти.

За законом Кірхгофа сума всіх трьох видів випромінювання дорівнює одиниці [22, 23]:

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1, \quad (1.2)$$

де ε – коефіцієнт поглинання;

ρ – коефіцієнт відбиття;

τ – коефіцієнт пропускання.

З цього випливає, що чим нижче коефіцієнт випромінювання, тим вище рівень відбитого ІЧ-випромінювання, тим складніше здійснити точне вимірювання температури і тим більш важливим стає правильне налаштування компенсації відбитої температури.

Причому для ідеально чорного тіла коефіцієнти $\varepsilon=1$; $\rho=0$; $\tau=0$. Це означає, що чорне тіло не відбиває і не пропускає жодної частини падаючого випромінювання, а вся енергія поглинається.

В реальних умовах виявляється, що більшість матеріалів не є ідеальними випромінювачами (абсолютно чорними тілами), тому їхня здатність випромінювати тепло характеризується коефіцієнтом випромінювання (ε), який менше за 1. Цей коефіцієнт закладається при розрахунках температури за допомогою тепловізійного обладнання.

Коефіцієнт відбиття (ρ) – залежить від здатності матеріалу відбивати ІЧ-випромінювання тобто від властивостей самого матеріалу, якості його поверхні та температури. Гладкі, поліровані поверхні мають більшу відбивну здатність, ніж шорсткі. Компенсацію відбитої температури можна задавати вручну за допомогою

інтерфейсу тепловізору. Зазвичай, відбита температура відповідає температурі навколишнього середовища. Кут відбиття завжди відповідає куту падіння.

Коефіцієнт пропускання (τ) – залежить від здатності матеріалу пропускати (проводити крізь себе) ІЧ-випромінювання. Більшість матеріалів є матеріалами стійкими до довгохвильового ІЧ випромінювання. Тому коефіцієнтом пропускання (τ) на практиці часто нехтують, тоді формула (1.2) приймає вигляд [23, 24]:

$$\varepsilon + \rho = 1. \quad (1.3)$$

1.3.2 Залежність інтенсивності випромінювання від температури тіла (закон Стефана – Больцмана)

Закон Стефана–Больцмана стверджує: енергія, випромінювана за одиницю часу з одиниці площі поверхні (потужність на одиницю площі випромінюючої поверхні) ідеального чорного тіла пропорційний четвертій степені його абсолютної температури [23, 24]:

$$E_0 = \sigma \cdot T^4, \quad (1.4)$$

де E_0 – енергія, випромінювана за одиницю часу з одиниці площі поверхні Вт м²;

$\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8}$, Вт· м² · К⁴ – стала Стефана-Больцмана;

T – абсолютна температура, К.

Цей закон є основою для розуміння принципів вимірювання температури об'єктів за допомогою інфрачервоної термографії, проте він актуальний тільки для ідеально чорних тіл, в реальному житті тіла мають інші кольори, що призводить до зміни інтенсивності випромінювання та шкодить точності вимірювань.

У роботі Мінкіни та Дудзика [25] вводиться додатковий параметр у цей закон – емісія. Емісія, ε – це характеристика поверхні тіла, яка визначає її здатність

випромінювати теплову енергію у вигляді електромагнітного випромінювання порівняно з ідеально чорним тілом. Для ідеально чорного тіла $\varepsilon=1$, а для реальних сірих або не сірих тіл емісія буде лежати на проміжку $0 < \varepsilon < 1$. Тоді математична модель для розрахунку випромінювання сірих тіл буде мати наступний вигляд:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4. \quad (1.5)$$

А емісійність виражається як відношення енергії, випромінюваної за одиницю часу з одиниці площі поверхні реального тіла до енергії, випромінюваної за одиницю часу з одиниці площі поверхні чорного тіла:

$$\varepsilon = \frac{E(T)}{E_0(T)}. \quad (1.6)$$

Включення коефіцієнту емісії дозволяє оцінити температуру об'єкта на основі вимірюного теплового потоку, що має вирішальне значення для практичних застосувань термографії у промислових, медичних чи будівельних галузях. Автори підкреслюють, що неточності у визначенні емісії є основним джерелом похибок. Наприклад, для об'єктів з низькою емісійністю ($\varepsilon < 0,5$) похибки вимірювань температури зростають, особливо при високих температурах.

1.3.3 Закон Планка для спектральної густини випромінювання

Закон Планка визначає спектральну випромінюваність (енергію, що випромінюється на одиницю площі за одиницю часу в заданому діапазоні довжин хвиль) як функцію довжини хвилі λ та температури T [23 – 25].

Загальна форма рівняння Планка для спектральної випромінювальної здатності M_λ чорного тіла:

$$M_\lambda(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/(\lambda kT)} - 1}, \quad (1.7)$$

де M_λ – спектральна випромінювальна здатність, Вт/м²мкм;

h – стала Планка

c – швидкість світла, м/с;

λ – довжина хвилі, мкм;

k – стала Больцмана;

T – абсолютна температура, К.

Закон Планка дозволяє розрахувати кількість енергії, що випромінюється об'єктом на різних довжинах хвиль, і є основою для розуміння того, як тепловізійні камери перетворюють інфрачервоне випромінювання у видиме зображення. Для вищих температур пік випромінювання зміщується до коротших довжин хвиль, що пояснюється законом зміщення Віна.

1.3.4 Закон зміщення Віна

Закон зміщення Віна описує зв'язок між температурою чорного тіла та довжиною хвилі, при якій випромінювання досягає максимуму. Він виводиться з рівняння Планка шляхом знаходження довжини хвилі λ_{max} (мкм), що відповідає максимальній спектральній випромінювальній здатності [25]:

$$\lambda_{max} \cdot T = b, \quad (1.8)$$

де T – температура чорного тіла, К;

b – стала Віна, що приблизно дорівнює 2898 мкм/К.

Закон Віна допомагає визначити оптимальний спектральний діапазон для тепловізійної системи залежно від температури об'єкта.

Отже беручи до уваги Закон зміщення Віна рівняння Планка можна записати наступним чином:

$$V_{camera} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V_{detector}(\lambda) d\lambda, \quad (1.9)$$

де V_{camera} – вихідний сигнал камери;

$V_{detector}(\lambda)$ – сигнал детектора, який залежить від спектральної чутливості детектора $R_D(\lambda)$ та спектральної здатності об'єкта $M_\lambda(\lambda, T)$;

λ_1, λ_2 – межі спектрального діапазону камери.

Таким враховується, що тепловізійна камера не вимірює випромінювання на одній довжині хвилі, а інтегрує енергію в межах певного спектрального діапазону, а також спектральну чутливість детектора $R_D(\lambda)$, що визначає, як ефективно камера сприймає випромінювання на різних довжинах хвиль. В такому вигляді цей закон стає базовим інструментом для обробки та інтерпретації випромінювання за допомогою тепловізору.

1.4 Класифікація тепловізорів

В цьому підрозділі буде здійснено огляд класифікаційних характеристик тепловізорів, але на початку варто розглянути базову термінологію, яка відображає фізичні принципи дії цих ЗВТ, особливості вимірювання та обробки теплових зображень. Для реалізації цього завдання було проаналізовано як наукові джерела [24 – 27], так і стандарт ДСТУ ISO 10878:2016 (ISO 10878:2013, IDT) [28], в якому подано терміни та визначення, що використовуються в галузі інфрачервоного контролю, основні з них подано у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Основні терміни та визначення, які використовуються в галузі інфрачервоного контролю

Термін	Визначення
1	2
Тепловізор	Пристрій, що формує зображення інфрачервоного діапазону, якими можна виконувати кількісні вимірювання температури [28].

1	2
Інфрачервона тепловізійна система	<p>Прилад, що перетворює просторові зміни інфрачервоного випромінювання поверхні на відтінки сірого або умовні кольори відповідно до потужності випромінювання (температурою) [28].</p> <p>Система, що складається з оптичної системи, інфрачервоного детектору, електроніки та обробки сигналу та блоку відображення або обчислювального модуля, яка використовується для формування термограм спостережуваної сцени [25].</p>
Інфрачервоний діапазон	Діапазон світлового випромінювання з довжиною хвилі більше максимально видимої [28].
Інфрачервоний термістор-болومتر	Термістор, що використовується для прийому енергії інфрачервоного випромінювання [28].
Інфрачервона термографія [18]	Методика формування зображень об'єктів шляхом реєстрації їх інфрачервоного (теплого) випромінювання.
Миттєве поле зору (IFOV)	<p>Кутовий розмір найменшої ділянки об'єкта, який може бути розрізнений окремим детектором (елементом) інфрачервоної камери [28].</p> <p>Кутовий розмір пікселя на сцені, який визначає яку мінімальну ділянку об'єкта може побачити один детектор [25].</p> <p>У джерелі [26] цей термін пояснюється за допомогою співвідношення – розмір найменшого об'єкту(мм) = IFOV(град) x відстань(м).</p>
Просторова роздільна здатність у площині вимірювань [18]	Розмір зони у площині вимірювань, що відповідає миттєвому полю зору та дистанції між інфрачервоним приладом та об'єктом вимірювань.
Якісна термографія	<p>Методика аналізу термограм з метою виявлення аномалій та визначення їх розташування [28].</p> <p>Метод інфрачервоної візуалізації заснований на візуальній суб'єктивній оцінці термограм для виявлення температурних аномалій без точного числового вимірювання [25 – 27].</p>
Кількісна термографія	<p>Методика використання кількісних вимірювань температури з метою оцінки серйозності аномалії та розстановки пріоритетів реагування [28].</p> <p>Метод термографії, що передбачає числове вимірювання температури у кожному пікселі термограми з урахуванням емісійності, відбитого випромінювання та умов спостереження (проведення досліджень) [25 – 27].</p>
Температурна чутливість / Теплова чутливість	<p>Мінімальна уявна або реальна різниця температури об'єкта вимірювання, яка призводить до формування спостережуваного сигналу (зазвичай, відповідає одиничному співвідношенню сигнал/шум) [28].</p> <p>Теплова чутливість – найменша різниця температур, яку тепловізор здатен зареєструвати як помітну зміну сигналу (відмінність на термограмі) [25 – 27].</p>

Якщо проаналізувати подані визначення до зазначених термінів то можна підсумувати, що вони збігаються за сенсом, але мають різні аспекти, наприклад:

- термін інфрачервона тепловізійна система – всі автори характеризують комплексність: оптика → сенсор → обробка, але при цьому в джерелі [25] акцентовано увагу на функціональній структурі, а у джерелі [26] – на фізичному принципі;
- термін температурна чутливість – у джерелі [25] пов'язаний з співвідношенням рівня сигнал/шум, а у джерелі [27] з мінімально виявленою різницею температур;

тож варто зауважити, що в цьому дисертаційному дослідженні застосування цих термінів буде уточнювано за контекстом використання з посиланням на відповідні джерела.

В джерелах [25 – 31] наведено класифікації за окремими характеристиками тепловізорів в описовому та табличному вигляді, які різняться за набором поданих характеристик, тому доцільно подати класифікацію тепловізорів, що дозволить їх оцінити з точки зору можливості застосування у вимірювальних чи діагностичних (моніторингових) задачах та за можливості оцінити їх переваги та недоліки.

За ознакою спектрального діапазону (довжиною хвилі) розрізняють [26, 28]:

- короткохвильові SWIR – діапазон довжин хвиль від 1 до 3 мкм;
- середньохвильові MWIR – діапазон довжин хвиль від 3 до 5 мкм;
- довгохвильові LWIR – діапазон довжин хвиль від 7 до 14 мкм.

За ознакою принципу отримання зображення тепловізори поділяють на скануючі та матричні [29]. Скануючі здійснюють послідовне сканування за допомогою механічних або опто-механічних пристроїв. Перевага застосування таких тепловізорів пов'язана з високою чутливістю та роздільною здатністю, але серед недоліків слід відмітити складність конструкції та більші габарити. В тепловізорах матричного типу застосовуються матриці з великою кількістю чутливих елементів (пікселів), які одночасно фіксують інфрачервоне випромінювання з усього поля зору. Серед переваг слід відмітити високу

швидкість отримання зображення, компактність та менше енергоспоживання. Серед недоліків – менша чутливість у порівнянні зі сканувальними тепловізорами.

За типом інфрачервоних детекторів тепловізори поділяють на [30]:

- болометричні,
- піроелектричні,
- напівпровідникові.

Болометричні детектори складаються з термоелектричного матеріалу (напівпровідника) оксиду ванадію, або аморфного кремнію, який нагрівається коли ІЧ-випромінювання потрапляє на нього. Зміна температури призводить до зміни електричного опору матеріалу детектора, данні про це використовують для створення теплового зображення. Не потребують охолодження, забезпечують гарну чутливість і простоту конструкції, але мають невисоку швидкість опрацювання інформації.

Піроелектричні детектори складаються з кристалу або матеріалу з піроелектричними властивостями, що полягають у здатності генерувати електричний заряд при зміні температури. Швидше реагують на зміну ІЧ-випромінювання, але мають меншу чутливість.

Напівпровідникові детектори працюють на принципі ефекту фотопровідності, що застосовується для вимірювання інтенсивності ІЧ-випромінювання і це використовується для створення теплового зображення. Мають гарну чутливість і швидко реагують на зміни ІЧ-випромінювання, але потребують охолодження, це призводить до необхідності збільшення розмірів конструкції та її замороження.

За конструктивним виконанням можна виділити на основі джерел [25 – 30]:

- ручні (портативні) – компактні з вбудованим дисплеєм, акумулятором, ПЗ пам'яттю використовуються для технічної діагностики та вимірювання;
- -стаціонарні – фіксовані системи з можливістю передачі даних у реальному часі, використовуються для моніторингу за станом обладнання та в цілях безпеки;
- вбудовані (інтегровані) – модулі що вбудовують у виробничі лінії або роботизовані системи;

- тепловізійні приціли – військові або мисливські прилади з оптикою та підсвіткою;

- мобільні – підключаються до смартфонів або планшетів через USB/Type- C, використовуються для побутового огляду та інспекції в польових умовах.

З урахуванням вищенаведеної інформації та специфіки об'єкту дослідження, придатними для проведення експериментів із визначення температури різання на операції точіння найбільш придатними є камери, які працюють в спектральному діапазоні довжин хвиль від 7 до 14 мкм, портативні, матричні з неохолоджувальним мікроболометром з оксиду ванадію або аморфного кремнію. Також важливим є врахування температурного діапазону вимірювань, технічних та метрологічних характеристик. Тож розглянемо принцип роботи тепловізора з неохолоджуваним мікроболометром.

1.5 Принцип роботи тепловізора з неохолоджуваним мікроболометром

Як зазначалося вище, будь яке тіло з температурою вище абсолютного нуля випромінює інфрачервоне випромінювання. Таке досліджуване тіло має назву об'єкта чи сцени. Залежно від температури об'єкта, коефіцієнта емісії, довжини хвилі формується випромінювальний потік. Саме на принципі перетворення інфрачервоного випромінювання об'єктів, яке не здатно вловити людське око, у видиме зображення, зрозуміле людському оку, що дозволяє побачити різницю між об'єктами засновано принцип дії тепловізора [27 – 28]. Типова функціональна схема роботи тепловізора показана на рисунку 1.4.

Об'єктив тепловізору (оптична система) збирає ІЧ-випромінювання довжиною хвиль в межах від 8 до 14 мкм і фокусує ІЧ-промені на детекторну матрицю. Забезпечує необхідне поле зору та пропускає лише теплове випромінювання у певному діапазоні.

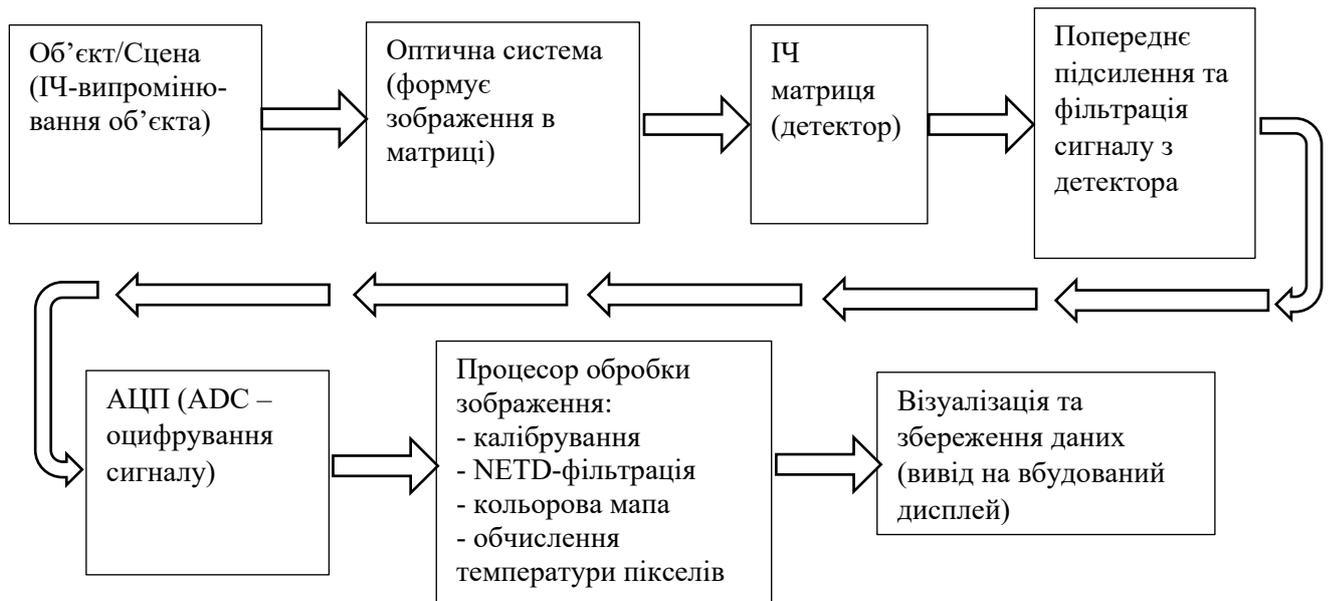


Рисунок 1.4 – Типова функціональна блок-схема тепловізора
(з неохолоджуваним мікроболометром)

Оптична система визначає геометричні параметри зображення, виключно з роздільністю сцени. В більшості сучасних тепловізорів використовують нескануючі матриці FPA. Від матеріалу інфрачервоної матриці (детектора) залежить діапазон довжин хвиль, у якому працює камера, чутливість, швидкодія, шум та охолодження, область застосування, а також вартість камери. Матриці тепловізорів з неохолоджуваним мікроболометром з довжиною хвиль 8 – 14 мкм виготовляють з оксиду ванадію та використовують в побутових, промислових тепловізорах, а з аморфного кремнію – в автомобілях та більш дешевих моделях. Кожен піксель FPA працює як мікроскопічний термометр: Абсорбує ІЧ-енергію, реагує зміною опору через зміну температури, перетворює ці зміни на електричні сигнали. Слабкі аналогові сигнали підсилюються, щоб покращити їх співвідношення сигнал / шум та піддаються фільтрації для усунення перешкод. В блоці аналогово-цифрового перетворення (АЦП) сигнал оцифровується шляхом перетворення напруги від пікселів у цифрові значення температури, як правило, з роздільністю 14 біт. Цей етап дозволяє здійснювати подальшу цифрову обробку. В блоці процесору обробки зображення здійснюється радіометричне

калібрування: усунення нерівномірності матриці (NUC), коригування залежності сигналу від температури навколишнього середовища, перетворення рівню сигналу у абсолютні значення температури. Наступним етапом в цьому блоці є обчислення температурної мапи шляхом формування в кожному пікселі температури об'єкта в полі зору. Далі етап псевдокольорової візуалізації (LUT) на якому температурні значення перетворюються у кольори згідно з обраною палітрою (IRON, Rainbow, Grayscale та ін. в залежності від моделі тепловізора). При цьому за допомогою інструментів вимірювання обчислюється точки з найвищою та найнижчою температурами та виведення ізотерм. В блоці візуалізація та збереження даних відбувається вивід на вбудований дисплей зображення разом з температурною шкалою, збереження зображення в форматі JPG на карту microSD і температурна матриця у форматі CSV, передача даних через USB Type-C на ПК [25, 26, 29, 30].

1.6 Аналіз впливу характеристик тепловізорів на вимірювання температури

Відомо, що оцінити тепловізор лише за умови отримання теплових карт зон спостереження, навіть для експерта, є достатньо складним завданням. Як правило, з метою оцінювання здійснюють вимірювання та визначення параметрів, які є кількісними фізичними характеристиками тепловізорів. Визначення цих параметрів є вкрай важливим для розуміння як вимірювальний пристрій буде працювати в умовах проведення реальних досліджень [25, 27, 30]. Чому це важливо? Тому що та невелика кількість параметрів щодо характеристик тепловізорів, яка вказується виробниками в специфікаціях до них, відповідатиме до умов, в яких проводились вимірювання/випробування в калібрувальних лабораторіях, а реальні умови проведення досліджень можуть сильно відрізнятись. Розглянемо детальніше класифікацію за поділом характеристик. Згідно з інформацією, яку подано у джерелах [25, 27, 32] параметри характеристик, за якими оцінюють продуктивність тепловізорів та короткий опис до них, можна поділити на 8 груп (див. рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Параметри характеристик, за якими оцінюють продуктивність тепловізорів

Всі ці параметри, безумовно, є важливими для проведення термографічних досліджень, але в залежності від призначення – якісна чи кількісна термографія та характеристик об'єкту, набір цих параметрів може значно варіюватися. Слід враховувати, що якісна термографія більше використовується для отримання візуалізаційних теплових зображень, а кількісна для точного вимірювання температур в кожній точці теплового зображення. Як зазначено у джерелах [27, 29, 33] кількість характеристик за цими групами параметрів налічує більше ніж сорок. Існує велика кількість досліджень, в яких цей набір дуже різниться в залежності від задач та потреб дослідників. Відповідно, необхідно проаналізувати які характеристики для нашого об'єкту дослідження є важливими.

Для вимірювань температури зони різання за допомогою тепловізійної камери, тобто кількісної термографії, найголовнішими є параметри, які впливають на точність, достовірність та відтворюваність результатів.

Спектральні параметри будуть впливати на здатність «бачити» необхідний діапазон інфрачервоного випромінювання від об'єкту досліджень та пропускну здатність оптики. Як вже зазначалося вище, для нашого об'єкту, було обрано камери, які працюють в спектральному діапазоні довжин хвиль від 7 до 14 мкм. На рисунку 1.6 показано спектральну густину випромінювання як функцію діапазону робочих температур об'єкту дослідження від 50 – 550 С з кроком 50 С та зазначеного спектрального діапазону. Графік побудовано з використанням загальної форми рівняння Планка для спектральної випромінювальної здатності M_λ (1.7), яку описано в підрозділі 1.3.3. Вибір зазначеного діапазону обумовлений тим фактом, що камери які працюють у довгохвильовому діапазоні LWIR мають кращу чутливість ніж камери, які працюють в середньохвильовому діапазоні з урахуванням контрастного температурного фону по відношенню до об'єкта дослідження та дозволяють точно фіксувати температуру навіть при зсуві піку температур ліворуч від вікна, що можна побачити на графіку (графік побудовано за допомогою мови Python).

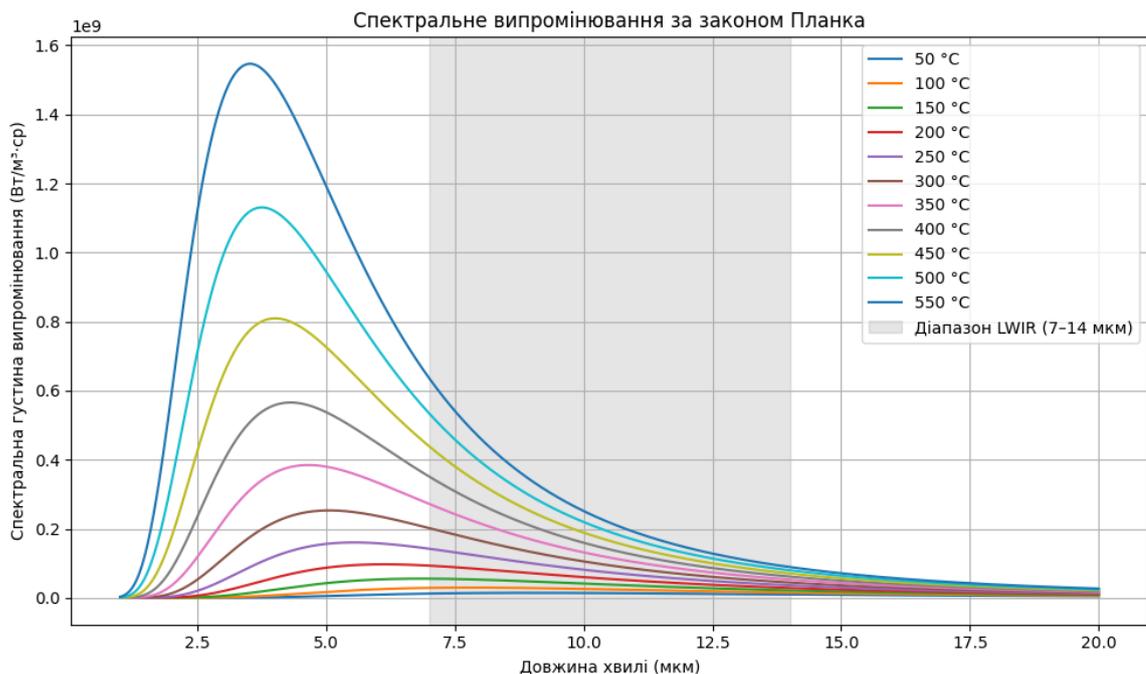


Рис. 1.6 – Спектральне випромінювання за законом Планка

Параметри шуму визначають мінімальну зміну температури, яку може виявляти тепловізор. Тому потрібно відмітити, що важливою характеристикою є – еквівалентна шуму різниця температур NETD. Вона характеризує наскільки детектор камери може розрізнити невелику різницю теплового випромінювання на зображенні, зазвичай, вимірюється в мК (іноді в специфікаціях зустрічається в °C). Ця характеристика показує яку мінімальну різницю температур здатна «вловити» камера на фоні власного шуму, за певних умов, вираженому як еквівалентне значення температури [33, 34]. Також в зазначених роботах акцентується увага щодо існування різних методик щодо визначення цієї характеристики. Як відомо, ця характеристика використовується для визначення можливості камери бачити низькотемпературні та малоконтрастні об'єкти. За умови дослідження нашого об'єкта з температурами 100 °C – 400 °C, а часто й вище, відповідно інтенсивність ІЧ-випромінювання об'єкту буде суттєво вище за величину фонового шуму. Тому, величина NETD не обмежує виявлення об'єкта, але залишається важливою для визначення точності приладу і може бути використана при оцінюванні невизначеностей вимірювань. Класичні рекомендації з експериментального визначення цієї характеристики пов'язані із застосуванням «чорного тіла» за стабільних умов та оцінювання серії термограм та послідовним обчисленням стандартного відхилення отриманих значень температур для ROI (серії термограм). Середнє значення цього стандартного відхилення буде оцінкою NETD. Теоретично вважається, що випадкове коливання значень температури (зумовлене фоновим шумом) із збільшенням інфрачервоного випромінювання (при більш високих температурах) зменшується, але на практиці так відбувається не завжди, в залежності від різних причин [33]. Тому для забезпечення надійності вимірювань температури для об'єктів що обертаються та зі зміною температури за часом, важливим є питання визначення цього параметру, який впливає на якість отриманого зображення та оцінювання точності вимірювань.

В роботі [35] автор зробив ґрунтовний аналіз методів вимірювання температури об'єктів що обертаються та зазначив, що при здійсненні вимірювання температури безконтактними методами, в тому числі методом інфрачервоної

термографії, важливим є компенсація можливих помилок, наприклад, за допомогою стабільного кріплення камери, що сприяє постійному вирівнюванню відносно рухомого об'єкту. Також було відмічено, що високошвидкісні об'єкти можуть призводити до появи розмиття на зображеннях, тим самим погіршуючи їх якість в цільовій області, тобто доцільно проаналізувати які характеристики з геометричних параметрів варто оцінювати. У нашому випадку, нерухомість камери досягається її закріпленням за допомогою штатива, але при цьому також варто правильно налаштувати камеру для забезпечення правильного захоплення області, необхідної для подальшого аналізу отриманої радіометричної інформації. Тому доцільним є врахування геометричних параметрів, про що також наголошується у джерелах [27, 36, 37].

Рекомендації щодо проведення термографічних досліджень, а саме з налаштування камери, в загальному вигляді описано і в стандарті [36], і у джерелі [27]. Автор Геральд С. Холст в роботі [27] розглядає різні схеми спостереження під час здійснення тепловізійної зйомки з метою визначення зони покриття, з урахуванням встановлення камери при «косому» спостереженні, коли камера не знаходиться під прямим кутом по відношенню до об'єкту дослідження. Слід зазначити, що в роботі підкреслено важливість розуміння правильності встановлення камери для отримання зони покриття по вертикальному VFOV та горизонтальному HFOV полям зору з метою врахування геометричної корекції зображення при вимірюванні температури. На просторове розділення вимірювання (*spatial resolution of measurement*), під якою розуміють здатність матриці вимірювати об'єкти певного розміру [27, 37], впливає величина FOV, фокусна відстань та відстань до об'єкту.

Окрім параметрів, зазначених вище, важливо також враховувати умови навколишнього середовища при проведенні тепловізійної зйомки. Для нашого об'єкта дослідження – зони різання без використання мастильно-охолоджувальних технологічних середовищ (MOTS) не враховують встановлення захисних додаткових вікон для оптики. Але якщо дослідження здійснюються за умови використання MOTS варто враховувати фізичні явища, які приводять до

спотворення сигналу. Захисні вікна не є прозорими для ІЧ-випромінювання, вони випромінюють та відбивають радіацію, що буде впливати на точність вимірювання [26, 27, 37].

Серед інших характеристик зауважимо також на необхідності врахування робочого діапазону температур, тобто температури в приміщенні де відбуваються дослідження, в нашому випадку це або верстатна лабораторія, або механічний цех, де робочий діапазон температур відрізняється від умов калібрувальної лабораторії та середня температура становить 15...18 °С в зимовий період. Це безпосередньо буде впливати і на чутливість тепловізорів (NETD), чим нижча температура тим вище величина NETD. Також впливає вологість повітря та рівень запиленості. Автори статті [38] дослідили вплив пилу на вимірювання температури інфрачервоним тепловізором. Було запропоновано в особо запилених умовах (наприклад, в польових) застосовувати кількісну оцінку похибок в залежності від міста концентрації пилу: на лінзі тепловізора, на поверхні вимірюваного об'єкту та на оптичному шляху від вимірюваного об'єкту до тепловізора.

Для мінімізації можливої похибки вимірювання температури в зоні різання, спричиненої пилом в робочому просторі перед проведенням термографічних досліджень необхідно контролювати рівень запиленості за методикою поданою в [39], та якщо ці величини є незадовільними, то треба це враховувати для корекції вимірювань.

Такі характеристики, що відносяться до суб'єктивних параметрів та використовуються для аналізу проведення якісних (візуалізаційних) термографічних досліджень, наприклад, мінімальна роздільна різниця температур MRTD, мінімально виявлювальна різниця температур MDTD, порогова здатність виявлення цілі TOD, мінімальна виявлювальна точка температури MDTP та ін. – в цій дисертаційній роботі розглядатися не будуть.

Підсумовуючи, можна зазначити, що для проведення кількісних термографічних досліджень враховують й інші параметри, які описано в джерелах, присвячених вивченню питань, як з фізики термографічного контролю, тестування ІЧ-техніки так і забезпечення точності та достовірності отриманих результатів, але

кількість характеристик за різними групами параметрів варіюється в залежності від призначення досліджень. Детальний розгляд зазначених характеристик відповідно до груп параметрів описаних вище для об'єкта дослідження цієї роботи буде здійснено в наступних розділах з метою оцінювання точності та достовірності отриманих результатів вимірювання.

Висновки до розділу 1

В аналітичному розділі проаналізовано особливості теплообміну у процесі різання та основні закономірності теплоутворення. Розглянуто існуючі методи та засоби вимірювання температури, зроблено порівняльний аналіз методів та засобів вимірювання температури, придатних для застосування при обробці різанням. Проаналізовано сучасні літературні джерела з даної тематики та виявлено сучасні напрямки досліджень із застосуванням методу безконтактного тепловізійного контролю для визначення температури в зоні різання, підкреслено актуальність та ефективність таких досліджень.

Зазначено переваги застосування методу тепловізійного контролю, який дає змогу не впливати на процес різання та навколишнє середовище, не потребує зміни конструкцій інструменту та заготовки, підходить як для миттєвого визначення температури так і для моніторингу в реальному часі. Тепловізор дозволяє візуалізувати розподіл температури по всій зоні різання, безпосередньо, під час процесу різання. В цьому розділі було здійснено огляд класифікаційних характеристик тепловізорів. Розглянуто фізичні основи тепловізійного контролю, зокрема, закони які зумовлюють усю сучасну термографію, такі як Кірхгофа, Стефана Больцмана, Планка та його сучасну інтерпретацію й закон зміщення Віна. Також було загострено увагу на метрологічні аспекти застосування тепловізорів у вимірювальних задачах та складнощі які виникають у процесі збору та аналізу даних.

2 МЕТОДОЛОГІЯ ТА ЗАСОБИ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ У ЗОНІ РІЗАННЯ

2.1 Математична модель теплового стану процесу різання як інструмент верифікації результатів тепловізійного контролю

Одним з найпоширеніших методів механообробки є точіння. У процесі зовнішнього точіння відбувається інтенсивне утворення тепла в зоні контакту інструмента із заготовкою та стружкою. Температура в цій зоні впливає на знос інструменту, якість обробленої поверхні та стабільність отримуваних розмірів. Питанням визначення температури різання присвячено багато наукових досліджень. Це обумовлено доведеним впливом температури що виникає в зоні різання як на точність та якість виготовлення деталей машин, їх експлуатаційні характеристики при роботі в механізмах та вузлах через вплив температури на формування поверхневих напружень так і на стійкість різального інструменту [2, 40, 41]. Так автори статі [42] описують дослідження температури різання при обробці сталей після термообробки твердістю 45 HRC і вище стандартними пластинами з кераміки з покриттям TiN за допомогою моделювання методом кінцевих елементів із застосуванням програмного забезпечення DEFORM 3D у поєднанні з експериментальними дослідженнями.

Робота [22] присвячена моделюванню середньої температури системи інструмент-заготовка при обробці загартованих сталевих заготовок твердосплавними пластинами з покриттям (TiCN, WC, Co). Моделюванням за допомогою дисперсійного аналізу (ANOVA) досліджувався вплив твердості оброблюваного матеріалу, подачі та швидкості різання при сухому різанні та із застосуванням мастильно-охолоджувальної рідини. Встановлено вирішальний вплив твердості оброблюваного матеріалу на температуру різання 67% при сухій обробці та 64% із застосуванням MOP.

Автори статі [43] представили розробку математичної моделі розподілу температури в різальній пластині на основі локально одновимірної схеми

Самарського, що дозволяє вивчати вплив температури різання на процес зношування різального інструменту.

Аналіз вищенаведених сучасних досліджень присвячених дослідженню впливу як різних параметрів на виникнення температури різання так і її вплив на точність та якість деталі, стійкість та знос інструменту підтверджує актуальність цієї тематики. Всіх дослідників об'єднує загальне судження про необхідність моделювання теплових процесів різання з метою прогнозування температури і розподілом її між інструментом, стружкою і заготовкою. Це дозволяє заздалегідь оцінити теплові навантаження без проведення дороговартісних, а іноді і складних експериментів та заощадити час.

Застосування математичного моделювання для більш глибокого розуміння, яке доцільно виконувати на етапі підготовки перед проведенням тепловізійних досліджень, оскільки воно дозволяє сформувати уявлення про очікуваний розподіл температур. Для цього необхідно визначити зони найбільшого інтересу та оптимізувати умови експерименту. Це забезпечує підвищення інформативності та метрологічної достовірності результатів тепловізійного спостереження, дозволяючи інтерпретувати дані з урахуванням фізичних закономірностей процесу. Окрім цього математичну модель можна використовувати з метою верифікації результатів тепловізійного контролю теплових процесів зовнішнього точіння шляхом їх порівняння з моделлю, що описує фізичні закономірності теплоутворення та теплообміну в зоні різання.

Для досягнення поставленої мети, необхідно вирішити наступні завдання:

- сформулювати постановку математичної задачі з послідовним аналітичним розв'язанням для температури різання;
- провести порівняння експериментально отриманих результатів методом тепловізійного контролю з теоретично обчисленими температурами, отриманими з моделі.

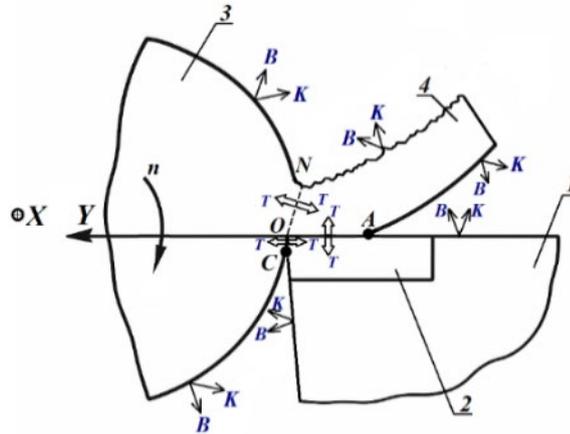
В наукових дослідженнях або при виконанні аналізу використовують наступні підходи до моделювання теплових процесів у зоні різання: аналітичне моделювання, сутність якого полягає у застосуванні математичних формул для

розрахунку температури на основі фізичних законів; комбіноване моделювання, сутність якого полягає у поєднанні аналітичних рівнянь з емпіричними або експериментальними коефіцієнтами; чисельне моделювання, сутність якого пов'язано з просторово-часовим моделюванням температурних полів для інструмента, заготовки та стружки; емпіричне моделювання, сутність якого полягає у застосуванні статистичних залежностей температури від параметрів різання (швидкість, подача, матеріал тощо) з послідуочим регресійним аналізом; гібридне моделювання, сутність якого полягає у поєднанні аналітичних, чисельних і експериментальних підходів.

Вибір підходу до моделювання теплових процесів у зоні різання залежить від типу та умов обробки, поставлених завдань дослідження й призначення отриманої моделі. У науково-практичних дослідженнях одним з ефективних способів є поєднання чисельного моделювання з експериментальною верифікацією. Пов'язано це з можливістю адаптації до реальних виробничих умов, підвищенням точності без надмірної обчислювальної складності при моделюванні та подальшою інтеграцією з методами контролю (наприклад, з використанням термопар). Однак вони можуть впливати на саме поле температур та ускладнювати експериментальне дослідження. Натомість, застосування тепловізійного контролю дозволяє здійснювати безконтактні вимірювання розподілу температури у режимі реального часу, що робить цей метод перспективним для вивчення теплових процесів при точінні.

Для визначення теплового балансу процесу різання при точінні необхідно описати теплові явища, які виникають в процесі різання та саме вони визначають температуру в зоні різання. Проаналізуємо тепловий стан технологічної підсистеми на операції зовнішнього точіння. Як правило, в зоні обробки (рис. 2.1) виділяють три основних види теплопередачі: теплопровідність, конвекція та випромінювання. Генерація тепла в зоні контакту різального інструменту з поверхнею заготовки відбувається: на ділянці ON – за рахунок пластичного деформування зони зсуву (первинне джерело); на ділянці OA – за рахунок роботи сил тертя між передньою поверхнею різальної пластини та внутрішньою поверхнею стружки (вторинне

джерело); на ділянці OC – за рахунок роботи сил тертя між задньою поверхнею різальної пластини та оброблюваною поверхнею заготовки (третинне джерело).



X, Y – напрямки осей, n – частота обертання заготовки, T – теплопровідність, K – конвекція, B – випромінювання, 1 – різальний інструмент, 2 – різальна пластинка, 3 – заготовка, 4 – стружка

Рисунок 2.1 – Тепловий стан технологічної підсистеми на операції зовнішнього точіння (види теплообміну, опрацьовано на основі [44, 45])

Передача тепла між передньою поверхнею різальної пластини та внутрішньою поверхнею стружки, між задньою поверхнею різальної пластини та оброблюваною поверхнею заготовки, а також на ділянці ON відбувається за рахунок теплопровідності, T . Передача тепла між передньою та задньою поверхнями різального інструменту з навколишнім середовищем, оброблюваною поверхнею заготовки, а також поверхнями стружки з навколишнім середовищем відбувається за рахунок теплообміну конвекцією K та випромінюванням B .

Відомо, що для визначення теплового балансу процесу різання при точінні користуються тривимірною моделлю теплового поля зі зміною у часі $\Theta = f_{\Theta}(x, y, z, \tau)$ та для розрахунку температури в твердих тілах використовують диференціальне рівняння теплопровідності [2, 5, 44]:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right), \quad (2.1)$$

де Θ – температура в будь-якій точці тіла з координатами x, y, z в будь-який момент часу τ ;

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \text{ – температуропровідність.}$$

Математичне моделювання здійснюється з використанням рівняння теплопровідності, визначенням початкових та крайових умов в зоні різання. Такий підхід дозволяє отримати картину теплового стану та порівняти з результатами отриманої радіометричної інформації за допомогою термограм. Варто відмітити, що в метрології та моделюванні процес верифікації використовується для перевірки правильності реалізації моделі.

Враховуючи, що відповідно до мети дослідження має бути перевірено достовірність результатів тепловізійного контролю (радіометрична інформація з термограми), а термограма дає 2D зображення, то приймаємо спрощення для опису – двовимірну нестационарну математичну модель із зміною за координатами x (напрямок повздовжньої осі заготовки або напрямком подачі), y (радіальний напрямок до центру заготовки) та у часі – τ . Тобто рівняння теплопровідності матиме вигляд:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} \right), \quad (2.2)$$

де $\Theta = f_{\Theta}(x, y, \tau)$.

Джерело теплоти в зоні різання може бути визначено уздовж довжини активної різальної кромки $x \in [-l/2, l/2]$, де l – довжина активної різальної кромки:

$$l = \frac{a_p}{\sin \varphi}, \quad (2.3)$$

де a_p – глибина різання, мм;

φ – головний кут в плані, °.

Початкові та крайові умови:

Початкова температура – $\Theta_0 = f_{\Theta} (x, y, \tau_{\text{навк.сер.}})$.

Крайова умова II роду з просторовою залежністю за y :

$$-\lambda \left. \frac{\partial \theta}{\partial y} \right|_{y=0} = q(x, y, \tau), \quad (2.4)$$

де $q(x, y, \tau)$ – функція, яка описує розподіл теплового потоку не тільки відносно повздовжньої осі x (напрямок подачі), але і в радіальному напрямку y (напрямок глибини різання).

Крайова умова III роду (умова на нескінченності) означає, що далеко від джерела тепла температура знов наближається до початкового значення Θ_0 . Враховуючи, що нас цікавить зона різання (контакт різального інструменту із заготовкою), варто ще розглянути залежності, які описують види теплообміну T , K , B (рис. 1).

Теплопровідність [44]:

$$\vec{q} = -\lambda \nabla \theta, \quad (2.5)$$

де \vec{q} – вектор густини теплового потоку, Вт/м²;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м·°C);

$\nabla \theta$ – градієнт температури (зміна температури у просторі), °C/м.

Конвекція [25]:

$$q_{conv} = h \cdot A \cdot (\theta - \theta_{\text{навк.сер.}}), \quad (2.6)$$

де q_{conv} – тепловий потік за рахунок конвекції, Вт;

h – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·K);

A – поверхня теплообміну, м²;

θ – температура поверхні, °C;

$\theta_{\text{навк.сер.}}$ – температура навколишнього середовища, °С.

Випромінювання [25]:

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (\theta^4 - \theta_{\text{навк.сер.}}^4), \quad (2.7)$$

де q_{rad} – тепловий потік випромінювання, Вт;

ε – коефіцієнт випромінювання;

σ – стала Стефана-Больцмана: $5,670 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·°К⁴).

Варто зазначити, що у залежності для випромінювання слід використовувати значення температури в Кельвінах.

Основне джерело тепла в процесі різання – механічна робота сили різання. Залежність для визначення теплової потужності Q , Вт [1 – 6]:

$$Q = F_c \cdot v, \quad (2.8)$$

де F_c – сила стружкоутворення, Н;

v – швидкість різання, м/с;

Сила стружкоутворення F_c може бути знайдена за допомогою залежності через рівнодіючу складових сил різання R . Залежності для визначення цих сил було отримано за допомогою побудови схеми сил що діють на інструмент та заготовку при зовнішньому точінні (див. рис.2.2) за Мерчентом:

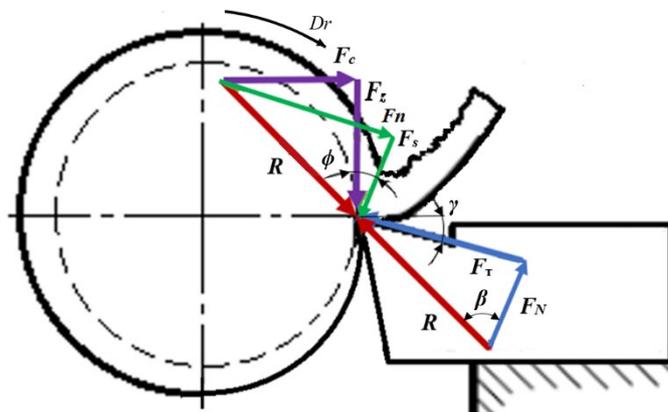


Рисунок 2.2 – Схема сил, що діють при зовнішньому точінні

$$R = \frac{F_z}{\cos(90-\beta-\phi)}, \quad (2.9)$$

$$F_c = R \cdot \sin \beta, \quad (2.10)$$

де F_z – тангенційна складова сили різання, Н;

$\beta = \arctan(\mu)$ – кут тертя, °;

μ – коефіцієнт тертя;

ϕ – кут зсуву, °.

Основне тепло Q витрачається на нагрів матеріалу. Як відомо, переважна частина цієї теплоти йде до стружки, яка утворюється з певною швидкістю. Тобто маса матеріалу, що утворюється за одиницю часу m [42]:

$$m = \rho \cdot V_{\text{стр}}, \quad (2.11)$$

де ρ – густина матеріалу, кг/м³.

Формування об'єму стружки $V_{\text{стр}}$ в площині зсуву за секунду:

$$V_{\text{стр}} = a_p \cdot f \cdot v, \quad (2.12)$$

де v – швидкість різання, м/с;

f – подача, м/об;

Фізична модель, в спрощеній формі, базується на формулі теплового балансу [43]:

$$\Delta\theta = \frac{Q}{m \cdot c}, \quad (2.13)$$

де c – питома теплоємність матеріалу.

Температурний приріст визначається для двох джерел тепла:

- первинна зона – у якій враховується тепло від роботи затрачуваної на деформацію зрізуваного шару, зона пружно-пластичної деформації зсуву ($\Delta\theta_c$);
- вторинна зона – у якій враховується тепло виділене від роботи затрачуваної на подолання сил тертя стружки о передню поверхню різальної пластини ($\Delta\theta_T$).

Відповідно:

- для первинної зони:

$$\Delta\theta_c = \frac{Q_c}{m \cdot c} = \frac{\eta \cdot F_c \cdot v}{\rho \cdot a_p \cdot f \cdot v \cdot c} = \frac{\eta \cdot F_c}{\rho \cdot a_p \cdot f \cdot c}; \quad (2.14)$$

- для вторинної зони:

$$\Delta\theta_T = \frac{Q_T}{m \cdot c} = \frac{\eta \cdot F_T \cdot v_{стр} \cdot t}{m \cdot c} = \frac{\eta \cdot F_T \cdot v_{стр} \cdot l / v_{стр}}{\rho \cdot a \cdot b \cdot l \cdot c} = \frac{\eta \cdot F_T}{\rho \cdot a \cdot b \cdot c}, \quad (2.15)$$

де $F_T = R \cdot \cos \beta$ – сила тертя стружки о передню поверхню різальної пластини;

η – частка від повного тепловиділення ($\eta=0,45 - 0,95$);

$v_{стр} = v/r$ – швидкість стружки, м/с;

r – коефіцієнт вкорочення стружки;

a – товщина зрізуваного шару, м;

b – ширина зрізуваного шару, м.

З отриманих формул видно, що температура залежить від подачі (товщини зрізуваного шару), глибини (ширини зрізуваного шару). Але реальна форма стружки змінюється за формою за різних умов різання при обробці одного і того ж матеріалу, що також впливає на формування температурного поля в зоні різання. Це пов'язано з тим, що площа зсувної поверхні змінюється із зміною a_p та f не лише лінійно. Для різних матеріалів, в залежності від співвідношення величин подачі/глибини/швидкості може утворюватися стружка від елементної до

суцільної, яка має інший контакт з різальною пластиною інструменту, інакше проводить тепло та змінює площу джерела тепла. Тож відповідно, доцільно ввести коригуючий коефіцієнт K_c для врахування зміни геометрії зрізуваного шару при зміні режимів різання, який враховує вплив зміни форми стружки та дозволить уточнити розрахунок складових $\Delta\theta_c$ і $\Delta\theta_T$. Формула для визначення K_c є емпіричною поправкою, яка враховує зміну форми та поведінки стружки під час різання при зміні режимів:

$$K_c = C_c \cdot \left(\frac{f}{a_p}\right)^m \cdot v^n, \quad (2.16)$$

де $\frac{f}{a_p}$ – відносна подача, що фізично є кутом нахилу зрізуваного шару;

m, n –ступеневі показники, що враховують вплив на відносну подачу та швидкість відповідно.

Прологарифмуємо рівняння 2.16 для перетворення задачі у лінійну регресію з двома змінними $\lg\left(\frac{f}{a_p}\right)$ та $\lg v$:

$$\lg K_c = \lg C_c + m \lg\left(\frac{f}{a_p}\right) + n \lg v.$$

Обчислюємо логарифми та отримуємо коефіцієнти C_c , m та n застосувавши метод найменших квадратів для цього позначимо:

$$y = \lg K_c;$$

$$x_1 = \lg\left(\frac{f}{a_p}\right);$$

$$x_2 = \lg v;$$

$$A = \lg C_c.$$

Тоді лінійна регресійна модель:

$$y = A + m \cdot x_1 + n \cdot x_2.$$

За умови отримання типової форми стружки – $K_c = 1$, за умови більш високих величин подач та швидкостей відбувається зміна форми стружки та ускладняється тепловідведення – $K_c > 1$, при менших подачах та швидкостях теплова енергія розсіюється ефективніше – $K_c < 1$. За допомогою цієї моделі можна розраховувати коефіцієнт K_c для будь-якої комбінації a_p, f, v .

Відповідно, температуру в зоні різання можна визначити, користуючись наступною залежністю:

$$\theta_{\text{розр.}} = \theta_{\text{навк.сер.}} + \Delta\theta_c \cdot K_c + \Delta\theta_T \cdot K_c. \quad (2.17)$$

Але залежність 2.17 не враховує втрати на випромінювання та на конвекцію, для складання більш повного рівняння температурного балансу введемо 2.18 та 2.19:

$$Q_{\text{втр}} = q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}}, \quad (2.18)$$

то відповідно:

$$\theta_{\text{втр}} = \frac{Q_{\text{втр}}}{m \cdot c}, \quad (2.19)$$

$$\theta_{\text{розр.}} = \theta_{\text{навк.сер.}} + \Delta\theta_c \cdot K_c + \Delta\theta_T \cdot K_c - \theta_{\text{втр}}. \quad (2.20)$$

В спрощеній формі, для коректного розрахунку, звичайно визначають ефективну площу теплообміну A в зоні контакту користуючись відомою залежністю: $A = l \cdot f$. Враховуючи дуже малу площу активної зони контакту інструмента і заготовки, теплові втрати за 1 с майже не впливають на загальний стан щодо температури. Відомо, що в реальності температура знижується не миттєво. Стружка втрачає свою температуру після зняття від початку переміщення в сторону стружковідведення, через дотики з іншими поверхнями та вільно переміщуючись у повітрі, тому для уточнення – модель може бути розглянута за часом впливу теплових втрат (швидкоплинність) та площею теплообміну. Також відомо, що більша частина теплоти, яка генерується в зоні контакту відноситься стружкою, тому можна врахувати час тепловіддачі стружки $t_{\text{т.с.}} = l_{\text{ш.стр.}}/v_{\text{стр.}}$.

Уточнення для площі теплообміну за часом руху стружки – $A = l_{ш.стр} \cdot (a_{стр} + b_{стр}) \cdot 2$, $l_{ш.стр} = t_{р.стр} \cdot v_{стр}$. При розрахунках за уточненою моделлю було отримано величину втрат тепла $\theta_{втр}$ від 0,1 до 1 °С щосекунди в залежності від параметрів умов обробки. Але якщо це врахувати за тривалістю процесу різання при обробці, то це вже можуть бути відчутні втрати, але які не перевищувати в середньому 1 – 2 %.

2.2 Розробка програми-тренажеру для вивчення впливу режимів різання на температуру різання

У наш час деякі вчені все частіше використовують технології комп'ютерного моделювання для організації досліджень [46, 47]. У роботі [46] дослідники використовують метод скінченних елементів при вивченні температури різання мікротекстурованих інструментів, що дозволило впливати на значення температури різання завдяки використанню різних форм та морфологій мікроструктур інструменту. Результати моделювання були перевірені експериментально методом термопар та підтверджена надійність методу моделювання. У науковій статті [47] проаналізовано результати термодинамічного моделювання процесу різання легованої сталі інструментами з нанесеними зносостійкими покриттями в програмному забезпеченні 2D/3D FEM. Автори наголосили, що використання технологій комп'ютерного моделювання дозволяє значно зменшити витрати на аналіз експериментальних досліджень, а отримання інформації на основі результатів моделювання є складним завданням під час експериментальних досліджень, а іноді й неможливим.

Частина питань дослідження, особливо на етапі прогнозування, може бути вирішена за допомогою комп'ютерного моделювання з використанням сучасних програмних продуктів, що також частково вирішить питання економії ресурсів та зниження впливу на навколишнє середовище [40, 48, 49].

В даному підрозділі буде описано створення програми-симулятора для автоматизації процесу розрахунку температури різання та візуалізації отриманих результатів у вигляді двовимірних та тривимірних графіків залежності температури різання від технологічних параметрів різання (t , f , n/v) та співвідношення пари «матеріал обробки – матеріал інструменту» за допомогою безкоштовного програмного забезпечення Scilab для порівняння з експериментальними даними отриманими при вимірюванні температури різання тепловізором.

При розробці тренажерної програми для автоматизованого розрахунку температури різання, з використанням програмного середовища Scilab [49], була використана модель, заснована на принципі вимірювання методом натуральної термопари. Схема роботи експериментального обладнання наведена на рисунку 2.3 [2, 50]. Оброблена заготовка затискається в губках патрона і притискається центром задньої бабки. Щоб мінімізувати кількість зайвих термопар, що виникають в місці з'єднання заготовки верстата, останню бажано ізолювати як від кулачків патрона, так і від задньої бабки. Інструмент також повинен бути ізолюваний від тримача інструменту ізоляцією. Мілівольтметр, з'єднаний з одного боку твердосплавною ріжучою вставкою, а дротом з ртутним ковзаючим кільцем. У процесі різання в місці контакту різних матеріалів внаслідок нагрівання виникає ТРС сила, яка фіксується мілівольтметром.

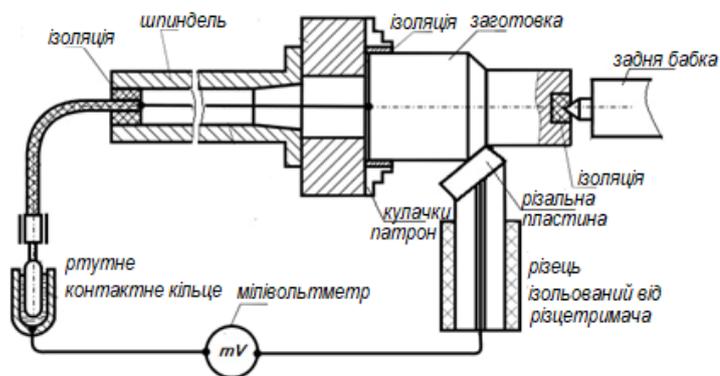


Рисунок 2.3 – Схема експериментального обладнання для вимірювання температури методом природної термопари [2]

Перед початком вимірювання мілівольтметр необхідно відкалібрувати в градусах Цельсія для перетворення отриманих даних в температуру. Це має вирішальне значення для отримання точних температур. Отримані експериментальні дані оброблялися за методом багатофакторного планування експерименту, а також отримували залежність температури різання від режимів різання. Ці залежності були взяті в якості математичної моделі для розробки програми (тренажера) [40, 50]. Як приклад, для порівняння було обрано чотири різні пари матеріалів «матеріал обробки – інструмент матеріал»: вуглецева конструкційна сталь 20 – твердий сплав (аналог С 22 – Р10); сталь 12Х18Н10Т (аналог AISI 321) – твердий сплав Р10; сталь 45 (аналог AISI 321) – Р10; сталь 40Х (AISI 5140 – Р01). Вибір матеріалів для зазначених пар пов'язаний з найбільш поширеним застосуванням в промисловості. Маркування оброблюваних матеріалів вказується в програмі відповідно до стандартів EN, а інструментальних матеріалів – відповідно до стандарту ISO 513:2012 [51].

Залежність температури різання від режимів різання [5]:

- для пари С22 – Р10:

$$T = 167 v^{0.44} t^{0.106} f^{0.2}, \quad (2.21)$$

де v – швидкість різання, в м/с,

t – глибина різку, мм,

f – швидкість подачі, мм/об;

- для пари AISI 321 – Р10:

$$T = 193 v^{0.189} t^{0.08} f^{0.109}, \quad (2.21)$$

- для пари С45Е – Р10:

$$T = 166.5 v^{0.4} t^{0.106} f^{0.2}, \quad (2.22)$$

- для пари AISI 5140 – P01:

$$T = 198 v^{0.21} t^{0.17} f^{0.15}. \quad (2.24)$$

Вхідними параметрами для автоматизованого розрахунку температури різання є кількість обертів оброблюваної деталі в хвилину, подача інструменту в міліметрах за оборот деталі, глибина різання в міліметрах, діаметр деталі в міліметрах і тип матеріалу деталі (рис. 2.4). Всі параметри можна варіювати в різних комбінаціях перед початком розрахунку.

Рисунок 2.4 – Користувальницький інтерфейс програми з полями введення даних

Для розрахунку довірчого інтервалу результату вимірювання температури користувачеві необхідно встановити значення довірчої ймовірності. Для розрахунку температури різання користувачеві потрібно натиснути кнопку [Розрахувати]. Після розрахунку температури різання в нижній частині вікна програми виводиться її числове значення T і значення довірчого інтервалу ϵ , а в окремому вікні (рис. 2.5) віртуального осцилографа з'являється графік зміни температури в процесі різання.

Число результатів вимірювань N , оброблялося в такій послідовності:

- ймовірне (допустиме) значення результату вимірювання температури різання є середнім арифметичним значенням зразка. Величина якого може бути визначена за такою формулою:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i); \quad (2.24)$$

- середньоквадратичне відхилення кореня від середнього значення обчислювалося за формулою S_0 :

$$S_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}; \quad (2.25)$$

- довірчий інтервал випадкової похибки результату вимірювання визначали за формулою:

$$\varepsilon = \pm t_c \cdot S_0, \quad (2.23)$$

де – коефіцієнт розподілу Стьюдента t_c .

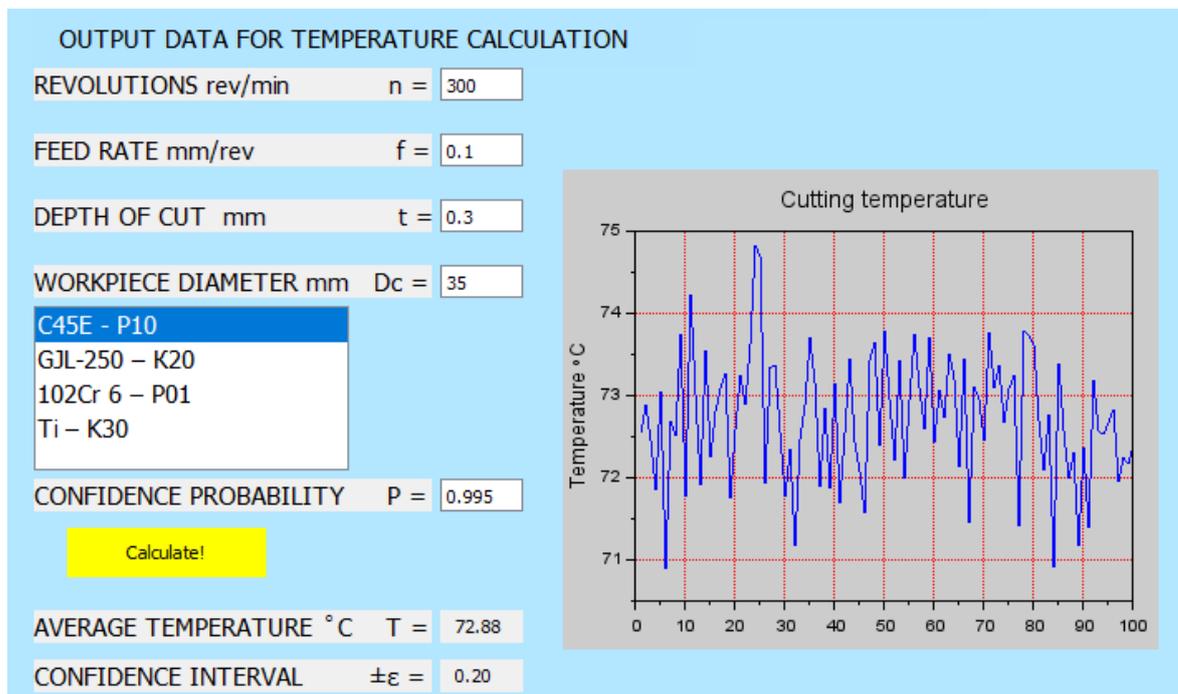


Рисунок 2.5 – Інтерфейс користувача після заповнення форми з усіма введеними даними і заповненими результатами розрахунку

В результаті обробки 100 результатів вимірювань обчислюється середнє значення температури різання і довірчий інтервал, що дозволяє записувати результат вимірювання.

За допомогою програми можна аналізувати залежність температури різання при зміні параметрів швидкості різання і подачі при заданому значенні глибини різання за допомогою графічної візуалізації залежності температури різання від швидкостей різання і подачі.

Для візуалізації результатів програми представлені двовимірні графіки залежності температури різання від режимів різання для широко використовуваних матеріалів в галузі машинобудування та типових діапазонів режимів різання для їх обробки (рис.2.5). Слід зазначити, що до цієї програми можна додавати нові визначені залежності з появою нових досліджень впливу режимів обробки на температуру різання на раніше недосліджувані пари «оброблюваний матеріал – інструментальний матеріал».

При виконанні аналізу температури інженерами або дослідниками ця програма дозволяє зробити графічну візуалізацію, що дає можливість оцінити можливий діапазони температур, що виникають в процесі різання для різних пар матеріалів, а також змінні величини подачі і швидкості різання. Як відомо, температура різання істотно впливає на знос різальної частини інструменту і на якість оброблюваної поверхні, тому розуміння можливих температурних діапазонів при різних умовах обробки є важливим. За результатами моделювання температури для заданих пар матеріалів температура вище при роботі з більшою швидкістю різання і подачі, а також що за рахунок зміни параметрів подачі і швидкості різання можна досягти бажаних температурних діапазонів, які здатні забезпечити роботу інструменту в нормальному стані і необхідні параметри якості оброблюваної поверхні. Для деталізації отриманих значень параметрів при побудові двовимірних графіків, дана програма дозволяє змінювати масштаб в графічному вікні, щоб дати можливість для більш ретельного аналізу отриманих залежностей в графічному вигляді.

2.3 Методики оцінювання метрологічних характеристик тепловізійного контролю

Враховуючи складність теплових процесів у зоні різання, детально описаних в попередніх підрозділах, важливим є вирішення питань, пов'язаних з визначенням методики оцінювання метрологічних характеристик вимірювання температури в зоні різання. Окрім вимог до точності вимірювання температури в зоні різання для тепловізійного контролю, на відміну від інших методів, треба враховувати й складність проведення досліджень, наприклад, таких як нестаціонарність процесу різання та правильність інтерпретації отриманої радіометричної інформації та ін. Визначимо характеристики об'єкту дослідження за умов обробки, такі як: висока температура по відношенню до температури навколишнього середовища (температурний контраст); нестаціонарність процесу різання – зростання температури різання з часом, динамічність – зміщення зони різання в просторі; розмір зони дослідження; випромінювальна здатність оброблюваних матеріалів та ін. можуть призводити до ускладнень в процесі оцінювання теплового стану процесів механообробки, як на виробництві, так і під час проведення досліджень в лабораторіях, що в свою чергу буде впливати на точність та достовірність отриманої інформації за результатами вимірювань. Враховуючи вищенаведене, необхідно відповісти на питання, як правильно оцінювати метрологічні характеристики окрім технічних характеристик вимірювальних приладів.

Настроювання характеристик вимірювальної системи для забезпечення показників з метою отримання відповідних величин температури, з врахуванням конкретних умов, здійснюється за допомогою вбудованого програмного забезпечення та інтерфейсу приладу. За допомогою інтерфейсу для забезпечення адекватності отримуваної інформації встановлюється температура середовища, температура відбиття, коефіцієнт випромінювання об'єкту дослідження, відстань зйомки та відносна вологість. Визначення відносної вологості відбувалось за допомогою гігрометра, температура середовища – термометру. Для встановлення коефіцієнту випромінювання використовувались дані з довідкової літератури та

рекомендацій від виробників Flir та UNI-T. Визначення температури відбиття відбувалось за допомогою методу із застосуванням рефлектору, описаного в стандарті ISO 18434-1:2008.

Як правило, технічні та основні метрологічні характеристики для тепловізорів надаються фірмами виробниками у супроводжувальній документації на прилад, в паспорті або специфікації. Така інформація доволі часто не є повною, а іноді, наприклад, для проведення досліджень треба звертатися до виробника за додатковою інформацією, що не зовсім є зручним. Розглянемо детальніше ці параметри. В таблиці 2.1 наведено порівняльні основні характеристики для тепловізорів різних моделей від виробників Flir і UNI-T, які використовувались в цьому дисертаційному дослідженні [52 – 55].

Таблиця 2.1 – Основні метрологічні та технічні характеристики тепловізорів

Назва характеристики	Значення для моделі тепловізора		
	Flir E8	UNI720E	Flir 640P
1	2	3	4
Метрологічні характеристики			
Діапазон температур камери	20...+250 °C	-20°C... 550°C	-40...+500 °C
Точність	±2 °C (0...100°C) ±2 % (100...250°C)	±2°C або ±2% (більше з двох значень)	±2°C або ±2% (більше з двох значень)
Спектральний діапазон	7,5...13 мкм	8...14 мкм	7,5...13 мкм
Теплова чутливість (NETD)	≤50 мК при 30 °C	≤50 мК	≤30 мК при 30 °C
Поле зору (FOV)	45° × 34°	56° × 42°	45° × 34
Фокусування	0.5 м	вільне	ручна, автоматична
Просторова роздільна здатність (IFOV)	2,6 мрад	3,8 мрад	1,3 мрад
Корекція емісійності (регулюється)	0,1...1,0	0,1...1,0	0,01...1,0
Технічні характеристики			

1	2	3	4
ІЧ-роздільна здатність	320 × 240 пікселів	256 × 152 пікселів	640 × 480 пікселів
Цифрова камера, роздільна здатність	640 × 480 пікселів	640 × 480 пікселів	3,2 мегапікселя автофокус с відеолампой
ІЧ детектор	(мікроболометр), неоохолоджуваний		
Вологість	95 %	95 %	95 %
Частота кадрів	≤9 Гц	≤25 Гц	≤30 Гц
Цифровий зум	-	2×, 4×	до 8×, можливість панорамної зйомки
Запис відео	-	-	так
USB передавання інформації	-	так	так

Зовнішній вигляд камер, які використовувались для досліджень, наведено рисунках 2.6 – 2.8.



Рисунок 2.6 – Тепловізійна камера Flir E8 (передавання інформації на комп'ютер для опрацювання термограм)

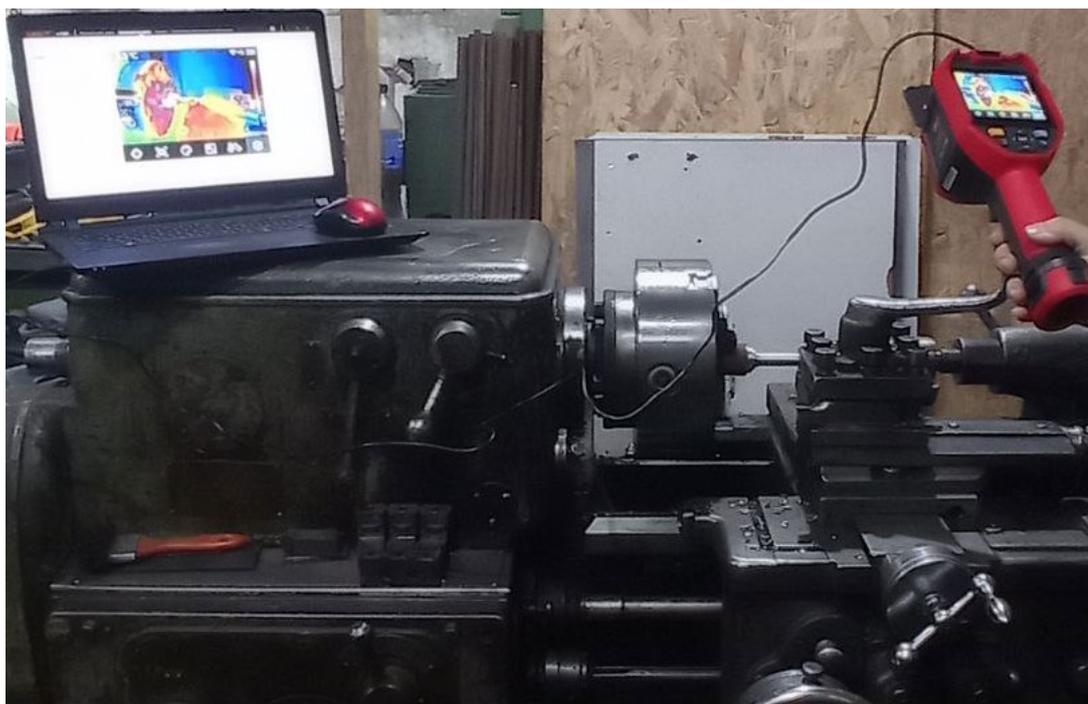


Рисунок 2.7 – Тепловізійна камера UNi720E (передавання відзнятої інформації через USB)



Рисунок 2.8 – Тепловізійна камера Flir R640 з ІЧ-термометром та зондом термопары К-типу

Безумовно варто відмітити, що такі основні характеристики як теплова чутливість (NETD), поле зору (FOV), просторова здатність (IFOV), можливість фокусування, внесення корекції емісійності безпосередньо впливають на точність та адекватність отриманих результатів вимірювання, але слід також розуміти, що ці показники від виробника, вказані в документації, за умови лабораторних проведення досліджень. На практиці, точність отриманих величин залежить від заданих температур сцени та впливу умов спостережень (фон сцени, емісійність, кут спостереження та ін.) Тож, для оцінювання впливу цих параметрів на результати вимірювань, розглянемо зазначені характеристики використовуваних камер для проведення експериментів детальніше.

2.3.1 Просторова роздільна здатність та поле зору

Для адекватного визначення метрологічних характеристик одним з важливих моментів є розуміння специфіки виконання термографічного контролю при точінні, а також розуміння послідовності етапів і умов проведення вимірювань, необхідних для отримання достовірної експериментальної інформації. На відміну від контактних методів вимірювання температури, які дуже добре забезпечені ЗВТ та за якими достатньо добре висвітлені метрологічні питання [6], методи вимірювання температури за допомогою застосування ІЧ-техніки, які гуртуються на теорії о тепловому потоці та його щільності, на жаль станом на сьогодні не містять рекомендацій з метрологічного забезпечення та методик вимірювання для сфери механообробки. А відповідно розкриття основних термінів, умов проведення тепловізійних досліджень та методик визначення їх метрологічних характеристики є актуальним завданням.

Для отримання адекватних результатів вимірювання при тепловізійному контролі необхідно знати співвідношення розмірів точок та розмірів зони проведення досліджень на об'єкті. Це напряму пов'язано з метрологічними характеристиками самої камери – роздільною здатністю та полем зору. Відповідно розглянемо ці питання детальніше. Співвідношення розмірів точок – це метрика, яка визначає відстань з якої можна виконати точне вимірювання температури

об'єкту з урахуванням його певних розмірів. Як пов'язані розмір пікселя детектора тепловізора з геометричними аспектами просторової роздільної здатності вимірювання показано на рисунку 2.9. На рисунку показано тепловізор, розміщений горизонтально на відстані d від умовного об'єкту дослідження (умовна поверхня), площа якого розбита на сітку елементів розміром $HFOV$ по горизонталі та розміром $VFOV$ по вертикалі. Кожен такий прямокутник цієї сітки це піксель матриці з розмірами x та y , який за своїми розмірами відповідає певній зоні вимірювання.

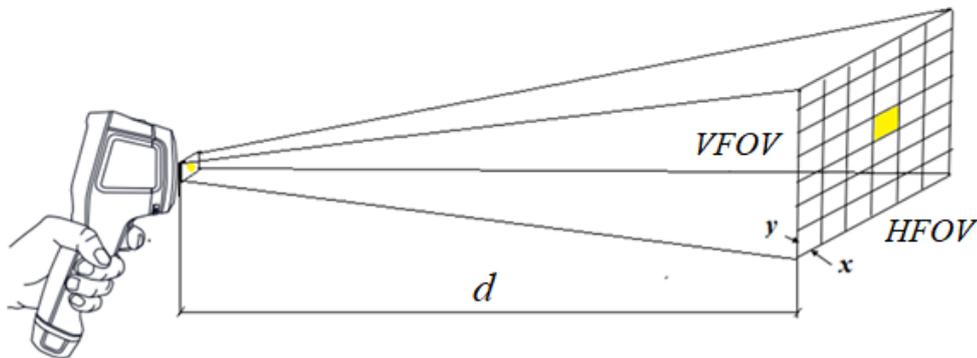


Рисунок 2.9 – Схема для визначення просторової роздільної здатності (IFOV)

Ці розміри x та y залежать від величини відстані d , які визначають роздільну здатність вимірювань. Кожному такому пікселю відповідатиме температура на поверхні об'єкта дослідження. Кількість таких пікселів по вертикалі та горизонталі визначає роздільну здатність яка вказується в технічних характеристиках камер $N_H \times N_V$, наприклад для моделі Flir E8 – 320x240. Піксель детектора розміщений в центрі та позначений жовтим кольором бачить об'єкт, окрім лінійних розмірів x та y характеризується ще кутовим розміром, який умовно позначають як IFOV. Зазвичай в специфікації до приладу ця величина IFOV зазначається в мілірадіанах (див. табл. 2.1). Розмір, який бачить один піксель на об'єкті прямо пропорційний відстані, на якій розташовано камеру та значенню IFOV:

$$P = d \cdot IFOV, \quad (2.28)$$

$$IFOV = \frac{HFOV}{N_H} = \frac{VFOV}{N_V}. \quad (2.29)$$

Як зазначено в джерелах [55, 56] для проведення вимірювань температури об'єкта з максимальною точністю має бути задіяно максимальну кількість пікселів детектора тепловізора, що дозволить отримати більш детальну теплову картину. Зауважимо, що не завжди можна підійти до об'єкта максимально близько, по перше це може бути пов'язано з встановленням обмеження самого приладу (мінімальна відстань), а по друге – це може бути пов'язано і з самим об'єктом. Але існує правило визначення співвідношення розміру пікселя та області дослідження на об'єкті і це пов'язано з тим, що для забезпечення надійності вимірювань розмір області дослідження має перекривати не один, а декілька пікселів. Це правило проілюстровано на рисунку 2.10. У джерелах [55 – 57] зазначено, що кількісно це має бути або 3×3 або 5×5 , тобто щонайменше це має бути 9 пікселів. Зрозуміло що чим більше пікселів покривають область дослідження тим результати будуть краще, а похибка окремого детектора менша, що дозволить уникнути спотворення результатів вимірювань через змішування сигналу та шуму від фону. Як показано на рисунку якщо пляма відбитку на об'єкті має розміри менше ніж один піксель, то вимірювання проведено некоректно, інформація яка реєструється 1 пікселем буде спотворена через змішування з температурою фону (рис. 2.10, в), у випадку коли розмір плями покриває 1 піксель – вимірювання можуть бути припустимими, але не бажаними із похибкою, яка може бути значною (рис. 2.10, б) і у випадку коли пляма покриває розміри 3×3 пікселі – вимірювання вважають коректними.

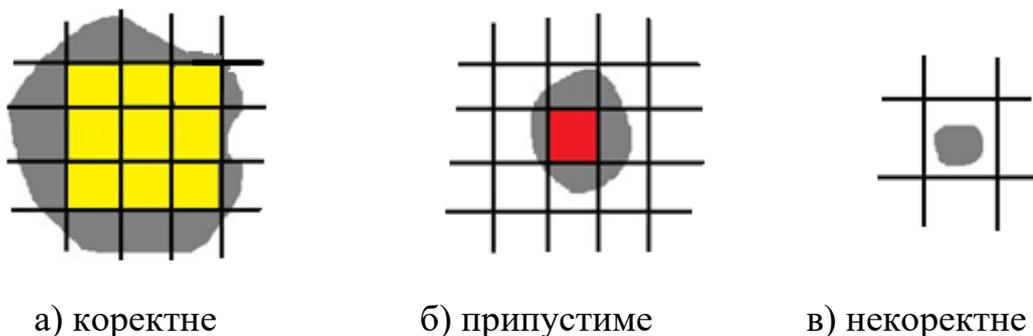


Рисунок 2.10 – Зображення коректних, припустимих та некоректних вимірювань

Це правило використовують у практиці проведення досліджень в різних сферах промисловості та також медичній сфері й враховується при виборі відстані до об'єкта дослідження з урахуванням параметрів оптики приладу.

При виконанні тепловізійних досліджень в реальних умовах, дослідники користуються значеннями для зазначених характеристик, наданих фірмою виробником в супроводжувальних документах або на сайтах з підтримки (support), тобто спираються на данні, які було отримано в ідеальних умовах калібрувальних лабораторій. На практиці ж відстань до об'єкту та кут спостереження можуть значно спотворювати отриманий результат. Варто відмітити, що відстань до об'єкту встановлюється за допомогою програмного інтерфейсу на самій камері і не завжди ця відстань може бути встановлена саме та, яка необхідна для проведення вимірювань, тобто залежить від обмежень самої камери (наприклад, обмеження до 1 м). Чому варто враховувати ці характеристики – тому що розміри зони за якою спостерігають залежить як від відстані, з якої проводять спостереження так і від оптики самої камери. Ця зона спостереження носить назву поля зору FOV і саме цей параметр відповідає за просторову (геометричну) здатність тепловізійної камери. FOV в специфікаціях вказуються як кутовий розмір $HFOV \times VFOV$, наприклад, для камери Flir 640P – $24^\circ \times 18$ (таблиця 2.1). В ідеалі такі кутові розміри зберігаються у випадках, коли камера розташована перпендикулярно (під кутом 90° до об'єкту і тоді проекція кутового розміру сцени за горизонталлю H_{FOV} (м) та проекція кутового розміру сцени за вертикаллю V_{FOV} (м) буде визначатися за формулами, поданими нижче [25]:

$$H_{FOV} = h \cdot \sin HFOV, \quad (2.30)$$

$$V_{FOV} = h \cdot \sin VFOV, \quad (2.31)$$

де h – дистанція, з якої здійснюється зйомка, м.

За сутністю, на цих проекціях ми будемо бачити сенсорну площину DAS, тобто індивідуальні пікселі інфрачервоної матриці. Але на практиці кут 90° , який

прийнято називати кутом депресії [34], не завжди може бути реалізований при проведенні досліджень. На це може впливати, наприклад, або недоступність зйомки під цим кутом через складність форм об'єкту, або через зміни випромінювальної здатності (спотворення через відбиття). Зменшення цього кута призводить до зміни форми пікселів, що безумовно впливатиме на точність результату. Згідно з рекомендаціями, які є в професійній літературі із застосування інфрачервоної техніки при дослідженнях [34 – 36] – для контролю металевих поверхонь з метою уникнення ефекту відбиття необхідно проводити «косі» спостереження, але слід відмітити, що ці рекомендації дуже різняться за своїми значеннями кутів. Напевно це пов'язано зі специфікою самих об'єктів дослідження. Тому розглянемо схему геометрії огляду для визначення впливу кута депресії на відбиток V проєкції вертикального поля зору V_{FOV} (рис. 2.11).

Величину V можна визначити, скориставшись формулою [27]:

$$V = h \cdot \left(\frac{1}{\tan(\psi - V_{FOV}/2)} - \frac{1}{\tan(\psi + V_{FOV}/2)} \right) \quad (2.32)$$

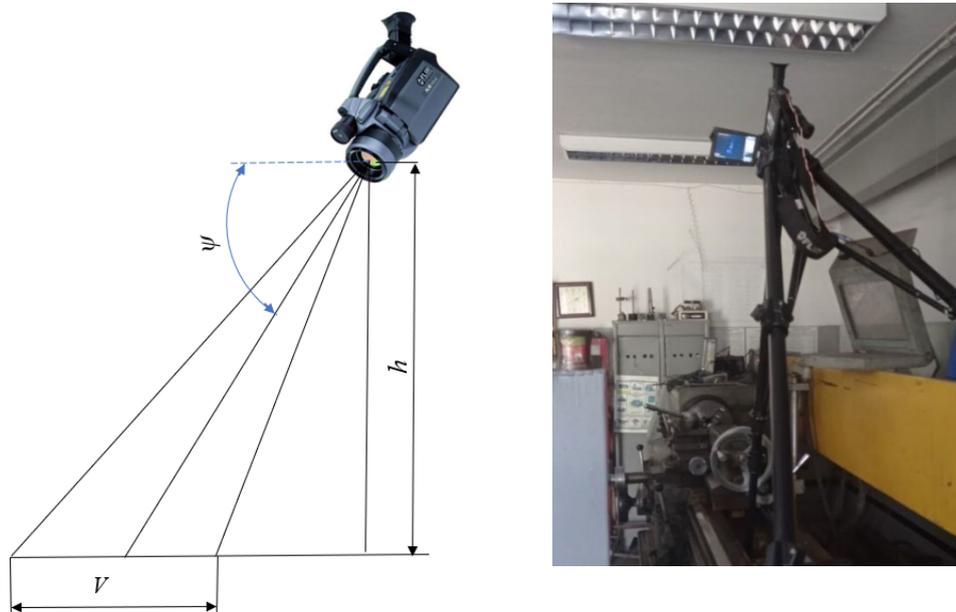


Рисунок 2.11 – Геометрія вертикального огляду при зйомці з кутом депресії ψ (ліворуч); тепловізійна камера Flir P640 під час проведення досліджень (праворуч)

Аналогічним чином можна отримати залежність для визначення величини відбитку H проекції горизонтального поля зору H_{FOV} від кута депресії:

$$H = \frac{2 \cdot h \cdot \left(\frac{H_{FOV}}{2} \right)}{\sin \psi}. \quad (2.33)$$

Проведення відповідних розрахунків для визначення величин, які дають розуміння наскільки відбувається спотворення проекцій кута зору при спостереженні під варіюванням кута нагляду з послідовною побудовою графіків, допомагає візуально дослідникам перевірити правильність вибору діапазону кута депресії або відкоригувати ці значення, або врахувати це при здійсненні геометричної корекції термограм та також врахувати вплив цього кута при оцінюванні точності результатів вимірювання та невизначеності вимірювання. Тож відповідні розрахунки та їх графічна візуалізація будуть наведені в четвертому розділі.

2.3.2 Теплова чутливість тепловізору NETD

Згідно з джерелами [58 – 60], термін – еквівалентна шуму різниця температур NETD визначено як відношення сигнал/шум, який представляє різницю температур, що створює сигнал, рівний часовому шуму камери, іншими словами це мінімальна різниця температур, яку може розрізнити камера. В специфікаціях на камери ця величина зазначається як теплова чутливість або термочутливість [25] і часто сприймається не зовсім коректно. У деяких випадках ця величина використовується для опису точності вимірювання, але насправді мало що говорить про фактичну похибку вимірювання. Це пов'язано з тим, що цей параметр вказаний в специфікації, було визначено за умов проведення вимірювань в контрольованому середовищі калібрувальної лабораторії на короткій відстані розташування камери до об'єкта та за відсутності джерел, які безпосередньо мають можливість спотворювати отримуваний результат вимірювань, тобто ці результати

відповідатимуть встановленим в специфікації лише за умови відтворення «ідеальної» моделі вимірювань, що на практиці у виробничих умовах не зовсім є можливим.

В різних джерелах можна віднайти різні формули для визначення величини NETD. Так, наприклад, автором книги [27] було наведено формулу отриману на основі співвідношення сигнал / шум:

$$NETD = \frac{V_{RMS}}{\Delta V / \Delta T}, \quad (2.34)$$

де V_{RMS} – середньоквадратичне значення шуму;

$\Delta V / \Delta T$ – значення вихідної напруги сигналу від зміни температури об'єкту.

Авторами джерела [25] наведено формулу для визначення величини NETD на основі температур чорного тіла.

$$NETD = \frac{T_{ob} - T_o}{\Delta U_s / U_n}, \quad (2.35)$$

де T_{ob} – температура чорного тіла (або тестового об'єкту);

T_o – температура фону;

ΔU_s – приріст сигналу;

ΔU_n – шумова напруга.

В лабораторних умовах температура чорного тіла дорівнює 30 °С, температура фону приблизно 22 °С, тобто в різниця десь складає 8 °С.

Варто відмітити, що обидві формули використовуються дослідниками або співробітниками лабораторій. Перший підхід реалізовано для теоретичного узагальнення залежності зазначеної характеристики від складових та зазначається: «що при збільшенні температури фону відбувається зменшення NETD» звідки впливає що NETD є функцією температури фону. Також автором наведено залежність яка показує, що NETD залежить від числа f-number та оптики

тепловізору, тобто зі зміною лінзи (іншою величиною f) змінюється і величина NETD. Також показано, що на NETD впливає величина спектральної довжини хвилі, оскільки кожний детектор окремого тепловізора призначено для роботи в конкретному спектральному діапазоні. Перший підхід описує NETD як характеристику самої ІЧ-системи та може бути використаний дослідниками з метою побудови або пошуку шляхів вдосконалення при створенні ІЧ-систем. Другий акцентує увагу на практичному використанні, наприклад, з метою порівняння характеристик різних моделей тепловізорів або для визначення зміни цієї характеристики в реальних виробничих/експериментальних умовах з урахуванням впливу дії навколишнього середовища, нестабільності об'єкта дослідження. Також може використовуватись в цілях проведення технічної діагностики або для перевірки та встановлення відповідності зазначеним параметрам (на практиці часто ця величина вище ніж заявлена у специфікації). Авторами [25] також представлено спрощену методику оцінювання для NETD як середньої температури для областей з однорідною температурою, може бути використано при оцінці дефектів виробів.

В класичних методиках визначення NETD описаних в літературі або відповідних стандартах зазвичай оцінювання характеристики здійснюють для серії зображень при стабільній температурі об'єкта (для лабораторних досліджень використовують чорне тіло). Стандартне відхилення сигналу (типова оцінка шуму в часі) розраховується за формулою [25, 27]:

$$\sigma_{x,y} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (S_i(x,y) - \bar{S}(x,y))^2}, \quad (2.36)$$

де $S_i(x,y)$ – сигнал у пікселі (x,y) i -му кадрі,

$\bar{S}(x,y)$ – середній сигнал у цьому пікселі по всіх кадрах,

$\sigma_{x,y}$ – шум у цьому пікселі.

Величина NETD середнього шуму по зображенню термограми:

$$NETD = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2}}{\frac{\Delta S}{\Delta T}}, \quad (2.37)$$

де ΔS – відповідна зміна сингала;

ΔT – відповідна зміна температури об'єкта.

Враховуючи, що вимірювання температури для нашого об'єкту дослідження відбуваються в умовах нестационарності процесу, температури в процесі обробки становлять 200 °C, 300 °C і вище й немає можливості отримати ці дані за якийсь час в сталому стані, що впливатиме на точність результатів вимірювання, доцільно для визначення цієї характеристики, і для розуміння яка буде ця величина при температурах вище ніж за умови проведення випробувань в калібрувальних лабораторіях та для уточнення заявлених параметрів NETD виробниками тепловізорів (для температур вище 100 °C складає $\pm 2\%$) здійснювались наступні дії. Заготовки нагрівались в печі до температури 100, 150, 200, 250 °C з послідовним вимірюванням температури за допомогою тепловізорів. Отримані серії по 10 термограм з фіксованою температурою нагріву у муфельній печі, опрацьовувались у відповідних програмних середовищах фірм виробників. У файлі формату CSV для вибраної області кадру ROI розміром 100x100 пікселів на об'єкті з термограми, обчислювались середні значення ROI за всіма кадрами. Враховуючи що файл CSV містить у кожному пікселі величину температури, то відповідно формула для розрахунку NETD спрощується до вигляду $NETD = \sigma_T$ та після перетворень має вигляд:

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2}, \quad (2.38)$$

де σ_T – стандартне відхилення температури для зони інтересу ROI (100 пікселів) при сталій температурі об'єкту, °C;

T_i – температура i -го пікселя зони інтересу ROI, °C;

\bar{T} – середня температура всіх пікселів зони інтересу ROI, °C;

N – кількість пікселів зони інтересу ROI.

Для того, щоб оцінити зміну температури за часом для випадку застосування камер з можливістю зйомки відео (у нашому випадку FLIR P640) коли кадри досить швидко змінюються (1 кадр – 0,995 мс) та приріст температури сягає за перші секунди понад 100 °C і вище в залежності від умов обробки, на наш погляд, доцільно визначати тренд зміни температури $T(t)$, з урахуванням стрімкого підйому на початковому етапі та вихід на плато з уповільненим зростанням. Після цього здійснюється апроксимація та якість апроксимації перевіряється за допомогою коефіцієнту детермінації R^2 .

Варто відмітити, що вибір моделі апроксимації у відповідності до об'єкту має добре описувати фізичні процеси теплопередачі (теплопровідність, конвекція, випромінювання) [5, 61, 62]. Найчастіше дослідники для опису процесів теплопередачі механообробки користуються експоненціальними або логарифмічними моделями для теоретичного або емпіричного / експериментального опису. Якщо фізичний процес теплопередачі складно описати за допомогою однієї моделі апроксимації, то на практиці користуються поділом на фази (наростання, стабілізації та наявності спаду) з комбінацією різних локальних моделей, які найкраще відповідатимуть фізиці процесу, наприклад *spline*-апроксимацію за допомогою опрацювання програмного засобу MATLAB. Так, наприклад, у роботі [61] розглянуто проблеми розробки моделей зниженого порядку з використанням належного узагальненого розкладання для перехідних теплових задач зі специфічним обробленням рухомого джерела тепла в рамках зниженої моделі для адитивного виробництва.

Величина коефіцієнту детермінації R^2 за апроксимацією експериментальних даних вказує на відхилення експериментальних точок від моделі, що може бути оцінено як вклад у невизначеність.

2.4 Методика оцінювання невизначеності вимірювання температури методу інфрачервоної термографії на прикладі тепловізійного контролю процесу точіння

В цьому підрозділі після обговорення методик визначення метрологічних характеристик доцільно розглянути їх вплив на точність отриманого результату. Згідно з визначенням, поданим у GUM [63, 64]: «Точність вимірювання – це близькість узгодження між результатом вимірювання та істинним (або прийнятим за істинне) значенням вимірюваної величини». Саме поняття невизначеності вимірювання розглядають в загальному сенсі, що пов'язане з будь-яким вимірюванням як при ухваленні обґрунтованих рішень, так при виконанні теоретичних досліджень.

Відповідно, на точність тепловізійних вимірювань буде впливати наступні складові пов'язані з:

- параметрами точності самого приладу;
- характеристиками об'єкту дослідження;
- умовами передачі сигналу від об'єкту до приладу.

Перша та друга складові вже описані в попередніх підрозділах. Розглянемо детальніше третю. Відомо, що об'єкт випромінює енергію залежно від своєї температури та випромінювальної здатності, але частина енергії не випромінюється, а відбиває фонову (від освітлення та інших об'єктів сцени). Атмосфера, частково поглинає та випромінює сама, що додає шум (та робить внесок до оцінки невизначеності) і весь цей «змішаний» сигнал потрапляє до камери [25, 26]. При проведенні кількісної термографії всі ці складові мають бути враховані для отримання точної температури. Авторами також наведено модель функції вимірювання температури ІЧ-камерою:

$$T_{об} = f(\varepsilon_{об}, T_{атм}, T_{відб}, w, d). \quad (2.39)$$

Ця залежність визначає температуру об'єкту $T_{об}$ як функцію п'яти змінних: випромінювальної здатності об'єкту $\varepsilon_{об}$, температури навколишнього середовища $T_{атм}$, температури відбиття $T_{відб}$ (на відстанях спостереження до 1 м може бути встановлена така саме, як температура навколишнього середовища), відносної вологості w та відстані до об'єкту d . Саме цю модель використовують виробники для забезпечення можливості здійснення корекції радіометричної інформації користувачем в програмному забезпеченні тепловізорів. Важливо щоб всі зазначені параметри були визначені максимально точно для внесення користувачем до програмного забезпечення приладу. Похибка має вагомe значення для оцінки точності будь-якого методу, і звісно тепловізійного теж. Особливо варто зазначити, що температура яку ми бачимо на дисплеї тепловізора та в зчитуваних файлах з мета-даними – це результат складного обчислювального алгоритму кожної камери. Відомо, що формула моделі функції вимірювання температури ІЧ-камерою, наведена вище – є спрощеною, а більш детальна інформація про обчислювальні алгоритми не надається виробниками і не оприлюднюється у відкритому доступі. Всі вище наведені параметри мають відношення до формування систематичних похибок.

Один з найважливіших параметрів є коефіцієнт випромінювальної здатності який в різних джерелах визначається як функція залежності від багатьох складників:

- наприклад в роботах [25, 26] $\varepsilon = f(\lambda, \psi, T)$, як функція довжини хвилі λ , на якій вимірюється ІЧ випромінювання, кута спостереження ψ , та температури об'єкту T ;
- в дослідженні [31] $\varepsilon = f(\lambda, T_{об})$, як функція довжини хвилі λ , на якій вимірюється ІЧ випромінювання та температури об'єкту $T_{об}$;
- також в рекомендаціях фірм-виробників зазначається, що коефіцієнт випромінювання залежить від матеріалу досліджуваного об'єкту та стану його поверхонь.

Як відомо, під результатом вимірювання розуміють набір можливих значень, які приписуються вимірюваній величині на підставі наявної інформації [25, 63, 65], а сам результат вимірювання складається з двох частин – значення величини, отриманого за результатами вимірювань і невизначеності вимірювань. При цьому, під невизначеністю вимірювань сприймають чисельну оцінку ступеня довіри до проведеного виміру і отриманого вимірюваного значення величини, іншими словами, оцінку якості вимірювань [68].

Невизначеності, які спричинені недосконалістю самих приладів, пов'язані з їх точністю та обмеженнями, наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. – Інструментальна складова невизначеності вимірювань

Позначення складової невизначеності	Характеристики, які впливають на точність	Інструментальні похибки для моделей тепловізорів		
		Flir E8	UNi720E	Flir 640P
$u_{пр}$	Точність (похибка)	$\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (0...100 $^{\circ}\text{C}$) $\pm 2\text{ }%$ (100...250 $^{\circ}\text{C}$)	$\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ або $\pm 2\text{ }%$ (більше з двох значень)	$\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ або $\pm 2\text{ }%$ (більше з двох значень)
u_{NETD}	Теплова чутливість (NETD)	$\leq 50\text{ мК}$ при 30 $^{\circ}\text{C}$	$\leq 50\text{ мК}$	$\leq 30\text{ мК}$ при 30 $^{\circ}\text{C}$

Дані представлені виробником u_{NETD} наведено для температури об'єкту 30 $^{\circ}\text{C}$. Уточнену невизначеність, пов'язану з тепловою чутливістю u_{NETD} для камер, представлених в таблиці 2.2, може бути оцінено з урахуванням впливу температурної нестабільності об'єкту (за умовами калібрувальної лабораторії – 30 $^{\circ}\text{C}$) за умов експериментального визначення області інтересу ROI:

$$u_{NETD} = \frac{\sigma_T}{\sqrt{2 \cdot (N - 1)}} \quad (2.40)$$

Величина σ_T визначається за формулою 2.38.

Стандартна невизначеність приладу $u_{\text{пр}}$ згідно з специфікацією оцінюється за формулою, обирається найбільше з двох отриманих значень:

$$u_{\text{пр}} = \left(\frac{\pm a_{\text{пр}}}{\sqrt{3}}, \frac{\delta_{\text{сп}}(T)}{\sqrt{3}} \right) \quad (2.41)$$

де $\delta_{\text{пр}}(T)$ – фіксована похибка приладу похибка приладу у відсотках від зазначеної величини температури вимірювання;

$a_{\text{пр}}$ – фіксована похибка приладу з інтервалу $[+ a; - a]$;

$\sqrt{3}$ – для рівномірного закону розподілу.

Внесок від температури відбиття для оцінювання загальної невизначеності вимірювань може бути оцінений у відповідності до підходів GUM [63] та визначеному у джерелі [25]. Спрощена залежність, яка подана нижче визначена як аналітична складова для визначення впливу температури відбиття з моделі розподілу випромінювання:

$$\frac{\partial T}{\partial T_{\text{відб}}} = 1 - \varepsilon, \quad (2.44)$$

відповідно:

$$u_{T_{\text{відб}}} = (1 - \varepsilon) \cdot u(T_{\text{відб}}), \quad (2.43)$$

$$u(T_{\text{відб}}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{i\text{відб}} - \overline{T_{\text{відб}}})^2}{N - 1}}. \quad (2.44)$$

Для визначення $T_{\text{відб}}$ в ході проведення експериментів використовували методику [69], після чого розраховувалась середня величина з 3 – 5 вимірювань (рекомендація згідно вимог стандарту ISO 18434 $N=3$). З формули (2.42) видно, що

чим нижче ε тим більше вплив буде оказувати $T_{\text{відб}}$. Відбувається це тому, що частина сигналу отримана тепловізором дійсно є фоновим відбитим випромінюванням, але якщо врахувати що $T_{\text{відб}} \ll T_{\text{об}}$ та за відсутності інших джерел такого рівня ($\approx T_{\text{об}}$) то відбитий сигнал буде слабкішим, а його енергія в ГЧ-діапазоні набагато менша у порівнянні з об'єктом дослідження. Цей висновок також підтверджується наступною залежністю в спрощеному вигляді щодо енергії $E_{\text{сер}}$ яка сприймається тепловізором:

$$E_{\text{сер}} = \varepsilon \cdot E \cdot (T_{\text{об}}) + (1 - \varepsilon) \cdot E \cdot (T_{\text{відб}}). \quad (2.45)$$

У випадку застосування тепловізійних відеокамер оцінювання невизначеності зміни температури за часом $T(t)$ здійснювалося на основі радіометричної інформації, отриманої за результатами експерименту. Після візуалізації залежності зміни температури за часом $T(t)$ виконувалась апроксимація, наприклад, за допомогою логарифмічної функції з оцінкою залишкових відхилень між вимірюваними значеннями та значеннями отриманими з моделі. Залишки апроксимації визначалися за формулою:

$$e_i = T_{\text{експ.}i}(t_i) - T_{\text{мод.}i}(t_i). \quad (2.46)$$

Стандартна невизначеність вимірювань T_e , пов'язана з апроксимацією моделі:

$$u_{T_e} = \sqrt{\frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^n e_i^2}. \quad (2.47)$$

де n – кількість вимірюваних точок;

m – кількість параметрів моделі;

e_i – залишки апроксимації.

Стандартна невизначеність оцінювалась через стандартне відхилення залишків моделі.

Для оцінювання впливу навколишнього середовища (наприклад, наявність пилу спричиняє забруднення оптики та повітря) можна скористатися оцінкою меж розкиду або результатами вимірювань, отриманих за методикою визначення концентрації частинок пилу за допомогою тестера «Walcom НТ-9600» [39]. Отримані значення масової концентрації частинок пилу в одному м³ повітря виробничих приміщень і середнє арифметичне значення A_i розрахункової концентрації частинок в кожній точці відбору проб не повинні перевищувати гранично допустимого числа частинок, яке передбачено для виробничих приміщень певного класу небезпеки (для умов роботи з металами за змінами – 1...6 мг/м³). При здійсненні тепловізійних досліджень даний показник знаходився в нормі та не перевищував 1,5 мг/м³, що відповідає вимогам для здійснення тепловізійної зйомки.

Після аналізу джерел невизначеностей необхідно, якщо це потрібно, звести всі невизначеності до одиниць результату вимірювань, °С. Далі здійснюють оцінювання комбінованої стандартної невизначеності:

$$u_c = \sqrt{u_{\text{пр}}^2 + u_{\text{NETD}}^2 + u_{\text{T}_{\text{відб}}}^2 + u_{\text{T}_e}^2}. \quad (2.48)$$

Розрахунок розширеної невизначеності здійснюють за формулою [63]:

$$U = k \cdot u_c \quad (2.49)$$

Враховуючи вищевказане, можна констатувати, що результат вимірювань може бути спотворено багатьма факторами, також при використанні камери достатнього рівня точності за певних умов проведення цих вимірювань [63, 70, 71]. Тому кожний результат отриманий методом кількісної термографії має бути

проаналізований, а користувачі цих приладів мають мати досвід та вміння правильно інтерпретувати радіометричну інформацію з отриманих термограм.

Висновки до розділу 2

Для підвищення інформативності та достовірності результатів тепловізійного спостереження було визначено підхід до моделювання теплового стану зони різання на основі рівняння теплопровідності з урахуванням початкових та крайових умов. Описано спрощену математичну модель для верифікації експериментальних температур отриманих методом тепловізійного контролю. Запропоновано ввести коригувальний коефіцієнт, отриманий на основі лінійної регресійної моделі, який враховує зміни геометрії зрізаного шару із зміною режимів різання та вплив зміни форми стружки, що дозволяє уточнити складові приросту температури для джерел тепла в первинній та вторинній зонах деформації.

Розроблено програмний тренажер, що дозволяє аналізувати залежність температури різання при зміні параметрів швидкості різання і подачі при заданому значенні глибини різання для різних комбінацій пар «оброблюваний матеріал – матеріал різального інструменту» за допомогою графічної візуалізації залежності температури різання від параметрів режиму різання. Ці залежності були отримані в результаті план-факторного експерименту з використанням методу природньої термопари, що дозволяє використовувати дану програму на етапі моделювання з отриманням графічної візуалізації у вигляді двомірних графіків залежності температури різання від режимів різання для широко використовуваних матеріалів в галузі машинобудування та типових діапазонів режимів різання для їх обробки.

Визначено методики оцінювання метрологічних характеристик тепловізійних систем, які містять визначення просторової роздільної здатності та теплової чутливості, з урахуванням характеристик поля зору тепловізійної камери. Розглянуто схему геометрії вертикального огляду для визначення впливу кута депресії на відбитки проєкцій вертикального та горизонтального складових поля

зору. Застосування відповідних розрахункових залежностей може бути використано для побудови графічної візуалізації, які дають розуміння наскільки відбуватиметься спотворення проєкцій кута зору при спостереженні під варіюванням кута нагляду. Проаналізовано існуючі методики для визначення еквівалентної шуму різниці температур NETD. Запропоновано адаптовану методику оцінювання характеристики NETD для об'єктів дослідження в умовах нестационарних режимів на основі даних отриманих з серії термограм (до 10 кадрів), отриманих за умов контрольованого нагріву об'єкту в муфельній печі з фіксованою температурою і послідовною обробкою визначеної ROI-ділянки (розміром 100×100) пікселів та обчисленням стандартного відхилення температури в межах обраної ROI.

Оцінювання невизначеності вимірювання температури здійснювалось у відповідності до підходів GUM. Враховано внески від параметрів точності тепловізору та теплової чутливості NETD. Для оцінювання загальної невизначеності вимірювань враховувався внесок від температури відбиття за запропонованою залежністю. Комбінована стандартна невизначеність оцінена з урахуванням складових за типом A (на основі статистичного аналізу експериментальних термограм) та за типом B (із використанням даних, поданих до специфікацій приладів), а також модельних припущень.

Запропоновано залежність для оцінювання стандартної невизначеності зміни температури за часом $T(t)$ для результатів вимірювання, отриманих з тепловізійних відеокамер через стандартне відхилення залишків апроксимованої моделі.

Отримані результати забезпечують метрологічне обґрунтування використання тепловізійного контролю для технологічних процесів обробки різанням.

3 МЕТОДИ ОБРОБКИ ТЕРМОГРАМ У ЗАДАЧАХ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУР ЩО ВИНΙΚАЮТЬ В ЗОНІ РІЗАННЯ

3.1 Структура розробки програмного забезпечення для реалізації аналізу термограм

Сучасні спеціалізовані системи обробки термограм – не дають можливості обробляти кожен кадр автоматично, з виділенням та виокремленням необхідних зон. Це все виконує оператор вручну, переглядаючи кожен кадр і встановлюючи маркери в необхідних місцях, тим самим створюючи зв'язки та залежності в серіях кадрів, що є не припустимим під час обробки кадрів в реальному часі, де необхідно підсвічувати більше ніж одну зону. У сучасних умовах підвищених вимог до точності й автоматизації технічної діагностики, нейромережеві технології виявляють високу ефективність при аналізі термографічних даних. Зокрема, згорткові штучні нейронні мережі (ШНМ) забезпечують можливість виявлення просторових закономірностей у термограмах, що важко формалізуються традиційними алгоритмами обробки зображень. Тому доцільно застосувати ШНМ для забезпечення можливостей адаптації до нових умов, швидкого навчання та використання навчених моделей для передбачення змін вже на основі відомих закономірностей.

Для спрощення реалізації програмного забезпечення при проведенні аналізу термограм код буде складатись з 3-х модулів:

1. Завантаження, аналіз, обробка термограм та навчання нейронної мережі.
2. Завантаження, аналіз та обробка термограм за допомогою вже навченої нейронної мережі в першому блоці.
3. Обробка результатів та видача статистичних даних похибок.

Архітектура директорій визначається наступним чином:

- temp_frame – папка зі збереженими кадрами термограми;
- temp_bin – папка зі збереженими проміжними бінарізованими кадрами;

- temp_masks – папка зі збереженими масками для навчання нейронної мережі;
- temp_results – папка куди записується .txt та .csv з результатами температур та графіки;
- inference_results – папка куди записується результати обробки файлів на базі вже навченої нейронної мережі.

Система має працювати наступним чином: на вхід програмного забезпечення надходить термограма у форматі відеозапису *.seq, де кожен кадр відео являє собою окрему термограму розміром 480×640 пікселів. На термограмах зафіксовано процес обробки металеві заготовки на токарному верстаті методом точіння. Для підготовки даних відео *.seq автоматично розбивається на окремі кадри у форматі .png, які по черзі зберігаються у папці temp_frame. Кожен кадр додатково опрацьовується: за допомогою алгоритму бінаризації формуються маски, що виділяють основні зони – зону різання, стружку та заготовку. Бінаризовані кадри зберігаються у папці temp_bin, а сформовані маски – у папці temp_masks, повна структура відображена на Рисунку 3.1.

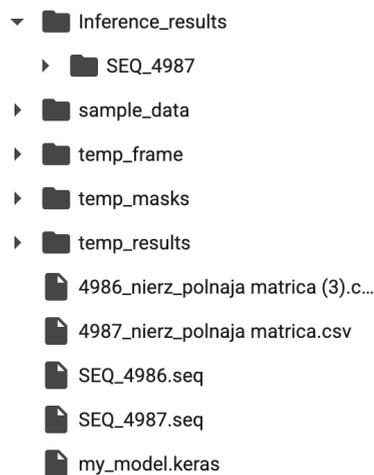


Рисунок 3.1 – Структура репозиторію ПЗ

Для навчання нейронної мережі використовується таблиця у форматі *.csv, що містить розшифровані показники температури для кожного пікселя (у градусах Цельсія з точністю до тисячних), причому дані кожного кадру розташовані у межах 640 × 480 клітинок.

За допомогою аналізу таблиці вибираються найгарячіші зони, та з них формуються маски. Маски накладаються на відповідні кадри, формуючи розмічену вибірку для навчання нейронної мережі. Під час навчання нейронна мережа аналізує вхідні зображення разом із масками та навчається визначати й сегментувати відповідні зони на кадрах, а також прогнозувати максимальні температури в зоні різання, стружки та заготовки. Проміжні результати, а також фінальні графіки і таблиці температур зберігаються у папці `temp_results`. Після навчання модель може бути використана для аналізу інших відеозаписів термограм у форматі `*.seq`. Для цього у програмному забезпеченні реалізовано окремий блок інференсу, який використовує попередньо навчену нейронну мережу для генерації передбачень на основі нових даних. Це працює наступним чином: користувач обирає відеофайл, і всі його кадри автоматично опрацьовуються вже навченою нейронною мережею.

Для кожного кадру формуються сегментовані маски, визначаються максимальні температури по зонах, а результати, маски та графіки зберігаються у структурованій папці `Inference_results` з назвою відео у назві новоствореного файлу, де є піддиректорії `masks`, `graphs`, `tables` для відповідних файлів (масок, графіків, таблиць). Якщо для нового відео доступний також `.csv`-файл із реальними температурними даними (`ground-truth`), програма автоматично виконує порівняння передбачених та реальних значень, будує відповідні порівняльні графіки, а також розраховує основні метрики похибок (абсолютну, середньоквадратичну та відносну похибки) для кожної зони. Всі результати аналізу та звітності зберігаються у відповідних директоріях проекту для подальшої верифікації й використання у роботі.

Взаємодія користувача з програмним забезпеченням відбувається через консоль веб застосунку Google Colab (безкоштовний облачний сервіс). Інтерфейс складається з Вікна інтерфейсу Google Colab та блоку коду (рис. 3.2). В блоці коду є кнопка активації компіляції та виконання скрипту. Код має архітектуру моноліту, що спрощує його архітектуру та відладку, проте має негативний вплив на швидкодію ПЗ.

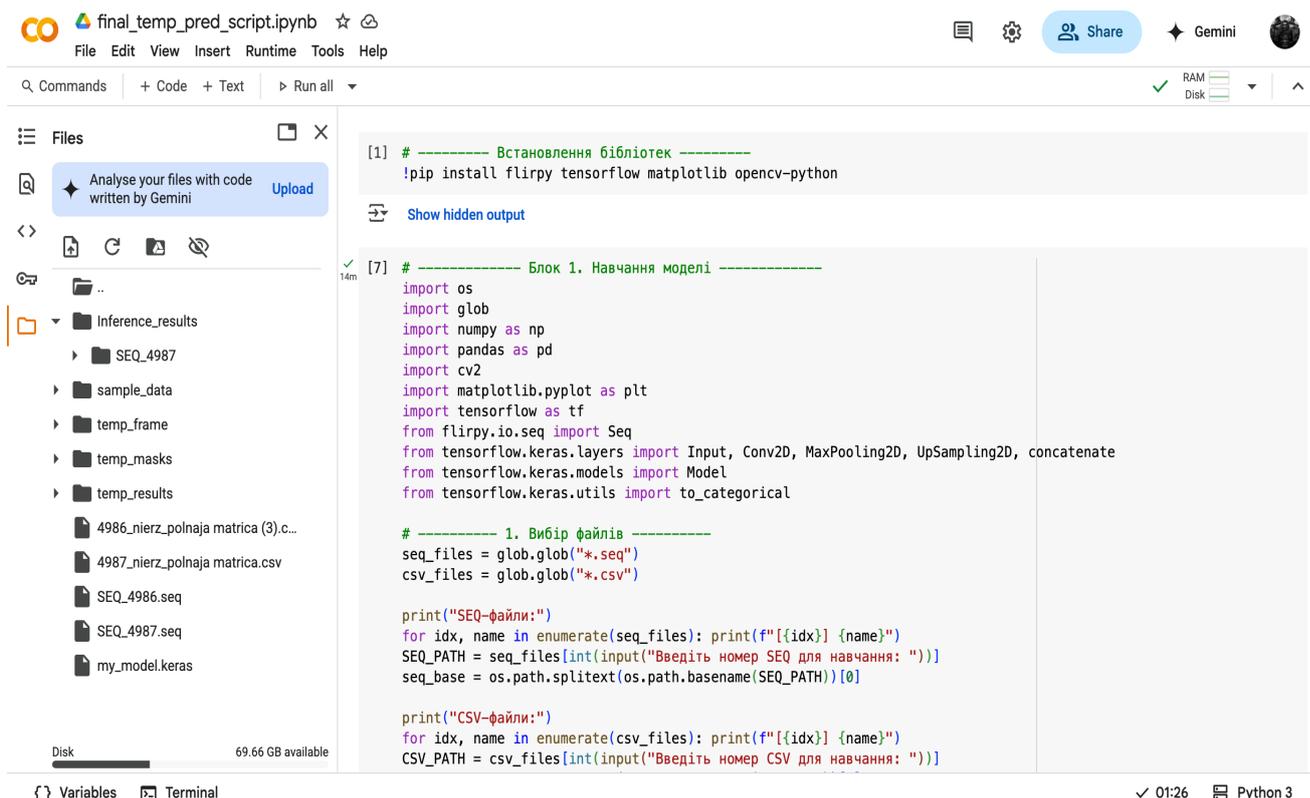


Рисунок 3.2 – Користувацький інтерфейс Google Colab

Користувач може взаємодіяти з ПЗ наступним чином:

- ініціювати навчання нейронної мережі;
- запустити обробку наступної термограми;
- отримати графічний аналіз передбачених температур;
- отримати аналіз похибок .

Схематично це наведено за допомогою UML діаграми на рисунку 3.3.

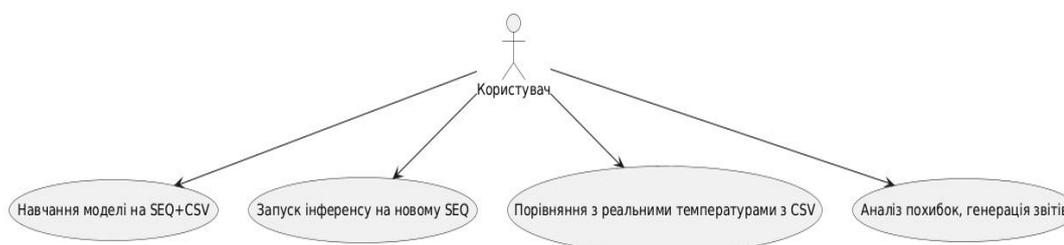


Рисунок 3.3 – Use case діаграма, яка описує взаємодію користувача та програмного забезпечення

Алгоритм роботи ПЗ наведено на рисунку 3.4.

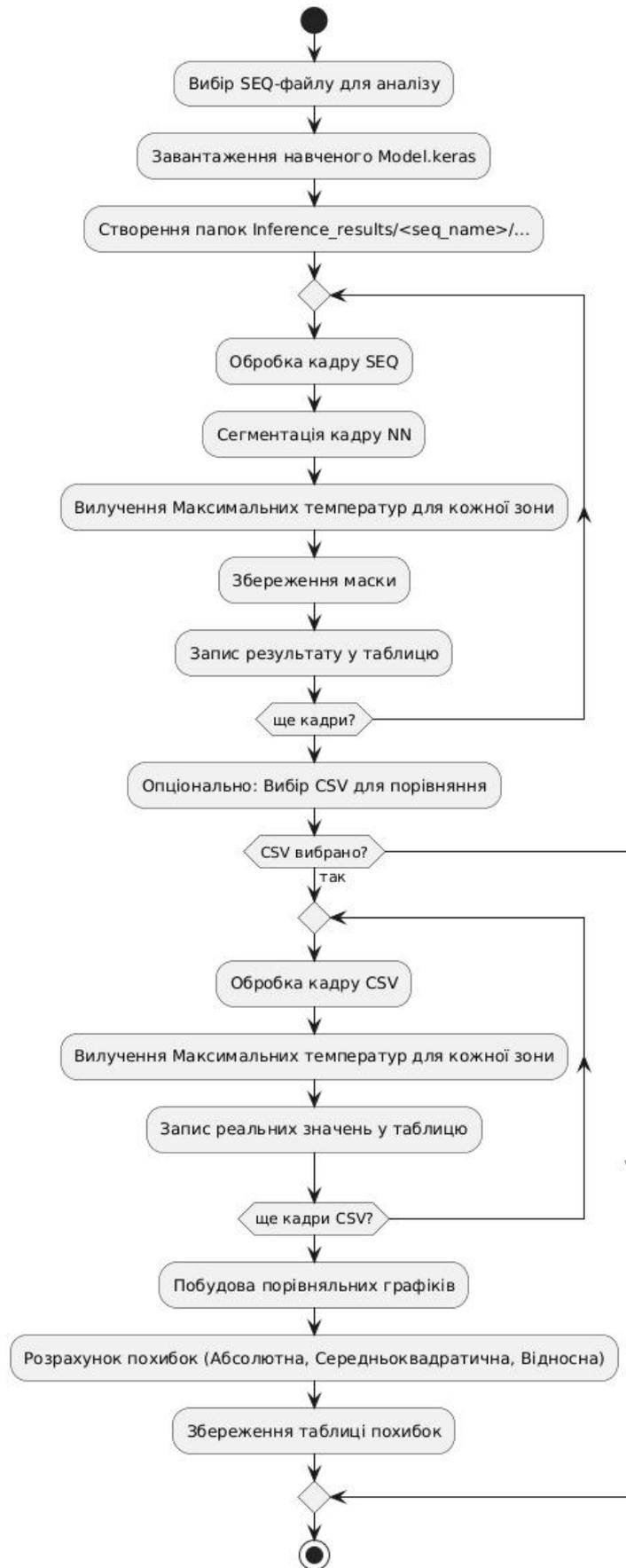


Рисунок 3.4 – Алгоритм роботи програмного забезпечення

Користувач ініціює старт роботи ПЗ після чого користувач завантажує файл у корінь директорії. Система сама розпізнає файл та починає його обробку. У разі наявності декількох файлів – користувач має обрати один з них. За допомогою алгоритму бінаризації – виконується первинна обробка термограми з метою підсвічування та акцентування уваги для нейронної мережі на необхідну зону на кадрі. Наступний крок – сегментація кадрів з подальшою автоматичною обробкою кожного кадру та подальшим навчанням нейронної мережі. Навчена нейронна мережа може обробляти інші відео які завантажує користувач та генерує до них графіки, в разі наявності CSV файлу з розшифрованими термограмами – зробити аналіз та надати аналітичну інформацію що до похибок.

3.2 Аналіз методів бінаризації тепловізійних зображень

Аналіз існуючих методів опрацювання графічних зображень показав, що було створено багато різних алгоритмів бінаризації з метою покриття широкого спектру різноманітних задач. Існує багато різних методів бінаризації зображень, які слугують для обробки та зчитування інформації машинними алгоритмами з метою подальшої її обробки, які представлено на рисунку 3.5.

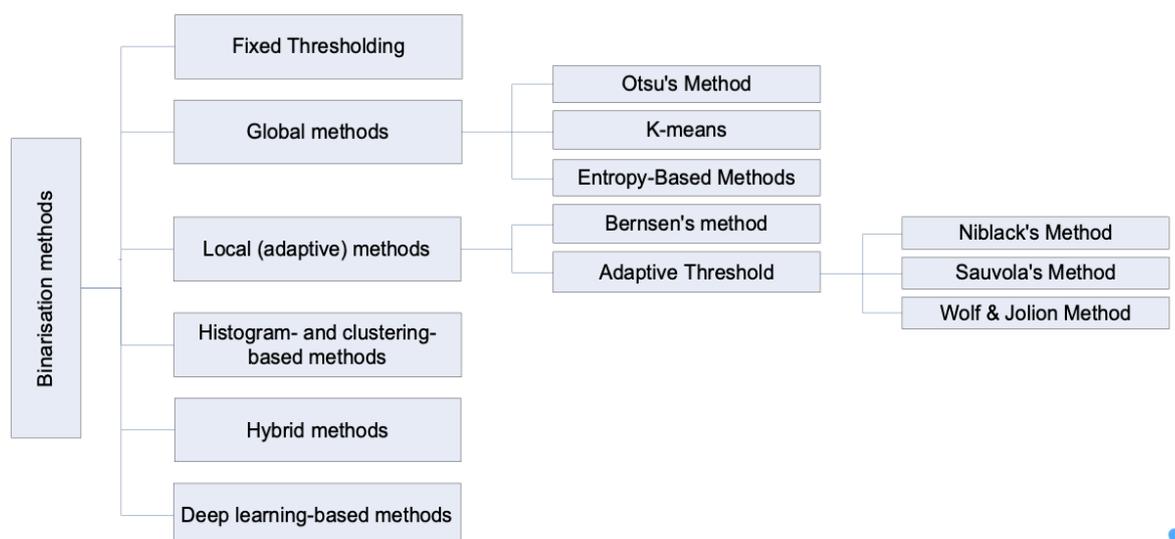


Рисунок 3.5 – Існуючі методи бінаризації

Метод фіксованого порогу був створений для обробки зображень із рівномірним освітленням та чітким розмежуванням між об'єктом і фоном. Він забезпечує просте та швидке вирішення задачі сегментації, коли контраст між об'єктом і фоном є достатньо високим. Цей метод знайшов своє застосування в областях, де необхідно виділяти об'єкти на зображеннях із високою точністю, наприклад, при розпізнаванні тексту у відсканованих документах або при аналізі зображень із чітко визначеними границями чи розпізнаванні QR та штрих-кодів. Простота реалізації робить його одним із найпопулярніших підходів у базових сценаріях, однак його обмеження стають помітними при обробці складних або нерівномірно освітлених зображень [72].

Для кожного пікселю $I(x,y)$ виконується перевірка згідно з фіксованого порогу T .

$$B(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } I(x, y) \geq T, \\ 0, & \text{якщо } I(x, y) < T, \end{cases} \quad (3.1)$$

де $B(x, y)$ – бінаризований піксель;

$I(x, y)$ – інтенсивність пікселя.

Метод Оцу автоматично визначає оптимальний поріг для зображень із бімодальним розподілом інтенсивностей. Його було розроблено для покращення сегментації текстових документів, де важливо чітко відокремити текст від фону, а також для обробки зображень із чіткими контурами об'єктів, наприклад, у медичних або технічних зображеннях. Цей метод знайшов застосування у задачах, де необхідна висока точність сегментації та мінімізація втрат інформації, таких як аналіз мікроскопічних зображень або підготовка зображень для машинного зору. Він дозволяє визначити межі між об'єктами та фоном з мінімальними обчислювальними витратами, водночас забезпечуючи високий рівень автоматизації процесу. Найкраще пасує для розпізнавання тексту (Optical Character Recognition), сегментація клітин у біомедичних зображеннях [73].

$$\sigma^2 = \omega_0 \sigma_0^2 + \omega_1 \sigma_1^2, \quad (3.2)$$

де ω_0, ω_1 – ймовірності кластерів (фон та об'єкт)

σ_0^2, σ_1^2 – внутрішньокласова дисперсія кожного кластера
 Оптимальний поріг T вибирається шляхом максимізації міжкласової дисперсії:

$$\sigma_B^2 = \omega_0 \omega_1 (\mu_0 - \mu_1)^2, \quad (3.3)$$

де μ_0, μ_1 – середні значення інтенсивностей.

Локальні методи призначені для обробки зображень із нерівномірним освітленням, де глобальні підходи не працюють належним чином через варіації яскравості або наявність тіней. Ці методи дозволяють використовувати локальну інформацію для адаптації порогових значень, що значно підвищує ефективність обробки складних зображень. Наприклад, вони застосовуються для розпізнавання тексту на рукописних документах, які можуть мати неоднорідне фонове освітлення, або для аналізу деталізованих зображень, де точне розділення деталей залежить від локального контексту [74].

Адаптивні методи створені для обробки зображень зі складними умовами освітлення та текстур, коли звичайні методи не здатні дати задовільний результат. Ці підходи активно використовуються для роботи з документами, сканованими в умовах нерівномірного освітлення, або для мікроскопічних зображень, де варіативність текстур і контрасту є значною. Вони дозволяють враховувати локальні особливості освітлення і структури зображення, що значно покращує якість бінаризації у складних випадках. Завдяки цьому адаптивні методи широко застосовуються у сферах, де необхідно обробляти зображення із неоднорідними умовами освітлення, різноманітними текстурами і шумом. Наприклад, їх ефективність помітна у розпізнаванні рукописного тексту, медичних зображеннях, а також у промисловому контролі якості, де умови зйомки не завжди ідеальні. Ці методи часто комбінують з іншими підходами для досягнення максимальної точності й надійності обробки [75].

Метод кластеризації (K-Means) використовується для автоматичного розподілу пікселів на кластери (фон і об'єкт) на основі інтенсивностей. Цей підхід є особливо ефективним для аналізу зображень, де розподіл інтенсивностей має кілька чітких піків, що відповідають різним областям. Наприклад, у задачах сегментації аерофотознімків кластеризація дозволяє відокремити об'єкти, такі як будівлі, дороги чи водойми, від фону. Крім того, методи кластеризації широко застосовуються в обробці кольорових зображень, де вони допомагають розбити простір кольорів на відповідні класи, спрощуючи подальшу обробку. Алгоритми, такі як K-Means, використовуються для швидкого і точного визначення меж між кластерами навіть у складних умовах [76].

Методи на основі ентропії розроблені для максимізації інформаційного вмісту між об'єктом і фоном, що дозволяє досягти високої точності у визначенні меж між різними сегментами зображення. Основна ідея полягає у виборі такого порогу, який забезпечує максимальну ентропію або інформаційну насиченість, розділяючи зображення на дві області. Ці методи знаходять застосування у задачах, де необхідно зберегти якомога більше деталей під час сегментації, наприклад, при аналізі медичних зображень або підготовці графічних даних для друку. Використання ентропії як критерію дозволяє враховувати особливості розподілу інтенсивностей пікселів, що робить метод ефективним для різних типів даних [77].

Глибокі нейронні мережі використовуються для вирішення складних задач, де традиційні методи виявляються неефективними через високий рівень шуму, складність сцен або варіативність даних. Вони дозволяють моделювати складні нелінійні залежності, що робить їх ідеальними для сегментації зображень, де точність та гнучкість є критично важливими. Наприклад, такі моделі, як U-Net, ефективно використовуються у медицині для виявлення пухлин на медичних знімках різного типу, а DeepLab застосовується для аналізу дорожніх сцен у системах автономного водіння. Ці архітектури працюють на основі принципів семантичної сегментації, дозволяючи виділяти об'єкти на зображенні з

неймовірною точністю. Їхнє використання значно розширює можливості обробки зображень навіть у найскладніших умовах [78].

Гібридні методи поєднують глобальні та локальні підходи для обробки складних зображень, забезпечуючи баланс між ефективністю та точністю. Ці методи створені для вирішення задач, які не можуть бути задовільно оброблені за допомогою виключно одного підходу. Наприклад, у технічній обробці зображень вони дозволяють поєднувати переваги адаптивних та глобальних методів, застосовуючи локальні аналізи у ділянках з неоднорідним освітленням або текстурами. Використання гібридних підходів особливо корисне в умовах, коли необхідно обробити зображення з великими варіаціями освітлення або контрасту, таких як супутникові знімки або зображення у медичних дослідженнях. Крім того, вони широко використовуються у задачах комп'ютерного зору, таких як розпізнавання складних об'єктів або аналіз сцен із багат шаровою структурою [79].

Нижче у таблиці 3.1 наведено порівняльний аналіз існуючих методів бінаризації. для оцінки методів будемо використовувати наступні показники: складність імплементції, швидкість обробки та якість обробки складних сцен.

Таблиця 3.1 – Порівняння методів бінаризації

Метод	Складність імплементції	Швидкість	Якість обробки складних сцен	Переваги	Недоліки	Оптимальна сфера застосування
1	2	3	4	5	6	7
Метод фіксованих порогів	Висока	Висока	Низька	Простий та швидкий метод	Не працює за умов нерівномірного освітлення	Розпізнавання текстів або документів
Метод Оцу	Середня	Висока	Середня	Автоматичне порогування	Припускає бімодальний розподіл	Зображення з чітко вираженим переднім планом і фоном
Адаптивні методи	Низька	Середня	Висока	Справляється з різним освітленням	Чутливий до вибору параметрів	Низькоякісні або нерівномірно освітлені документи
Локальні методи	Середня	Середня	Висока	Ефективно для зображень з	Може бути чутливим до шуму	Зображення з високою

1	2	3	4	5	6	7
				локальними варіаціями освітлення	та потребувати налаштування	деталізацією або локальними контрастами
Кластеризація (K-Means)	Середня	Середня	Висока	Обробляє складні розподіли інтенсивності	Високі вимоги до обчислювальних спроможностей	Зображення з перекриваючим і класами інтенсивності
Методи засновані на ентропії	Середня	Середня	Середня	Максимізує збереження інформації	Високі обчислювальні витрати	Зображення з варіативним контрастом
Глибоке навчання	Низька	Низька	Дуже висока	Висока точність та адаптивність	Зумовлює наявність навчальної вибірки та великих обчислювальних спроможностей	Складні або сильно пошкоджені набори даних
Гібридні методи	Висока	Висока	Дуже висока	Може поєднувати всі переваги різних методів	Необхідний високий рівень кваліфікації для імплементації	Пасує для вирішення складних та комплексних задач

У зв'язку із складністю поставленої задачі було вирішено реалізувати гібридний метод бінаризації, який буде заснований на поєднанні методу фіксованих порогів та адаптивного методу.

3.3 Перетворення кадрів термограм на монохромне зображення

При опрацюванні зображень має значення інтенсивність кольорів об'єкту дослідження та фону навколо даного об'єкту. Для вирішення завдання пов'язаного з виокремленням об'єкту дослідження від фону на зображенні, в якості інструменту використовують метод фіксованих порогів. За результатами порогового опрацювання отримують бінаризоване зображення. Але при цьому варто зазначити, що головною перешкодою отримання якісного бінаризованого зображення для термограм є її палітра кольорів, яку необхідно перетворити у монохромну, тобто градації сірого. Щоб застосувати методи бінаризації до таких зображень, потрібно спочатку перетворити їх у монохромні, тобто кольорова палітра має стати у градації сірого [80].

Існує декілька методів перетворення зображення на однопотокове монохромне – це метод середнього арифметичного, метод світлосприйняття, метод максимуму та метод використання одного каналу.

Метод середнього арифметичного – це метод, який перетворює кольорову палітру зображення у відтінки сірого через усередненні значень каналів червоного, зеленого і синього (R, G, B):

$$I(x, y) = \frac{R(x, y) + G(x, y) + B(x, y)}{3}, \quad (3.4)$$

де $I(x, y)$ – інтенсивність сірого кольору у пікселі (x, y) ;

$R(x, y)$, $G(x, y)$, $B(x, y)$ – відповідні значення інтенсивності кольорів (червоного, зеленого, блакитного) у пікселі (x, y) , визначається від 0 до 255.

Цей метод є швидким та простим, проте через нелінійну палітру колірні градієнти з акцентом на «теплих» та «холодних» зонах через середнє арифметичне може втрачати адекватну градацію температур [81].

Метод світлосприйняття – це метод, що імітує те, як людське око сприймає яскравість кольору за допомогою коефіцієнтів, які визначені з урахуванням спектральної чутливості людського ока.

$$I(x, y) = 0.299 \cdot R(x, y) + 0.587 \cdot G(x, y) + 0.114 \cdot B(x, y) \quad (3.5)$$

де $I(x, y)$ – інтенсивність сірого кольору у пікселі (x, y) ;

$R(x, y)$, $G(x, y)$, $B(x, y)$ – відповідні значення інтенсивності кольорів (червоного, зеленого, блакитного) у пікселі (x, y) , визначається від 0 до 255. Цей метод також є дуже простим та легким у реалізації, крім того він несе найменше втрат. тому він є найбільш оптимальним для подальшої роботи [10].

Метод максимуму – це один з найбільш простих, але вузько спеціалізованих методів, коли потрібно зберегти найяскравіші ділянки зображення.

$$I(x, y) = \max(R(x, y), G(x, y), B(x, y)), \quad (3.6)$$

де $I(x, y)$ – інтенсивність сірого кольору у пікселі (x, y) ;

$R(x, y)$, $G(x, y)$, $B(x, y)$ – відповідні значення інтенсивності кольорів (червоного, зеленого, блакитного) у пікселі (x, y) , визначається від 0 до 255.

Метод використання одного каналу – це дуже специфічний та утилітарно простий метод з відкиданням «не цікавих» каналів. Тобто з трьох кольорів червоного, зеленого та блакитного залишається тільки один активний канал:

$$I(x, y) = R(x, y); \text{ або } I(x, y) = G(x, y); \text{ або } I(x, y) = B(x, y), \quad (3.7)$$

де $R(x, y)$, $G(x, y)$, $B(x, y)$ – відповідні значення інтенсивності кольорів (червоного, зеленого, блакитного) у пікселі (x, y) , визначається від 0 до 255.

Цей метод пасує коли треба вилучити із зображення певну інформацію, проте у разі термограми, ми втрачаємо натуральну кольорову шкалу [81, 82].

Усі термограми зберігаються у форматі .jpg/.png, тобто в середині цих файлів кольори записані за стандартом RGB (Red Green Blue), отже необхідно застосувати формулу методу світлосприйняття (3.5) для зведення до одного значення яскравості.

Після розрахунку градацій сірого проводимо лінійну нормалізацію, для підвищення контрасту та приведенню пікселів до нормального діапазону [0, 255]:

$$I_{norm}(x, y) = \frac{I(x, y) - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \cdot 255, \quad (3.8)$$

де $I(x, y)$ – інтенсивність сірого кольору у пікселі (x, y) ,

I_{max} і I_{min} – мінімальні та максимальні значення яскравості на зображенні.

Отриманий кадр буде готовий до бінаризації [83].

3. 4 Аналіз нейронних мереж

Сучасні нейронні мережі – це складні алгоритми машинного навчання, натхненні біологічною будовою нейронів мозку живих істот, створені для обробки даних, розпізнавання закономірностей і прийняття рішень. Вони складаються з шарів взаємопов'язаних тензорів (нейронів), які обробляють вхідні дані, використовуючи вагові коефіцієнти та функції активації. Нейронні мережі використовуються в комп'ютерному зорі, автоматичному перекладі, генерації тексту, автономних системах та інших сферах.

Нейронні мережі за архітектурою поділяються на: прямі нейронні мережі (FNN), які слугують для класифікації даних чи їх регресування; згорткові нейронні мережі (CNN) для обробки зображень; рекурентні нейронні мережі (RNN) для послідовних даних, таких як текст, природня мова чи часові ряди; трансформери (Transformers), які домінують у задачах обробки Bigdata аналітики; генеративно-змагальні мережі (GAN), які використовуються для генерації даних різного типу, наприклад музики, мови чи зображень та автокодувальники (Autoencoders), які використовуються для стиснення даних та/або вилучення певних ознак [84, 85, 86]. А також вирізняються за типом навчання. Можна виокремити три типи:

- з вчителем (тобто з базовою вибіркою);
- без вчителя (мережа навчається самостійно шукаючи закономірності в даних);
- навчання з підкріпленням (в цьому випадку відбувається так само як і без вчителя, проте отримує «винагороду» за кожен успішний цикл) [87].

В чистому вигляді використовувати та розробляти нейронні мережі це дуже дороге та важке завдання, яке потребує багато часу та спеціалістів, проте ІТ індустрія вже пропонує багато фреймворків які дозволяють будувати нейронні мережі за допомогою вже наявних модулів та пропонують одразу декілька доступних архітектур. Як приклад фреймворки такі, як TensorFlow чи PyTorch, які надають широкий спектр послуг, підтримують інтеграції різних сторонніх модулів та пропонують свої рішення для різних мов програмування, наприклад, C++ чи

Python. Проте і на далі навчання потребує великих наборів даних і оптимізації для уникнення перенавчання.

TensorFlow – це відкритий фреймворк для машинного навчання, розроблений Google, який широко використовується для створення та розгортання нейронних мереж. Випущений у 2015 році, TensorFlow став одним із найпопулярніших інструментів завдяки своїй гнучкості, масштабованості та підтримці різних платформ, від мобільних пристроїв до великих кластерів [88]. Цей фреймворк підтримує як низькорівневе програмування (для детального контролю над архітектурою нейронних мереж), так і високорівневі API, такі як Keras. Фреймворк використовує обчислювальні графи для представлення операцій, що дозволяє оптимізувати обчислення та розподіляти їх між центральним процесором (CPU), відео процесором (GPU) та тензорним блоком обробки TPU. TensorFlow підтримує Python, C++, JavaScript, та може бути розгорнутим будь де, як на ПК чи на Хмарному сервері. До недоліків можна віднести низькорівневий API, який може викликати труднощі в налаштуванні, складну побудову графів, що робить відлагодження більш трудоміским та величезний об'єм бібліотеки фреймворку, який має бути обов'язково розгорнутий на пристрої.

PyTorch – це відкритий фреймворк для машинного навчання, розроблений корпорацією META а саме їх підрозділом Facebook AI Research. Цей фреймворк набув популярності завдяки своїй простоті та гнучкості. PyTorch використовує динамічні обчислювальні графи, що робить його особливо зручним для досліджень і швидкого прототипування, а також пропонуючи інтуїтивний API, який дозволяє створювати моделі з мінімальними зусиллями. Динамічні графи (eager execution) дозволяють виконувати обчислення в реальному часі, що спрощує відлагодження та експерименти. PyTorch підтримує Python, має інтеграцію з бібліотеками, такими як NumPy і працює з GPU через CUDA [89].

Keras – це високорівневий API для створення нейронних мереж, який спочатку був окремим проектом, але з 2017 року інтегрований у TensorFlow (починаючи з TensorFlow 2.0). Keras розроблений для швидкого створення

моделей із мінімальним кодом, що робить його ідеальним для початківців і швидкого прототипування.

Цей модуль пропонує простий і зручний інтерфейс для створення нейронних мереж, приховуючи складність низькорівневих операцій. Він працює як надбудова над TensorFlow, а також з рядом інших фреймворків. Keras підтримує широкий спектр архітектур, від згорткових мереж (CNN) до рекурентних (RNN).

Таким чином, розглянувши набір доступних на сьогодні рішень – прийшов до висновку використовувати згорткові нейронні мережі, як ті, що найкраще пасують для обробки зображень, з архітектурою тензорів U-net. Фреймворк TensorFlow вже одразу пропонує набір інструментів для взаємодії з такими архітектурами, а з модулем Keras можна оптимізувати код, також це пов'язано із попереднім досвідом використання цих двох модулів і з широким спектром підтримки зі сторони розробника, а також простоті реалізації завдання.

3.5 Реалізація бінаризації

Перед тим як почати обробку термограми – необхідно врахувати, що кадри мають складну палітру кольорів, яка відповідає температурному діапазону, що є суттєвою перепоною для використання вище перерахованих алгоритмів. Для цього необхідно конвертувати зображення у монохромну палітру, тобто кольори мають стати градаціями сірого. Людське око по різному сприймає кольори. Зокрема, воно є більш чутливим до зеленого кольору, менш – до червоного і найменш – до синього, тому для конвертації кольорового зображення (RGB) використовуються вагові коефіцієнти, які враховують ці особливості. Тому першим етапом є перетворення зображення в градації сірого. Для спрощення роботи системи:

$$I(x, y) = 0,299 R + 0,587 G + 0,114 B, \quad (3.9)$$

де $I(x, y)$ – інтенсивність сірого кольору у пікселі (x, y) ,

$R(x, y)$, $G(x, y)$, $B(x, y)$ – відповідні значення інтенсивності кольорів (червоного, зеленого, блакитного) у пікселі (x, y) , визначається від 0 до 255.

Після адаптації термограм до монохромного зображення – можна виконати бінаризацію. Метод фіксованих порогів та адаптивний метод було поєднано у гібридний метод бінаризації. Метод фіксованих порогів – це метод, що використовує одне значення порогу T (виставляється вручну), яке порівнюється з інтенсивністю кожного пікселя, усі пікселі що задовольняють цьому значенню отримують значення 1 (правда), а всі інші - 0 (хиба), таким чином виділяється зона різання, заготовка та стружка, як зони з найвищою температурою на кадрі та відкидаються усі зайві об'єкти що потрапляють в кадр так як їх інтенсивність буде нижча за порогове значення. Розрахунок відбувається за формулою:

$$B(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } I(x, y) \geq T \\ 0, & \text{якщо } I(x, y) < T \end{cases} \quad (3.10)$$

де T – порогове значення для інтенсивності пікселя, що відповідає температурі у °С.

$B(x, y)$ – значення бінаризованого пікселю з координатами (x, y) .

Далі за допомогою адаптивної бінаризації виділяємо гарячі області. Адаптивна бінаризація визначає порогове значення для кожного пікселя окремо на основі аналізу його локального оточення. За допомогою методу, що використовує зважене середнє значення інтенсивностей у локальному сусідстві кожного пікселя, де ваги визначаються за допомогою Гаусового ядра відбувається перебір пікселів. Гаусове ядро надає більшу вагу пікселям, що ближчі до центрального, а віддалені пікселі впливають менше це виглядає наступним чином:

$$g(x, y) = \begin{cases} 255, & \text{якщо } I(x, y) \geq T(x, y) \\ 0, & \text{якщо } I(x, y) < T(x, y) \end{cases} \quad (3.11)$$

де $T(x, y)$ – порогове значення для пікселя (x, y) ;

$g(x, y)$ – значення пікселю після обробки Гаусовим ядром;

Порогове значення визначається наступною залежністю:

$$T(x, y) = \frac{1}{W} \sum_{i, j \in S(x, y)} G(i, j) \times I(i, j) - C, \quad (3.12)$$

де $S(x, y)$ – локальне вікно на фоні пікселя (x, y) ;

$G(i, j)$ – значення Гаусового ядра в точці (i, j) ;

$I(i, j)$ – інтенсивність пікселя (i, j) ;

W – сума всіх значень ядра ваги $G(i, j)$ у вікні $S(x, y)$;

C – константа що коригує поріг.

Гаусове ядро $G(i, j)$ визначається за двомірним розподілом Гауса:

$$G(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(i - \mu_x)^2 + (j - \mu_y)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3.13)$$

де i, j – координати пікселя у локальному вікні;

μ_x, μ_y – координати центру вікна;

σ – параметр стандартного відхилення, який визначає, наскільки розподілені ваги.

В поєднанні ці два методи дають адекватний результат для виявлення та виокремлення зони різання на кадрі термограми не витрачаючи багато ресурсів системи.

В результаті виконання алгоритму над термограмою (рис. 3.6, ліворуч), отримуємо бінаризоване зображення, представлене на рис. 3.6, праворуч.

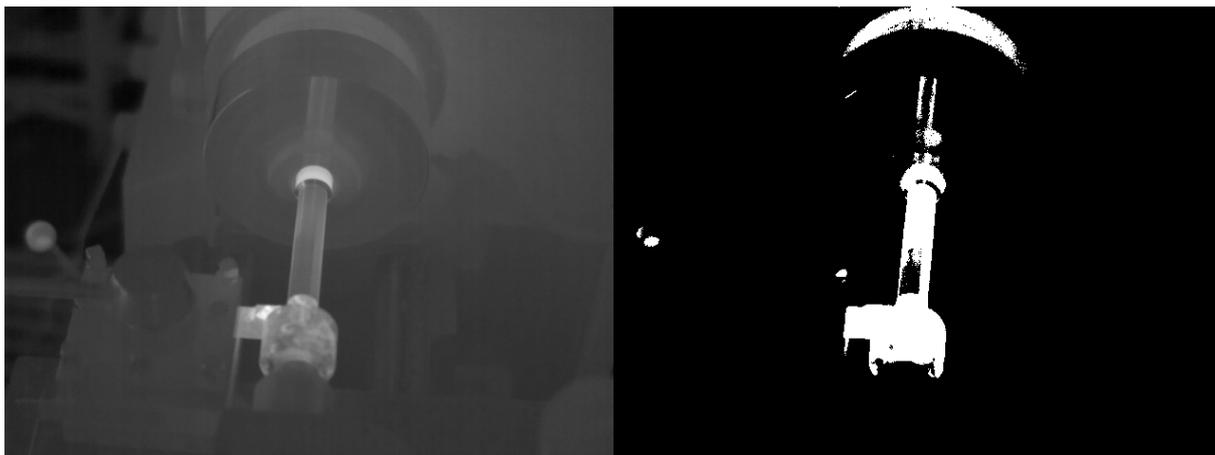


Рисунок 3.6 – Термограми – до та після бінаризації

Як можна бачити вище – алгоритм успішно виконав бінаризації та виокремив на кадрі зону з найбільшою температурою яка співпадає із зоною різання. А отже його можна використовувати в подальшому в ПЗ для обробки термограм

3.6 Накладання масок на кадри

Маска – це спеціальні зображення, які використовуються в задачах сегментації зображень для позначення категорії або класу кожного пікселя вхідного зображення. Маски є одноканальними (монохромними) або багатоканальними (RGB) зображеннями, де значення пікселів відповідають індексам класів об'єктів, які потрібно сегментувати. Для обробки термограм багатоканальні маски не потрібні, тому використовуються монохромні одноканальні, тобто роль масок буде виконувати бінаризований кадр, який накладається поверх основного кадру термограми.

Система зчитує маски, як одноканальні зображення (`cv2.IMREAD_GRAYSCALE`), де кожен піксель має ціле значення, яке відповідає одному з чотирьох класів, де 0 – фон кадру, 1 – зона різання, 2 – стружка, а 3 – заготовка (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 – Накладання масок на бінаризований кадр з метою розділити теплові зони на різні групи

3.7 Складання нейронної мережі

Як вже було сказано вище, для реалізації ПЗ було використано нейронну мережу TensorFlow з модулем Keras, який допомагає розгорнути архітектуру U-Net. Це допомагає реалізувати наступний сценарій: сегментоване зображення передається на вхідний базовий шар який в подальшому ще більше сегментує елементи кадру та передає на основні шари нейронної мережі де кожен сегмент опрацьовується та порівнюється із наявними елементами у пам'яті. Таким чином, на вихідному шарі з певною долею вірогідності формується відповідь, що знаходиться у кадрі. Так як зона різання це дуже мала, проте дуже яскрава точка на кадрі, система може розпізнавати цю зону як аномалію та ігнорувати її. Щоб цього не сталося, при навчанні будемо використовувати архітектуру навчання з вчителем коли в нас є завчасно заготовлені оброблені кадри вже з відомими результатами та системою штрафів при негативному результаті.

U-Net – це архітектура згорткової нейронної мережі, розроблена спеціально для задач сегментації зображень. Вперше представлена у 2015 році Олафом Роннебергером в статті "U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation" [90], вона отримала назву через свою U-подібну структуру. Переваги цієї архітектури полягають у високій точності сегментації зображень навіть із

обмеженими даними що може бути актуальним при обробці термограм, простота реалізації в сучасних фреймворках таких як TensorFlow або PyTorch та швидке навчання порівняно з глибшими архітектурами. До недоліків можна віднести чутливість до шумів, обмежену глибину тензорів та при зростанні роздільної здатності чи розміру зображення – необхідність в більш потужних обчислювальних системах. Ця нейронна мережа має наступну структуру з двох головних модулів:

- Encoder (контрастна частина) – послідовність згорткових і пулінгових шарів, які поступово зменшують просторову роздільність та вилучають ознаки.
- Decoder (частина, що розгортає) – upsampling-операції, що відновлюють просторову роздільність, дозволяючи отримати карту сегментації тієї ж розмірності, що і вхідне зображення.

Контрактуюча частина – це перша половина нейронної мережі U-Net, яка поступово перетворює вхідне зображення з високою роздільною здатністю на низку багатовимірних (глибоких) представлень з меншою просторовою роздільністю, але більш багатим набором семантичних ознак (features). Кожен блок цієї частини U-Net містить: згортковий шар (convolution), який витягує локальні ознаки з зображення (межі, текстури), функцію активації ReLU та операцію pooling (згортання, MaxPooling2D), яка зменшує просторовий розмір картинки вдвічі. Пропускання кадрів через кілька таких етапів надає можливість мережі отримати компактне (стиснене) представлення всього зображення з багатим набором ознак [91].

Згортковий шар (Conv2D) – це базовий шар згорткової нейронної мережі, який є ключовим модулем у побудові нейронних мереж:

$$f_{i,j}^{(l,k)} = \sigma \left(\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \varpi_{m,n}^{(k)} \cdot x_{i+m,j+n}^{(l-1)} + b^{(k)} \right) \quad (3.14)$$

де $x_{i+m,j+n}^{(l-1)}$ – вхідна мапа особливостей попереднього шару;

$\varpi_{m,n}^{(k)}$ – ядро згортки розміром $M \times N$;

k – номер фільтра;

$b^{(k)}$ – зміщення (bias);

Σ – активація ReLU.

Нелінійна активація (ReLU) – функція яка дозволяє нейронній мережі моделювати складні, не лінійні залежності між температурними полями різних зон.

$$\sigma(z) = \max(0, z). \quad (3.15)$$

Операцію pooling (MaxPooling2D) – це функція яка зменшує просторову роздільність карти ознак, що дозволяє отримати глобальніший контекст і робить модель менш чутливою до незначних шумів.

$$y_{i,j} = \max_{(m,n) \in P} f_{s \cdot i + m, s \cdot j + n} \quad (3.16)$$

де P – область pooling (наприклад, 2×2);

s – зсув (stride).

Розгортуюча частина (decoder) – це друга частина шарів нейронної мережі U-Net, яка відновлює просторову роздільну здатність зображення (тобто повертає розмір до вихідного), створюючи карту сегментації для кожного пікселя. В контексті термограм з технологічних процесів decoder відповідає за те, щоб кожен піксель опрацьованої термограми на виході моделі був відокремлений у відповідний клас: зона різання, стружка, заготовка або фон.

Кожен шар decoder починається з операції upsampling (збільшення розміру), що реалізується послідовним виконанням інтерполяції та деконволюції, що дозволяє мережі «навчатися» ефективному відновленню просторової структури [92].

$$f_{up}^{(l)} = \text{Upsample} \left(f_{dec}^{(l-1)} \right), \quad (3.17)$$

де $f_{up}^{(l)}$ – мапа особливостей (upsampled feature map).

Наступним кроком йде головна інновація U-Net – де на кожному рівні decoder upsampled мапа особливостей конкатенується з відповідною за розміром мапою особливостей з encoder, що дозволяє відновити дрібні локальні деталі (наприклад, межу між стружкою та зоною різання) та уникнути втрати інформації, спричиненої виконанням операції pooling в encoder.

$$f_{cat}^{(l)} = \text{Concat} \left(f_{up}^{(l)}, f_{enc}^{(l)} \right), \quad (3.18)$$

Після конкатенації застосовуються декілька згорткових шарів з ReLU, що дозволяє мережі уточнити межі між класами, «об'єднати» локальні та глобальні ознаки.

$$f_{dec}^{(l)} = \sigma \left(W^{(l)} \cdot f_{cat}^{(l)} + b^{(l)} \right) \quad (3.19)$$

Після чого йде відновлення оригінального розміру зворотнім шляхом, наприклад, $32 \times 32 \rightarrow 64 \times 64 \rightarrow 128 \times 128 \rightarrow 256 \times 256$.

3.8 Навчання запропонованої нейронної мережі для обробки термограм

Вхідні дані – це кадри (зображення) отримуємо з відео .seq, розбиваючи його на кадри, нормалізуємо температури. Після чого маски створюються автоматично – для кожного кадру, на основі .csv файлу який містить повну розкадровку термограми, де кожна клітинка таблиці відповідає температурі зашифрованій у пікселі, тобто координати пікселю збігаються з координатами комірки у таблиці, формуються маски класів, виконуючи гібридну бінаризацію відповідно до описаного вище методу.

Нормалізація і масштабування виконується оскільки діапазон температур може суттєво варіювати від експерименту до експерименту, тому важливо привести всі вхідні кадри до одного масштабу:

$$x'_{i,j} = \frac{x_{i,j} - T_{min}}{T_{max} - T_{min}}, \quad (3.20)$$

де T_{max} та T_{min} – максимальна та мінімальна температура в кадрі.

Далі, для збільшення розмаїття даних, застосовується аугментація – це процес «спотворення» базової вибірки шляхом зміни напрямлення кадру за допомогою поворотів по горизонталі та вертикалі, віддзеркалення кадру, зміну контрасту, додавання шуму, масштабування. Це критично важливо, бо зона різання часто мала й непостійна за формою, а штучна генерація кадрів для вибірки – допомагає розширити базову навчальну вибірку. Функція аугментації має наступний вигляд:

$$Aug(X) = \{X, flip(X), rotate(X), jitter(X), \dots\} \quad (3.21)$$

Після чого проводиться автоматична валідація. Загальноприйнята практика – використовувати пропорцію: 90% кадрів для навчання, 10% – для валідації. Це дозволяє контролювати перенавчання (overfitting) та обирати найкращі коефіцієнти ваг тензорів.

Функція втрат і балансування класів.

One-hot encoding – це спосіб представлення кожного пікселя маски сегментації у вигляді вектору із 0 та 1, довжина якого дорівнює кількості класів. Для кожного пікселя лише один елемент вектору дорівнює 1 (відповідний до класу), решта – 0. Це потрібно для багатокласової крос-ентропії, оскільки вона розраховується як сума логарифмів ймовірностей по всім класам.

$$y_{i,j,c} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } (i, j) \text{ належить до класу } c; \\ 0, \text{ для усіх інших класів.} \end{cases} \quad (3.22)$$

де $y_{i,j,c}$ – значення у позиції (i, j) для класу c ;

c – один з чотирьох класів 0 – фон, 1 – зона різання, 2 – стружка, 3 – заготовка.

Наступною виконується зважена багатокласова крос-ентропія, це необхідно, бо на термограмах зона різання дуже мала (інколи $< 1\%$ всіх пікселів), а заготовка займає більшу частину кадру, якщо цей етап пропустити, то мережа просто при навчанні буде ігнорувати малочислені класи, вважаючи це за аномалії в кадрі, які необхідно ігнорувати. Виглядає це наступним чином:

$$L(y, \hat{y}) = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W \sum_{c=1}^C \varpi_c \cdot y_{i,j,c} \cdot \log \hat{y}_{i,j,c}, \quad (3.23)$$

де $y_{i,j,c}$ – one-hot розмітка;

$\hat{y}_{i,j,c}$ – ймовірність, що мережа класифікувала піксель (i, j) як клас c ;

N – кількість пікселів в кадрі;

H – висота кадру у пікселях;

W – ширина кадру у пікселях.

Таким чином, якщо мережа помиляється саме у зоні різання (яка має найбільшу вагу), штраф буде найбільший. А так як необхідно обрахувати усі пікселі в кожному кадрі запису для коректного навчання, то це матиме наступний вигляд:

$$L_{Total} = -\frac{1}{N} \sum_{n=1}^k \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W \sum_{c=1}^C \varpi_c \cdot y_{i,y,c}^{(n)} \cdot \log \left(\hat{y}_{i,y,c}^{(n)} \right), \quad (3.24)$$

де n – загальна кількість кадрів у запису [93, 94].

В результаті отримуємо навчену мережу, здатну обробляти термограми у форматі .seq, та формувати графічні звіти.

Так ми отримали, повністю передбачену температуру запису термограми на рисунку 3.8.

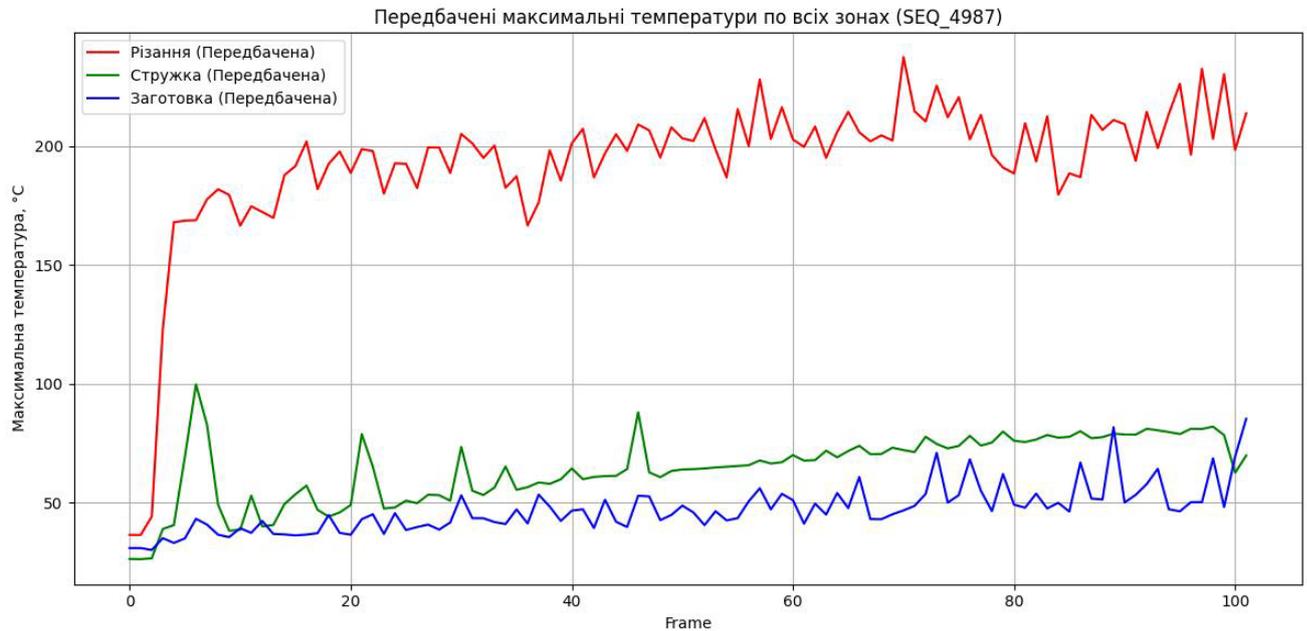


Рисунок 3.8 – Отриманий графік передбаченої температури для стружки, заготовки та зони різання

Висновки до розділу 3

В третьому розділі було проаналізовано та обрано декілька алгоритмів бінаризації для комбінації з метою розробки гібридного методу бінаризації. Проаналізувавши та порівнявши ряд найбільш розповсюджених методів було обрано метод фіксованих порогів та адаптивної бінаризації. Метод фіксованих порогів дає змогу відфільтрувати усі значення, які не потрапляють в необхідний діапазон, а метод адаптивної бінаризації фокусується та робить акцент на зоні різання. Як результат було розроблено алгоритм гібридної бінаризації, який заснований на методах фіксованих порогів та адаптивному методі бінаризації, що дало в результаті швидкий та якісний результат для підсвічування зон різання.

Як видно з результатів дослідження алгоритм робить точну фіксацію та фокусування на заготовці та інструменті різання, що дало змогу створити якісні маски для навчання ШНМ.

Була сформована та розгорнута архітектура згорткової нейронної мережі з використанням фреймворків TensorFlow та Keras, що дало змогу реалізувати архітектуру U-Net, яка є одною з передових у розпізнавання кадрів з нетиповою структурою та пошуку цікавих, для дослідників, об'єктів. Для забезпечення якісного навчання був використаний алгоритм навчання з «Вчителем», коли за неякісні результати система отримує штрафи, що понижує вагу погано навчених тензорів, тим самим підсилюючи вплив на результат якісно навчених тензорів.

Отримане ПЗ дає змогу навчати та корегувати навчальну вибірку, та дає релевантні передбачення щодо температури. За допомогою інференсу реалізовано можливість опрацьовувати інші термограми на базі вже навченої моделі. Проте, є проблема із заготовкою, це пов'язано з її відносно великим розміром по відношенню до розмірів зони різання та стружки через що система рахує середнє тепловиділення по всьому тілу заготовки. Також це пов'язано з тим, що маска різання створюється по найяскравішому (99.9%) порогу – тобто майже завжди максимум температури співпадає з реальною зоною різання і нейромережа легко «навчається» цьому правилу. Заготовка покриває значно більші площі, але її інтенсивність і контраст низькі. Через це автоматичний поріг по температурі в цій зоні отримує набагато менше коректних пікселів, до того ж розподіл у класах може бути незбалансований.

4 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Верифікація результатів тепловізійного контролю теплових процесів на основі математичного моделювання теплового стану зони різання

4.1.1 На прикладі застосування тепловізора UTi720E

Термографічні дослідження процесу точіння проводилися на універсальному токарно-гвинторізному верстаті моделі 1А616 без застосування мастильно-охолоджувального технологічного середовища. В якості засобу вимірювальної техніки використовувався тепловізор моделі UTi720E від виробника UNI- T [54]. Головні метрологічні та технічні характеристики наведено у таблиці 2.1 розділу 2.

Умови навколишнього середовища при проведенні експериментів: температура повітря 15 °С, відносна вологість 50 %.

Концентрацію частинок пилу вимірювали за допомогою вимірювача запиленості повітря «Walcom НТ-9600». Цей тестер має три канали для вимірювання концентрації частинок пилу в діапазонах від 0 до 0,3 мкм, від 0,3 до 2,5 мкм та від 2,5 до 10,0 мкм, а також оснащений портом передачі даних Micro USB на комп'ютер. Для реалізації програми обробки результатів вимірювань була створена програма для моделювання процесу визначення концентрації пилу за допомогою програмного продукту Scilab [39]. Для приміщення, в якому проводилися експерименти складався план відбору проб повітря. Після проведення вимірювань результати записуються у файл для кожного каналу приладу. Далі програма сама здійснює визначення значення розрахункової концентрації частинок в одному м³ повітря виробничого приміщення та середнього арифметичного значення розрахункової концентрації частинок у кожній точці відбору проб. Отримані значення не повинні перевищувати гранично допустиму

кількість частинок, яка передбачена для приміщень певної чистоти гранично допустимий рівень пилу ($1 - 6 \text{ мг/м}^3$).

Для визначення параметрів поля зору використовувались залежності (2.29 – 2.30). Розміри величин відбитків H проекції горизонтального поля зору H_{FOV} та V проекції вертикального поля зору V_{FOV} отримано з урахуванням кута депресії $60 \pm 2^\circ$, а саме для $H_{FOV} - H = 0,40 \text{ м}$ і для $V_{FOV} - V = 0,61 \text{ м}$. Кут нахилу визначався за допомогою шаблону. При цьому розмір одного пікселя IFOV (миттєве поле зору) складає $3,8 \text{ мрад}$, а мінімальна ділянка яку розрізняє один піксель при величині дистанції, з якої здійснювалась зйомка $h = 0,5 \text{ м}$ складає $S = 1.9 \text{ мм}$.

Для визначення відбитої температури $T_{\text{відб}}$, за рекомендаціями стандарту [69], на тепловізорі встановлювали коефіцієнт випромінювання $\epsilon = 1,0$ та нульову відстань до об'єкту, потім встановлювали тепловізор на заплановану відстань проведення вимірювань тепловізором та наводили його на досліджувану передбачувану зону різання та виконували фокусування зображення. Далі встановлювали рефлектор, в якості якого було застосовано зім'яту та потім розгладжену і наклеєну на картон фольгу матовим боком доверху, таким чином щоб площина рефлектора була паралельна площині дослідження та вимірювали температуру рефлектора тепловізором. Такі вимірювання повторювали три рази та фіксували середню температуру, яка склала $15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для отримання чіткості об'єкту дослідження на термограмах здійснювалось фокусування камери та враховувалась відстань до об'єкту, кут спостережень фокусування камери та враховувалась відстань до об'єкту, кут спостережень та діапазон вимірювальних температур (камера працює в двох діапазонах).

Результати розрахунку складових температури різання, отриманих за математичною моделлю теплового стану процесу різання, яка описана у підрозділі 2.1 для різних матеріалів та умов обробки подано у таблиці 4.1.

Для розрахунку коригуючого коефіцієнту K_c , що враховує зміни геометрії зрізуваного шару при зміні режимів різання за формулою (2.16) та розв'язання її

за допомогою метода найменших квадратів були використані вхідні дані з таблиці 4.1 (a_p, f, v). В результаті розв'язання була отримана емпірична формула:

$$K_c = 1,004 \cdot \left(\frac{f}{a_p}\right)^{-0,228} \cdot v^{-0,131}, \quad (4.1)$$

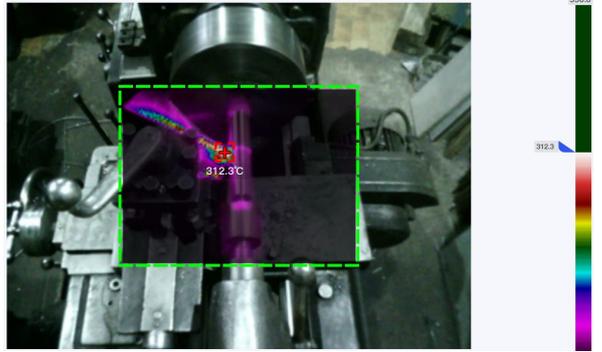
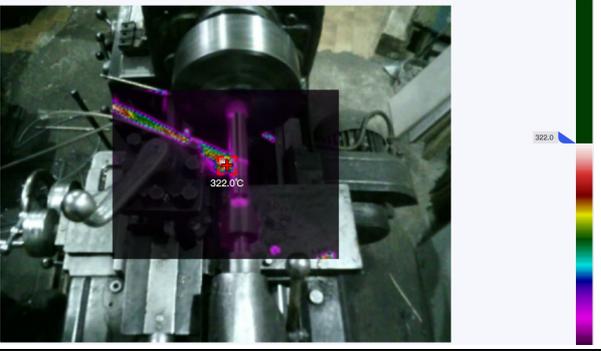
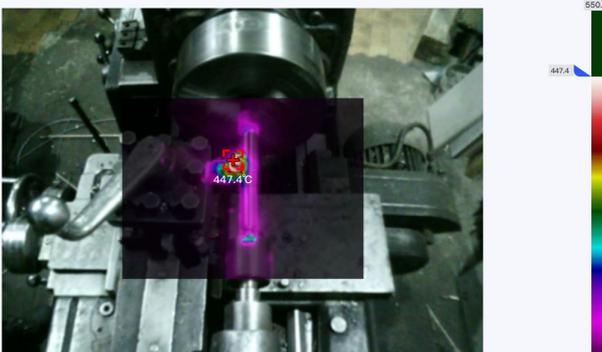
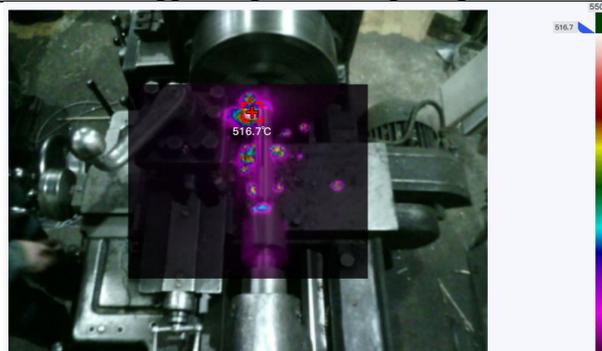
Таблиця 4.1

№ експ.	Матеріал заготовки / інструменту	коэф. випром. ε	d , мм	a_p , мм	f , мм/об	n , хв ⁻¹	v , м/хв.	P_z , Н	$\Delta\theta_c$, °С	$\Delta\theta_T$, °С	$\theta_{розр.}$, °С
1	сталь	0,86	35	1,0	0,32	760	83,5	671	95	117	220
2	AISI321			1,5	0,52	760	83,5	1449	138	152	310
3	(12X18H10T)			2,0	0,32	560	61,5	1322	132	150	306
4	/ T5K10			2,0	0,52	760	83,5	1993	137	155	338
5	сталь	0,62	35	1,0	0,32	760	83,5	624	153	206	378
6	AISI5140			1,5	0,52	760	83,5	1121	174	233	426
7	(40X) /			2,0	0,32	560	61,5	1307	195	254	469
8	T15K6			2,0	0,52	760	83,5	1797	208	268	496

Експерименти проводились для обробки заготовок із сталей 12X18H10T та 40X. Параметри режимів різання для зазначених матеріалів та інструментальний матеріал наведено у таблиці 4.1 за відповідними номерами експериментів. Для аналізу термограм використовувалось спеціальне програмне забезпечення UTI Thermal від фірми виробника. Результат вимірювання, відображений на термограмі отриманий за допомогою точкового вимірника, який відображує максимальну температуру на термограмі (таблиця 4.2). Положення точки перевірялось на цифровому фото за допомогою режиму «картинка в картинці».

Для оцінювання достовірності отриманих результатів вимірювань зафіксованих тепловізором $\theta_{екс.}$, було проведено порівняльний аналіз щодо розбіжності між температурами отриманими методом тепловізійного контролю та розрахунковими температурами за уточненою моделлю $\theta_{розр.}$, наведених в таблиці 4.3.

Таблиця 4.2

Умови проведення: Температура $\theta_{\text{навк.сер.}}$ – 15 °С, температура відбиття – 15 °С, коефіцієнт випромінювання $\varepsilon = 0,86$, відстань зйомки – 0,5 м, відносна вологість – 50 %	
Екс. №1 Цифрове фото та термограма	Екс. №2 Цифрове фото та термограма
	
Екс. №3 Цифрове фото та термограма	Екс. №4 Цифрове фото та термограма
	
Умови проведення: Температура $\theta_{\text{навк.сер.}}$ – 15 °С, температура відбиття – 15 °С, коефіцієнт випромінювання $\varepsilon = 0,62$, відстань зйомки – 0,5 м, відносна вологість – 50 %	
Екс. №5 Цифрове фото та термограма	Екс. №6 Цифрове фото та термограма
	
Екс. №7 Цифрове фото та термограма	Екс. №8 Цифрове фото та термограма
	

Розбіжність (y %) визначалася як відношення модуля їх різниці до середнього арифметичного обох оцінок $\theta_{\text{сер.}} = (\theta_{\text{екс.}} + \theta_{\text{розн.}})/2$. Таблиця 4.3 містить результати розрахунків.

Таблиця 4.3 – Результати обчислення розбіжностей між двома методами

№ експ.	$\theta_{\text{розн.}}, ^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{екс.}}, ^\circ\text{C}$	Розбіжність	
			$\theta_{\text{екс.}} - \theta_{\text{розн.}}, ^\circ\text{C}$	$[\theta_{\text{екс.}} - \theta_{\text{розн.}} /\theta_{\text{сер.}}] \times 100, \%$
1	220	235,4	15,4	6,8
2	310	312,3	2,3	0,7
3	306	322	16	5,1
4	338	357	19	5,5
5	378	397,6	19,6	5,1
6	426	447,4	21,4	4,9
7	469	484	15	3,1
8	496	516,7	20,7	4,1

Розбіжність між результатами експериментальної температури, отриманими тепловізійним методом та температури розрахункової становить до 7 %, що є прийнятним для інженерних задач (7 % < 15 %). Було відмічено, що для менших величин температур було отримано вище похибку. Це може бути пов'язано з чутливістю тепловізійної камери при роботі в більш низькому діапазоні вимірювальних температур.

4.1.2 На прикладі застосування тепловізора FLIR E8

Термографічні дослідження процесу точіння проводилися на універсальному токарно-гвинторізному верстаті моделі 1А616 без застосування мастильно-охолоджувального технологічного середовища. В якості засобу вимірювальної техніки використовувався тепловізор моделі FLIR E8 [52, 53, 55]. Головні метрологічні та технічні характеристики наведено у таблиці 2.1 розділу 2.

Умови навколишнього середовища при проведенні експериментів: температура повітря 20 °С, відносна вологість 50 %. При проведенні досліджень враховувалися: фокусування камери для отримання чіткості об'єкта на термограмах, відстань до об'єкта і діапазон можливих температур. Мінімально можлива відстань від поверхонь зон тепловізійного контролю при використанні даної моделі тепловізора становить 0,5 м. Відомо, що при виборі меншої величини фокусного розташування від поверхонь об'єкта дослідження, виміри будуть проведені з використанням максимального числа пікселів по ширині області контролю, що забезпечує більш точні виміри. Враховуючи, що в ході експериментів буде проводитися обробка різних матеріалів, при яких будуть отримані різні види стружки, і щоб не пошкодити лінзу камери, відстань до об'єкта дослідження було обрано мінімально можливим – 0,6 м. Кут спостереження повинен знаходитися в діапазоні 45 – 60° за загальними рекомендаціями, але для визначення параметрів поля зору використовувались залежності (2.30 – 2.31). Розміри величин відбитків H проєкції горизонтального поля зору H_{FOV} та V проєкції вертикального поля зору V_{FOV} отримано з урахуванням кута депресії $60 \pm 2^\circ$, а саме для $H_{FOV} - H = 0,76$ м і для $V_{FOV} - V = 0,67$ м. Кут нахилу визначався за допомогою шаблону. При цьому розмір одного пікселя IFOV (миттєве поле зору) складає 2,46 мрад, а мінімальна ділянка яку розрізняє один піксель при величині дистанції, з якої здійснювалась зйомка $h = 0,6$ м складає $S = 1,47$ мм.

Схема установки тепловізора відносно об'єкту наведена на рисунку 4.1, поз. а. ІЧ-камера закріпилася в держателі штатива (рис. 4.1, поз. б) таким чином, щоб охопити зону контролю параметрів з урахуванням необхідних полів зору камери FOV (рис. 4.1 поз. в).

Для проведення експериментів використовувалися заготовки з різних матеріалів – сталей, кольорових металів, поліаміду та токарні прохідні різці з твёрдосплавними пластинами. Характеристики різних пар «оброблюваний матеріал – інструментальний матеріал» і режими обробки наведені в таблиці 4.4.

Характеристики випромінювальної здатності поверхні оброблюваних матеріалів (коефіцієнт випромінювання ϵ) визначався за допомогою довідкових матеріалів.

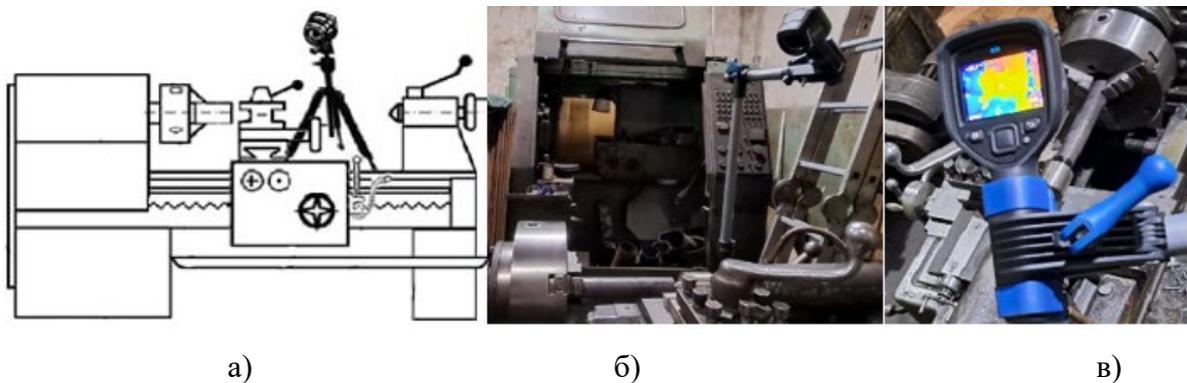


Рисунок 4.1 – Схема встановлення тепловізора відносно об'єкту дослідження

Для зручності внесення назви пар «оброблюваний матеріал – інструментальний матеріал» кожної пари присвоювався номер, відповідно – пара № 1: сталь 20 С22 – твердий сплав Р10; пара № 2: латунь CuZn38Pb2 – твердий сплав Р20; пара № 3: сталь 12Х18Н10Т (Х12 CrNiTi 18-9) – твердий сплав Р10; пара № 4: капролон TECAST Т – твердий сплав К10. Маркування оброблюваних матеріалів відповідає стандартам DIN і ISO, а інструментальних матеріалів – відповідно до стандарту ISO 513:2012 [51].

Останнім часом у машинобудуванні став широко застосовуватися багатофункціональний термопласт конструкційного та антифрикційного призначення для виготовлення замість металевих деталей TECAST Т (Капролон), який має низький коефіцієнт тертя в парі з будь-якими металами, легше бронзи та сталі та має меншу трудомісткість виготовлення [95]. Вибір капролону для порівняльного аналізу обумовлений його особливостями, пов'язаними із фізико-механічними властивостями матеріалу (низька теплопровідність, низька температура плавлення). На етапі проведення експериментальних досліджень для отримання більш точних результатів вимірювань необхідно було врахувати та компенсувати ефекти від кількох джерел випромінювання.

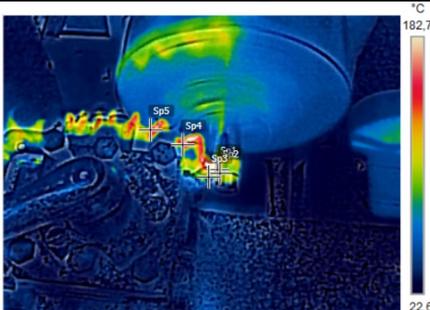
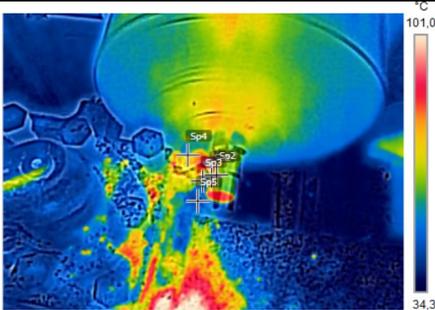
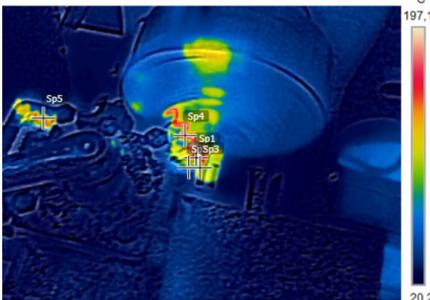
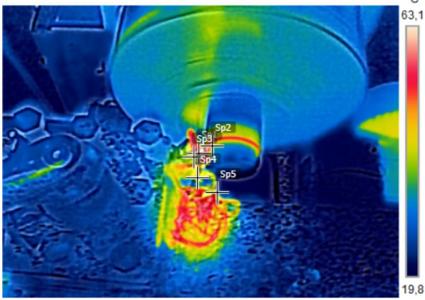
Таблиця 4.4 – Характеристики пар «оброблюваний матеріал – інструментальний матеріал» та режими обробки

№ експ.	Пара №	ε	d, mm	a_p , мм	f, мм/об	n, хв ⁻¹	T_{sp1} , °C
1	1	0,6	30	1,0	0,08	560	101
2				1,0	0,13	720	120
3				1,0	0,16	910	149
4				2,5	0,16	910	162
5	2	0,22	35	1,0	0,08	560	57
6				1,0	0,13	720	63
7				1,0	0,16	910	71
8				2,5	0,16	910	86
9	3	0,86	35	1,0	0,08	560	140
10				1,0	0,13	720	159
11				1,0	0,16	910	171
12				2,5	0,16	910	201
13	4	0,94	60	1,0	0,08	560	42
14				1,0	0,13	720	49
15				1,0	0,16	910	56
16				2,5	0,16	910	71

У цій ІЧ-камері передбачено автоматичне настроювання параметрів у реальному часі, що дозволило перед початком експериментів вносити попередньо визначені величини: коефіцієнта випромінювання об'єкта дослідження, видимої відбитої температури, відстані між об'єктом і камерою, відносної вологості, температури навколишнього повітря [51, 52]. Це програмне забезпечення є метрологічно значущим і розміщується в пам'яті пристрою камери. Далі після проведення досліджень отримані розподіли температур на поверхнях об'єкта дослідження в межах зони, що визначається полем зору оптичної системи камери, у вигляді термограм передавалися на персональний комп'ютер через USB-порт. Для візуалізації, аналізу та обробки отриманих термограм, а також створення звітів використовувалося автономне програмне забезпечення компанії виробника тепловізора – FLIR Tools та FLIR Thermal Studio, встановлене на персональний комп'ютер.

В результаті проведення експериментальних досліджень були отримані результати вимірювання з різними умовами обробки, описаними вище (табл. 4.4). Для наочності нижче показані термограми, отримані в результаті експериментів №№ 3, 6, 11, 15 (таб.4.5).

Таблиця 4.5 – Результати вимірювань експериментів №№ 3, 6, 11, 15

Умови проведення досліджень (дані з тепловізору)	
Refl. temp.:	15 °C
Distance:	0,6 m
Atmospheric temp.:	20 °C
Ext. optics temp.:	20 °C
Ext. optics trans.:	1
Relative humidity:	50%
Measurement data №3	Measurement data №6
Emissivity: 0,6	Emissivity: 0,22
Digital photo of the research object	Digital photo of the research object
	
Thermogram	Thermogram
	
Measurement data №11	Measurement data №15
Emissivity: 0,86	Emissivity: 0,94
Digital photo of the research object	Digital photo of the research object
	
Thermogram	Thermogram
	

Аналіз термограм здійснювався у програмному забезпеченні FLIR Tools. Вимірювання температури здійснювалися за допомогою точкового вимірювача spotmeter. Переміщуючи spotmeter на цифровому фото об'єкта дослідження в потрібну область, можна визначити температуру різальної пластини, заготовки, стружки. На термограмах точкою S_{p1} позначено температуру точки контакту вершини різальної пластини різця з оброблюваною заготовкою, точкою S_{p2} позначено температуру поверхні заготовки, точкою S_{p3} позначено температуру на передній поверхні інструменту, точками S_{p4} і S_{p5} позначено температури на стружці.

Результати вимірювань температур наведено у таблиці 4.6 для кожного відповідного номера експерименту з таблиці 4.5.

Таблиця 4.6 – Аналіз поданих вище термограм

Пара № / Екс. №	Режим різання			$T_{Sp1}, ^\circ\text{C}$	$T_{Sp2}, ^\circ\text{C}$	$T_{Sp3}, ^\circ\text{C}$	$T_{Sp4}, ^\circ\text{C};$ $T_{Sp5}, ^\circ\text{C}$
	$a_p, \text{мм}$	$f, \text{мм/об.}$	$n, \text{хв}^{-1}$				
1 / 3	1,0	0,16	910	149	48	32	117; 107
2 / 6	1,0	0,13	720	63	49	30	45; 38
3 / 11	1,0	0,16	910	171	48	29	135; 106
4 / 15	1,0	0,16	910	56	27	24	23; 21

Для перевірки адекватності, отриманих за допомогою тепловізора, результатів вимірювання температури в зоні контакту вершини різальної пластини різця з оброблюваною заготовкою T_{Sp1} був проведений порівняльний аналіз з результатами, отриманими при вимірюваннях температури різання методом природньої термопари T_T за методикою описаною в підрозділі 2.2 [39, 55] при обробці сталей марок С22 і Х12 Cr18-9. У таблиці 4.7 представлені результати розрахунку розбіжностей температур, отриманих за двома методами. На рисунку 4.2 та 4.3 подано результати моделювання температур за допомогою тренажера [96, 97] описаного в підрозділі 2.2.

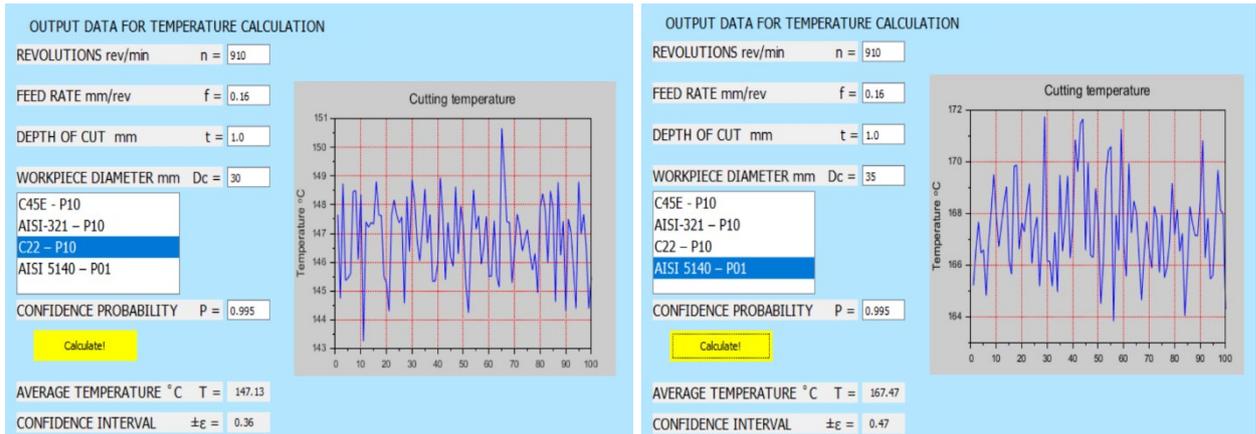


Рисунок 4.2 – Користувацький інтерфейс з результатами розрахунку

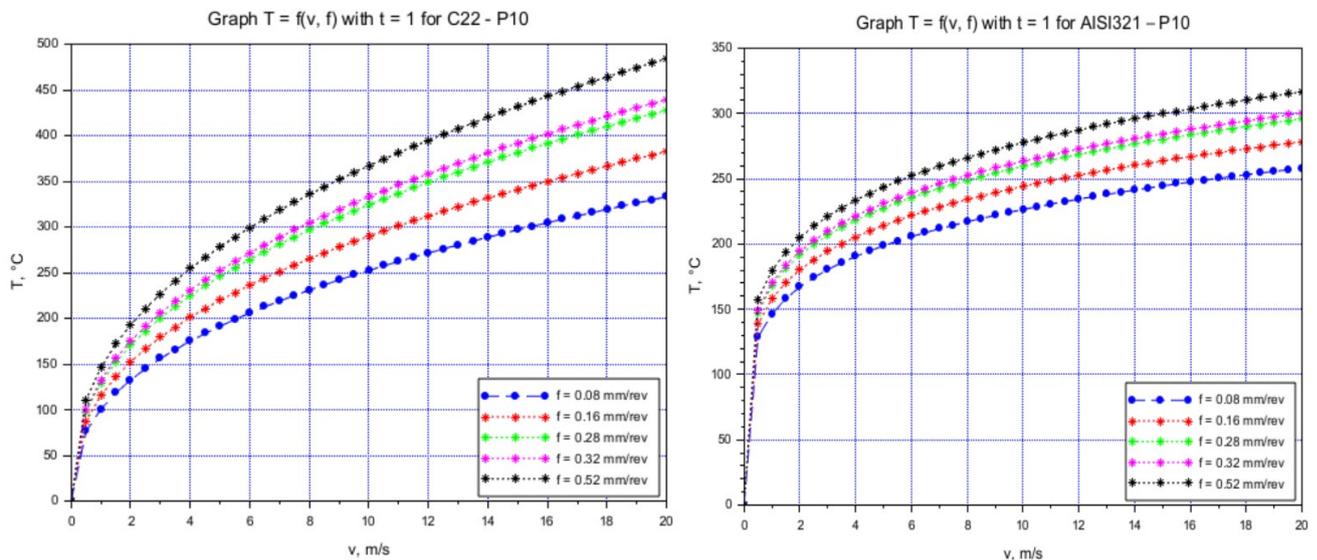


Рисунок 4.3 – Графіки залежності температури різання від режимів різання при $t = 1$ мм

Розбіжність температур (y %), виміряних тепловізором по відношенню до температур, виміряних методом природньої термопари визначалась як відношення модуля їх різниці до середнього арифметичного значення, становила від 2 до 8 %, що є прийнятним в інженерній сфері.

Проаналізувавши термограми слід зазначити, що отримані результати можна порівняти з результатами інших досліджень, висвітлених у літературі [2, 4, 5], отриманих іншими методами вимірювань. Так, наприклад, у зазначеному джерелі

[2] наведені дані щодо кількості теплоти, що переходять у стружку, заготовку та інструмент.

Таблиця 4.7 – Порівняльний аналіз температур отриманих двома способами

Пара № / Експ. №	$T_{Sp1}, ^\circ\text{C}$	$T_T, ^\circ\text{C}$	Розбіжність	
			$T_{Sp1} - T_T, ^\circ\text{C}$	$[T_{Sp1} - T_T /\bar{T}] \times 100, \%$
1 / 1	101	96	5	5,1
1 / 2	120	116	4	3,4
1 / 3	149	147	2	1,4
1 / 4	162	155	7	4,4
3 / 9	140	132	8	5,9
3 / 10	159	147	12	7,8
3 / 11	171	167	4	2,4
3 / 12	201	193	8	4,1

Необхідно також відзначити, що найбільшу складність викликає оцінювання термограм, отриманих при обробці заготовок з латуні через низький коефіцієнт випромінювання, пов'язаної з відбивною здатністю оброблюваного матеріалу, що обробляється.

4.2 Результати застосування методик визначення метрологічних характеристик тепловізійного контролю на основі експериментальних досліджень

На основі інформації поданій в підрозділі 2.3 для забезпечення достовірності тепловізійного контролю в умовах змінної геометрії спостереження важливо оцінювати, як змінюються проєкції поля зору інфрачервоної камери (відбитки *HFOV* і *VFOV*) залежно від кута депресії.

Для побудови графіків залежності відбитків від кута депресії ψ використовувались формули, визначені в підрозділі 2.3.1 (2.32 – 2.33).

Графіки представлені на рисунках 4.4 – 4.6, побудовано для моделей тепловізорів, представлених в таблиці 2.1 які використовувались в експериментальних дослідженнях.

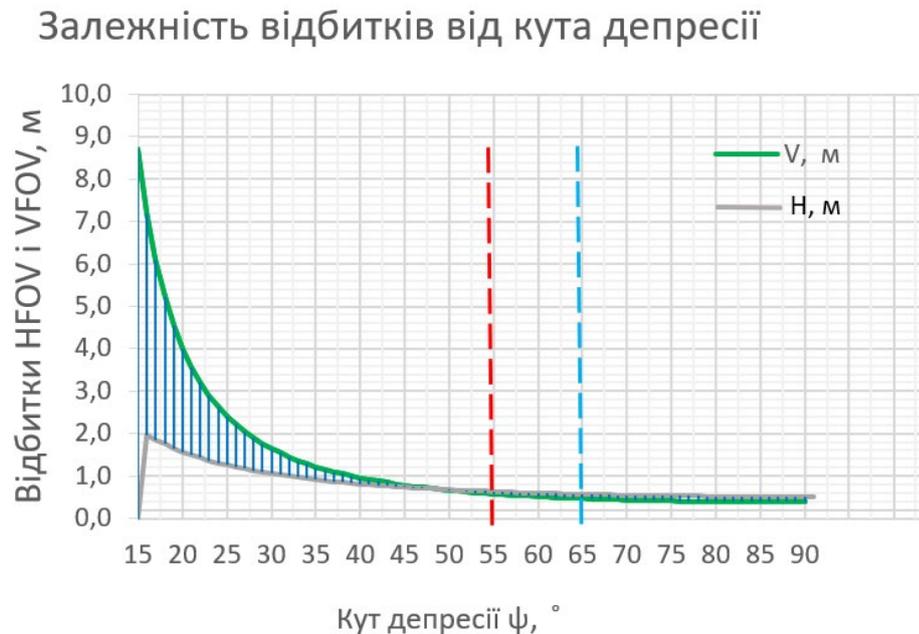


Рисунок 4.4 – Вплив кута депресії на розміри проєкцій поля зору тепловізора на поверхню об'єкта (для поля зору тепловізора Flir P640)

По осі X відкладався кут депресії ψ (в градусах), а по осі Y – лінійні розміри відбитків в зоні спостереження: $HFOV$ (H) – горизонтальний розмір відбитку (сірий графік), $VFOV$ (V) – вертикальний розмір відбитку (зелений графік).

На графіках також додано вертикальні пунктирні лінії для відображення орієнтовних порогів (наприклад, $\psi \approx 55^\circ$ – червона та $\psi \approx 65^\circ$ – блакитна для Flir P640), рекомендованих за результатами власних експериментальних досліджень. Для рекомендованого діапазону, в якості прикладу, наведено частину розрахунків у таблиці 4.8. Результати розрахунків для всіх моделей тепловізорів враховувались при проведенні експериментів.

На графіку видно, що обидві криві демонструють спадну залежність, причому зі зростанням кута депресії ψ , розміри зони, яку бачить тепловізор, зменшуються.

Таблиця 4.8 – Результати розрахунків впливу кута депресії на розміри проєкції поля зору тепловізора V та H на поверхню об'єкта (для $h=1,2$ м)

$\psi, ^\circ$	$\psi - VFOV/2$	$\psi + VFOV/2$	$V, \text{ м}$	$H, \text{ м}$
55	46	64	0,573	0,623
56	47	65	0,559	0,615
57	48	66	0,546	0,608
58	49	67	0,533	0,602
59	50	68	0,522	0,595
60	51	69	0,511	0,589
61	52	70	0,501	0,583
62	53	71	0,4910	0,578
63	54	72	0,482	0,573
64	55	73	0,473	0,568
65	56	74	0,465	0,563

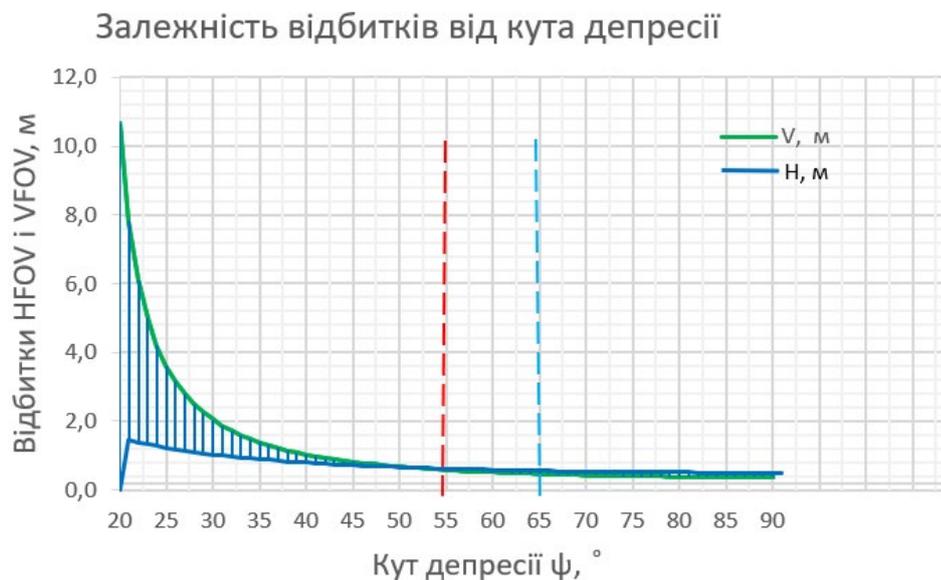


Рисунок 4.5 – Вплив кута депресії на розміри проєкції поля зору тепловізора на поверхню об'єкта (для поля зору тепловізора Flir E8)

Величина проєкції від *HFOV* зменшується повільніше, ніж величина проєкції *VFOV* – це видно з того, що синій графік *H* лежить вище за зелений *V* при $\psi > 50^\circ$.

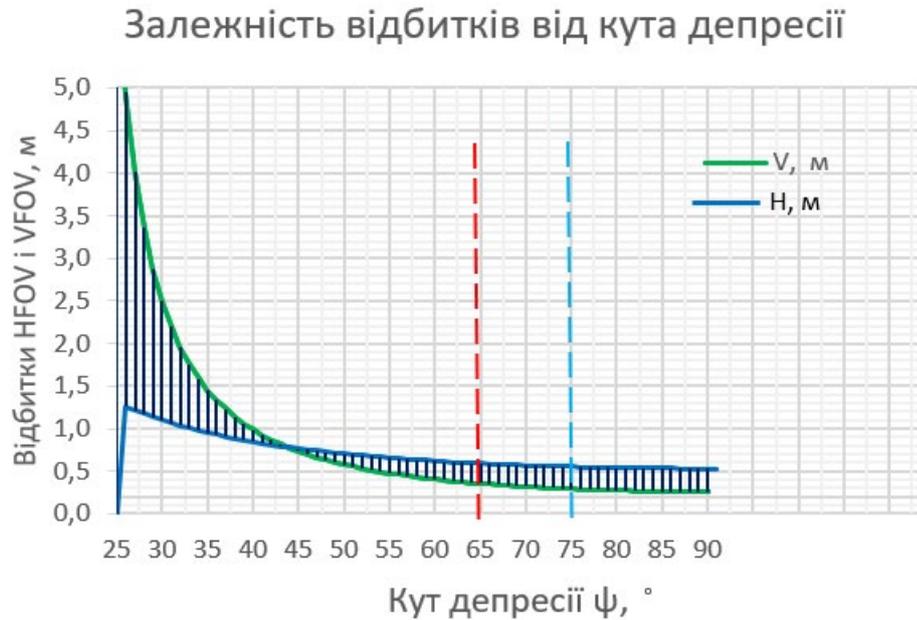


Рисунок 4.6 – Вплив кута депресії на розміри проєкції поля зору тепловізора на поверхню об'єкта (для поля зору тепловізора UTi720E)

Варто відмітити, що для тепловізора UTi720E картина дещо змінюється, що пояснюється більш широким кутом *HFOV* поля зору у порівнянні з камерою Flir E8. Тому, граничне значення кута ψ для оптимального захоплення зони () складатиме $65 - 75^\circ$. Рекомендований поріг пояснюється співвідношенням розмірів, пов'язаних з роздільною здатністю, а саме розмірами області інтересів.

Нижче подано графік зміни температури у часі з апроксимацією логарифмічною функцією, на основі якого можна зробити оцінку точності моделі. Логарифмічна модель дозволяє описати процес однією формулою:

$$T(t) = a \cdot \ln(t) + b,$$

що спрощує аналіз отриманої залежності.

Для побудови графіку використовувались дані з CSV файлу експортованого з відеозапису при встановленні максимальної температури з кожного кадру впродовж обробки заготовки. Графік залежності $T = f(t)$ наведено на рисунку 4.7. На графіку наведено рівняння логарифмічної функції та величина коефіцієнту детермінації. Оцінка точності обраної моделі здійснювалась на основі коефіцієнту детермінації R^2 , з послідовним оцінюванням залишків моделі.

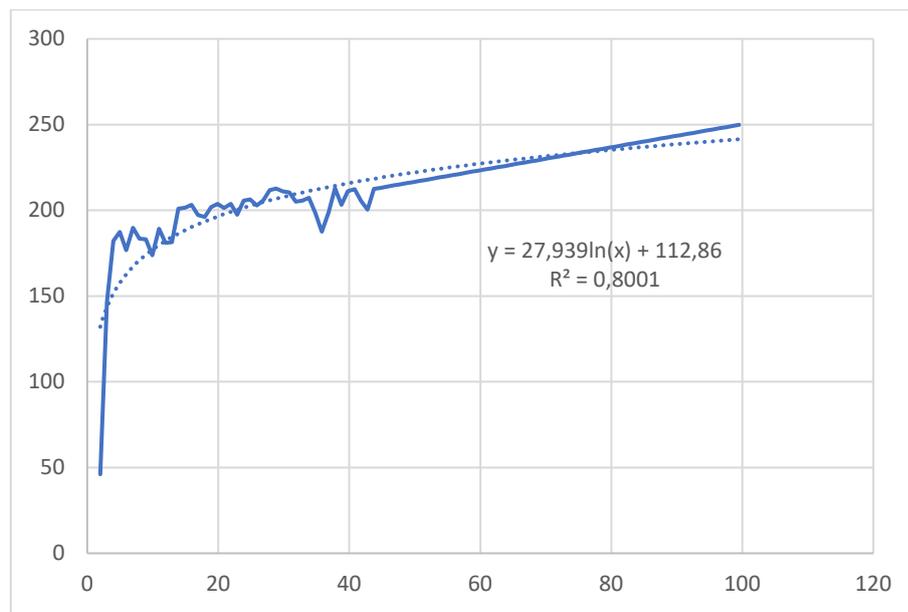


Рисунок 4. 7 – Графік залежності для визначення зміни температури від часу обробки

Наведений графік зміни температури у часі дозволяє наочно оцінити перебіг теплового стану процесу та встановити характер температурного тренду на основі експериментальних даних, отриманих з відеозапису тепловізора.

Оцінювання еквівалентної шуму різниці температур NETD здійснювалось у відповідності до методики, описаній в підрозділі 3.2. Для цього, нагріті заготовки в муфельній печі до заданої температури (100, 150, 200, 250 °C) з послідовним вимірюванням температури за допомогою тепловізорів та отримані дані серії по 10 термограм опрацьовувались в програмних середовищах фірм виробників. Для вибраної області кадру ROI розміром 100x100 пікселів на об'єкті термограми (рис. 4.8) за допомогою імпортованих файлів .csv обчислювались середні значення ROI

за всіма кадрами. Дані вимірювань для області з 1 кадру ROI розміром 100x100 пікселів (на термограмі позначено як Bx1) представлено у таблиці 4.9.

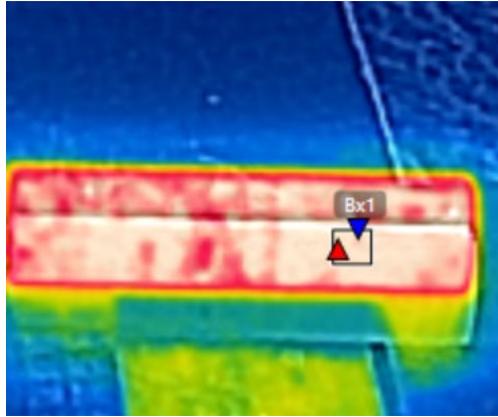


Рисунок 4.8 – Термограма нагрітої заготовки до заданої температури та вибраною областю ROI

Таблиця 4.9 – Дані вимірювань для області ROI розміром 100x100 пікселів термограми

Bx1											
Parameters:	Emissivity: 0,86										
	Refl. temp.: 15 °C										
	Distance: 0,5 m										
№ Pixels	Pixels 1-10	Pixels 11-20	Pixels 21-30	Pixels 31-40	Pixels 41-50	Pixels 51-60	Pixels 61-70	Pixels 71-80	Pixels 81-90	Pixels 91-100	1/(N-1)
Frame 1, T, °C	198,9	201,2	199,3	198,1	197,1	197,4	201,1	199,7	200,2	202,4	0,010101
	202,9	198,3	201	198,6	197,1	201,6	198,9	199,3	200,5	202	
	200,8	202,2	198,6	201,8	198,1	202,7	201,1	198,3	202,7	201,4	
	198,5	198,3	200,1	197,2	198,2	199,5	199,2	199,8	198,7	200,5	
	202,2	197,7	200,1	197,8	201,3	199,4	200,4	198,1	197,9	199,9	
	199,1	202,6	201,6	201,5	202,4	197,5	200,3	200,5	202,8	198,8	
	198,4	197,6	197,1	202,6	201	201,7	198,7	200,5	197,4	199,9	
	202,9	202,3	199,0	202,8	198,4	202,7	202,6	201,8	200,8	202,2	
	198,8	202,1	200,7	197,1	199,1	197,9	202,9	199,9	200	200,8	
	199,2	197,8	201,9	198,1	200,1	198,3	197,6	202,2	202,8	202,8	
NxN	100										
\bar{T}	200,1										

Для опрацювання даних вимірювань використовувались формули, наведені в підрозділі 2.3. Аналогічно опрацьовуються дані з інших термограм серії.

Таблиця 4.10 – Опрацювання даних вимірювань для області ROI розміром 100x100 пікселів термограми

Ti-Tcp											
Pixels 1-10	Pixels 11-20	Pixels 21-30	Pixels 31-40	Pixels 41-50	Pixels 51-60	Pixels 61-70	Pixels 71-80	Pixels 81-90	Pixels 91-100		
-1,15	1,15	-0,75	-1,95	-2,95	-2,65	1,05	-0,35	0,15	2,35		
2,85	-1,75	0,95	-1,45	-2,95	1,55	-1,15	-0,75	0,45	1,95		
0,75	2,15	-1,45	1,75	-1,95	2,65	1,05	-1,75	2,65	1,35		
-1,55	-1,75	0,05	-2,85	-1,85	-0,55	-0,85	-0,25	-1,35	0,45		
2,15	-2,35	0,05	-2,25	1,25	-0,65	0,35	-1,95	-2,15	-0,15		
-0,95	2,55	1,55	1,45	2,35	-2,55	0,25	0,45	2,75	-1,25		
-1,65	-2,45	-2,95	2,55	0,95	1,65	-1,35	0,45	-2,65	-0,15		
2,85	2,25	-1,05	2,75	-1,65	2,65	2,55	1,75	0,75	2,15		
-1,25	2,05	0,65	-2,95	-0,95	-2,15	2,85	-0,15	-0,05	0,75		
(Ti-Tcp)^2										$\sum(T-T_{tcp})^2$	σ_T
Pixels 1-10	Pixels 11-20	Pixels 21-30	Pixels 31-40	Pixels 41-50	Pixels 51-60	Pixels 61-70	Pixels 71-80	Pixels 81-90	Pixels 91-100		
1,33	1,31	0,57	3,82	8,73	7,05	1,09	0,13	0,02	3,82	315,16	1,78
8,10	3,08	0,89	2,12	8,73	2,39	1,33	0,57	0,20	2,12		
0,56	4,60	2,12	3,05	3,82	7,00	1,09	3,08	7,00	3,05		
2,42	3,08	0,00	8,15	3,44	0,31	0,73	0,06	1,83	8,15		
4,60	5,54	0,00	5,08	1,55	0,43	0,12	3,82	4,64	5,08		
0,91	6,48	2,39	2,09	5,50	6,53	0,06	0,20	7,54	2,09		
2,74	6,02	8,73	6,48	0,89	2,71	1,83	0,20	7,05	6,48		
8,10	5,04	1,11	7,54	2,74	7,00	6,48	3,05	0,56	7,54		
1,57	4,18	0,42	8,73	0,91	4,64	8,10	0,02	0,00	8,73		

Величина стандартного відхилення температурного сигналу в пікселях ROI для серії термограм при сталому температурному навантаженні σ_T склала 1,81 при отриманих даних з серії термограм σ_{Ti} (1,78; 1,72; 1,80; 1,86; 1,84; 1,80; 1,90; 1,75; 1,86; 1,80).

4.3 Оцінювання невизначеності вимірювання температури методу інфрачервоної термографії на прикладі тепловізійного контролю

Оцінювання «невизначеності вимірювання температури методом тепловізійного контролю здійснювалось для визначеної задачі вимірювання та відповідної моделі – яку визначено математичною залежністю між вихідною Y і вхідними X_i фізичними величинами, від яких вона залежить: $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$

та яка описана в підрозділі 3.4 (2.39). Для встановлених складових здійснювалось обчислення невизначеності за типами А і В.

Стандартна невизначеність пов'язана з тепловою чутливістю u_{NETD} за умов експериментального визначення області інтересу ROI 10x10 пікселів, обумовлена випадковим характером джерел та обчислюється за формулою:

$$u_{NETD} = \sigma_T / \sqrt{2 \cdot (N - 1)} = 1,81 / \sqrt{2 \cdot (10 - 1)} = 0,43 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Величина σ_T визначалася за формулою 2.38 та обраховувалась в підрозділі 4.2.

Стандартна невизначеність камери $u_{пр}$ відповідно до даних отриманих з специфікації оцінювали для приладу Flir E8. В якості прикладу для розрахунку взято обробку заготовки зі сталі 12X18H10T (AISI 321) діаметром 35 мм, з режимами різання – частота обертів 910 хв^{-1} , глибина різання 2,5 мм, подача 0,16 мм/об за формулою:

$$u_{пр} = \left(4 / \sqrt{3} \right) = 2,32 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Внесок від температури відбиття для оцінювання загальної невизначеності вимірювань оцінювався за залежністю:

$$u_{T_{відб}} = (1 - 0,86) \cdot u(T_{відб}) = 0,12 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$u(T_{відб}) = \sqrt{\frac{2,92}{4}} = 0,85 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Для визначення $T_{відб}$ в ході проведення експериментів використовували методику [70], після чого розраховувалась середня величина з $N = 5$ вимірювань з

послідовним обчисленням середньої температури відбиття $\overline{T_{\text{відб}}}=23$ °С. Дані послідовних вимірювань складали – 22,5; 23,8; 22,1; 24,0; 22,6 °С.

Оцінювання комбінованої стандартної невизначеності для камер пістолетного типу:

$$u_c = \sqrt{2,32^2 + 0,43^2 + 0,12^2} = 2,36 \text{ °С.}$$

Розрахунок розширеної невизначеності:

$$U = 2 \cdot 2,36 = 4,72 \text{ °С.}$$

Відповідно можна записати результат вимірювання температури, яка дорівнює $T = 201$ °С, величина з відеофайлу) то:

$$T = 201 \pm 4,7 \text{ °С.}$$

Стандартна невизначеність камери $u_{\text{пр}}$ відповідно до даних отриманих з специфікації оцінювали для приладу Flir P640 для запису відео. В якості прикладу для розрахунку взято обробку матеріалу сталь 12X18H10T (AISI 321) з режимами різання – частота обертів 400 хв^{-1} , глибина різання 1,5 мм, подача 0,32 мм/об за формулою:

$$u_{\text{пр}} = \left(\frac{5}{\sqrt{3}} \right) = 2,9 \text{ °С.}$$

У тепловізійної відеокамери оцінювання невизначеності зміни температури за часом $T(t)$ здійснювалося на основі радіометричної інформації, отриманої за результатами експерименту. Після візуалізації залежності зміни температури за часом $T(t)$ та апроксимації за логарифмічною функцією з оцінкою залишкових відхилень між вимірюваними значеннями та значеннями отриманими з моделі було оцінено величину стандартної невизначеності вимірювань T_e :

$$u_{Te} = \sqrt{\frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^n e_i^2} = 6,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Стандартна невизначеність оцінювалась через стандартне відхилення залишків моделі.

Оцінювання комбінованої стандартної невизначеності для ІЧ відеокмери:

$$u_c = \sqrt{2,9^2 + 0,12^2 + 6,2^2} = 6,85 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Розрахунок розширеної невизначеності:

$$U = 2 \cdot 6,85 = 13,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Відповідно можна записати результат вимірювання температури максимальної за час обробки (яка дорівнює $T = 250 \text{ } ^\circ\text{C}$, величина з відеофайлу) то:

$$T = 250 \pm 13,7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Отримавши результат, можна підсумувати, що на результат вимірювань впливає багато факторів але найбільший внесок становить складова зміни температури за часом. Дана складова може бути уточнена за рахунок розбиття логарифмічної моделі на дві фази, враховуючи швидкій приріст температури в першій фазі за 1 с та поступове зростання в подальшому.

4.4 Верифікація передбачених нейронною мережею показників

Через те що нейронна мережа не здатна робити точних замірів, а робить передбачення на основі раніше проведеного навчання та зафіксованих паттернів теплового розподілення, а простих порівнянь на графіку різниці між передбаченою

температурою та реальною (рис. 4.9) – не достатньо, то стає необхідно проводити контроль отриманих показань. Для цього в системі передбачено блок розрахунку похибок, який виводить у консоль розрахунок абсолютної, середньоквадратичної та відносної похибок ПЗ для кожної із зон різання (зона різання, стружка, заготовка). Цей модуль працює тільки за наявності таблиці CSV з реальними показниками тепловізійного контролю, і використовує їх як еталонні для порівняння.

Розрахунок абсолютної похибки (Δ) між передбаченим значенням та реальним буде виглядати наступним чином:

$$\Delta_i = |\hat{y}_i - y_i|, \quad (4.1)$$

де Δ_i – це абсолютна похибка i -го кадру;

\hat{y}_i – передбачене значення;

y_i – реальне значення.

Оскільки виводити розрахунок похибки для кожного кадру не є раціональним рішенням через надмірну кількість записів у консоль, то система виводить показник середньої абсолютної похибки ($\Delta_{\text{сеп}}$) для усього проміжку кадрів:

$$\Delta_{\text{сеп}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|, \quad (4.2)$$

де n – це кількість кадрів у запису SEQ.

Середньоквадратичне відхилення:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}, \quad (4.3)$$

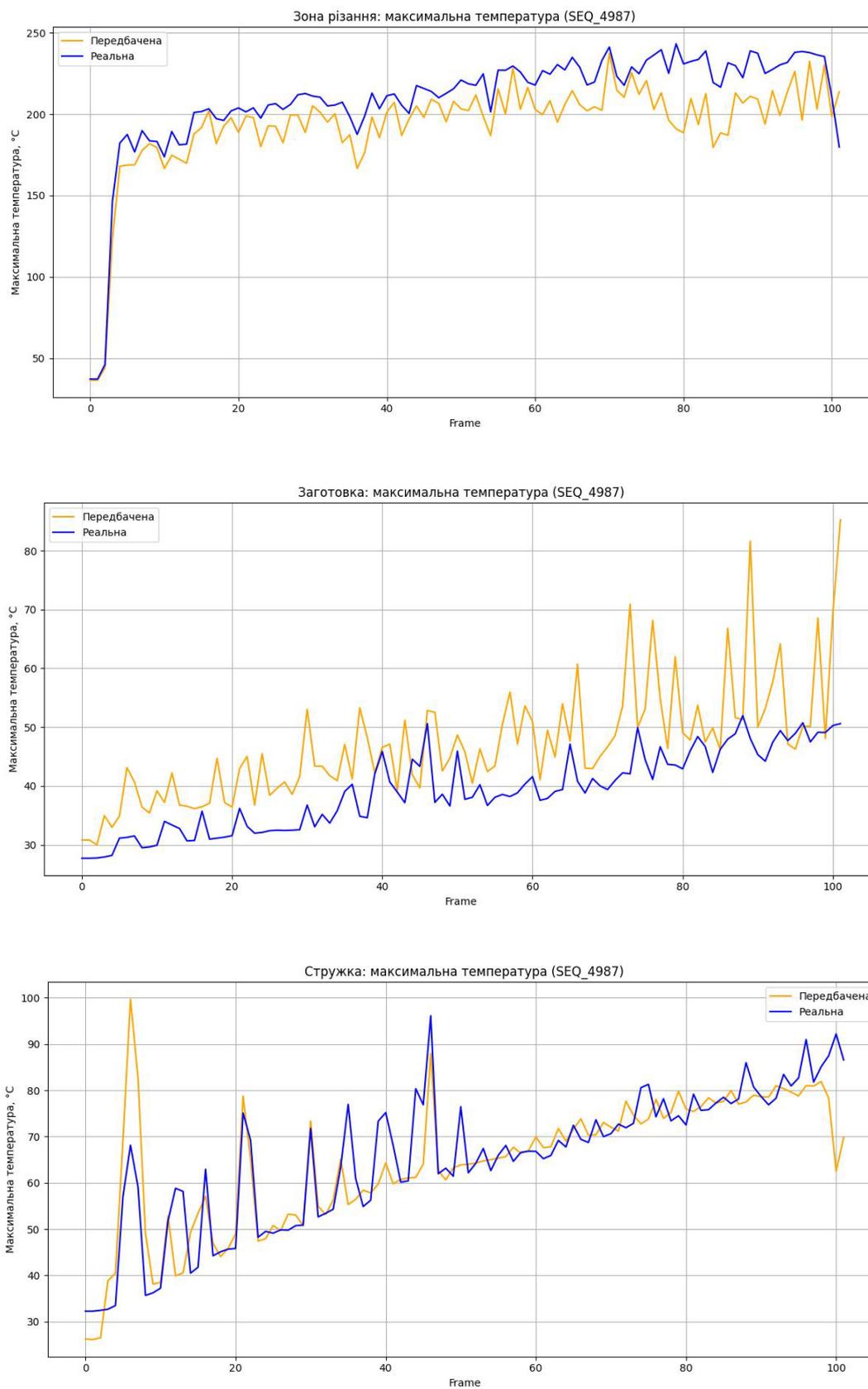


Рисунок 4.9 – Графіки порівняння справжньої температури до передбаченої для кожної із зон

де \hat{y}_i – передбачене значення;
 y_i – реальне значення.

Відносна похибка, визначається як середнє значення відношення абсолютної похибки до середнього значення:

$$\delta_i = \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right| \times 100\%. \quad (4.4)$$

З урахуванням необхідності розрахувати відносну середню похибку для загальної кількості кадрів n , то формула буде виглядати наступним чином:

$$\delta_{\text{сеп}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^1 \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right| \times 100\%, \quad (4.5)$$

Розрахунок за цими формулами реалізуємо за допомогою мови програмування Python наступним чином:

```
def calc_metrics(pred, real, name=""):
    mask = ~np.isnan(pred[:min_len]) & ~np.isnan(real[:min_len])
    pred = np.array(pred[:min_len])[mask]
    real = np.array(real[:min_len])[mask]
```

А за допомогою наступного блоку виводимо отримані результати у консоль:

```
print("\n--- Похибки передбачення NN відносно реальної температури (MAX): ---")
    metrics['riz'] = calc_metrics(df_nn['riz_max_pred'],
df_real['riz_max_real'], "Зона пізання")
    metrics['struzhka'] = calc_metrics(df_nn['struzhka_max_pred'],
df_real['struzhka_max_real'], "Стружка")
    metrics['zagotovka'] = calc_metrics(df_nn['zagotovka_max_pred'],
df_real['zagotovka_max_real'], "Заготовка")
```

Таким чином, система автоматично обраховує похибки та виводить їх у консоль, для того щоб оператор міг оцінити роботу ПЗ без необхідності самому

виконувати розрахунки. Фрагмент звіту системи у консолі про розрахунок похибки ПЗ наведено нижче:

```

--- Похибка передбачення NN відносно реальної температури (MAX): ---
Різання: Абсолютна похибка = 16.43°C, Середньоквадратичне відхилення =
19.86°C, Відносна похибка = 7.65% (n=102)
Стружка: Абсолютна похибка = 5.11°C, Середньоквадратичне відхилення = 8.02°C,
Відносна похибка = 8.18% (n=102)
Заготовка: Абсолютна похибка = 8.04°C, Середньоквадратичне відхилення =
10.58°C, Відносна похибка = 20.87% (n=102)

```

В цілому отриманий результат відносної похибки попадає в діапазон $\pm 10\%$ окрім зони заготовки. Це пов'язано з тим, що основна зона різання та стружка – це дуже малі проте дуже яскраві об'єкти на кадрі, в той час як заготовка це великий об'єкт у кадрі, де процес нагрівання відбувається тільки у біля зони різання, що призводить до планомірного охолодження заготовки під час обертання. Система ж в цей час розпізнає заготовку за зовнішніми ознаками та габаритами та рахує і виводить середнє значення по температурі, що суттєво відрізняється від зони різання та локального нагріву заготовки.

Висновки до розділу 4

В четвертому розділі визначено умови проведення експериментів, для оцінювання концентрації частинок пилу використовували тестер «Walcom HT-9600», також визначались температура та відносна вологість. Визначено параметри поля зору, розміри величин відбитків H проекції горизонтального поля зору $HFOV$ та V проекції вертикального поля зору $VFOV$ отримано з урахуванням кута депресії та надано рекомендації для різних моделей тепловізійних камер, з врахуванням співвідношення параметрів поля зору та роздільної здатності тепловізору.

Проведено експерименти із застосуванням різних тепловізорів Flir P640, FLIR E8 та UTi720E та опрацьовано результати. На основі отриманих експериментальних даних було оцінено невизначеність вимірювання температури

методом інфрачервоної термографії для камери пістолетного типу та відеокамери. На основі отриманих результатів, у випадку застосування відеокамери для досліджень, було визначено, що серед багатьох факторів, які впливають на результат вимірювань найбільший внесок становить складова зміни температури за часом, яка оцінювалась на основі радіометричної інформації з інфрачервоних тепловізійних відео.

Опрацьовано результати роботи ШНМ з обробкою відео записів термограм з тепловізору Flir P640 та проведено їх верифікацію, з урахуванням реальних показників термограм. Отримані результати потрапляють в діапазон похибок $\pm 10\%$, окрім поверхні заготовки. Це пов'язано з тим, що заготовка має більшу масу та площу порівняно з інструментом, тому вона швидко віддає тепло в навколишнє середовище. Більша величина похибки температури на поверхні заготовки, зумовлена специфікою процесу різання з урахуванням переміщення інструменту вздовж заготовки, а й відповідно переміщення найгарячішої точки зони контакту. Після проходження різального інструмента тепло, яке утворюється в зоні різання, розсіюється: частково в стружку (до 60 – 80% тепла), частково – в різальний інструмент і лише небагато в заготовку (5 – 15%). Окрім того, під час обертання заготовки створюється вітровий ефект, який сприяє швидкому охолодженню поверхні, тобто температура на поверхні заготовки в процесі обробки дуже різниться та має місце ефект температурного контрасту.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача вимірювання параметрів теплового стану зони різання при зовнішньому точінні на основі розробки інформаційно-вимірювальної системи тепловізійного контролю.

1. На основі проаналізованих особливостей теплообміну у процесі різання, основних закономірностей теплоутворення та існуючих методів та засобів вимірювання температури, зроблено порівняльний аналіз методів та засобів вимірювання температури, придатних для застосування при обробці різанням. Визначено подальші напрямки використання неруйнівного контролю за допомогою тепловізійної камери та метрологічні аспекти застосування цих пристроїв при зовнішньому точінні.

2. Для підвищення інформативності та достовірності результатів тепловізійного спостереження було визначено підхід до моделювання теплового стану зони різання на основі рівняння теплопровідності з урахуванням початкових та крайових умов. Описано спрощену математичну модель для верифікації експериментальних температур отриманих методом тепловізійного контролю. Запропоновано ввести коригувальний коефіцієнт, отриманий на основі лінійної регресійної моделі.

3. Розроблено програмний тренажер, що дозволяє аналізувати залежність температури різання при зміні параметрів швидкості різання і подачі при заданому значенні глибини різання для різних комбінацій пар «оброблюваний матеріал – матеріал різального інструменту» за допомогою графічної візуалізації залежності температури різання від параметрів режиму різання.

4. Визначено методики оцінювання метрологічних характеристик тепловізійних камер, а саме: визначення просторової роздільної здатності та теплової чутливості, з урахуванням характеристик поля зору тепловізійної камери.

5. Під час виконання експериментів враховано вплив кута депресії на величини відбитків проєкцій вертикального та горизонтального складових поля

зору за результатами проведених розрахунків та апробовано при визначенні оптимального позиціонування тепловізору.

6. Запропоновано адаптовану методику оцінювання характеристики NETD для об'єктів дослідження в умовах нестационарних режимів на основі даних отриманих з серії термограм (до 10 кадрів), отриманих за умов контрольованого нагріву об'єкту в муфельній печі і послідовною обробкою визначеної ROI-ділянки (розміром 100×100) пікселів та обчисленням стандартного відхилення температури в межах обраної ROI.

7. У відповідності до підходів GUM здійснено оцінювання невизначеності вимірювань. Враховано внески від інструментальних похибок – параметрів точності тепловізору та теплової чутливості NETD.

8. Запропоновано залежність для оцінювання стандартної невизначеності зміни температури за часом $T(t)$ для результатів вимірювання, отриманих з тепловізійних відеокамер через стандартне відхилення залишків апроксимованої моделі.

9. Розроблено гібридний алгоритм бінаризації згідно із вимогами до обробки термограм для формування навчальної вибірки для згорткової нейронної мережі. Алгоритм складається з методу фіксованих порогів та адаптивного методу.

10. Була сформована та розбудована архітектура згорткової нейронної мережі з використанням фреймворків TensorFlow та Keras, що дало змогу реалізувати архітектуру U-Net. Для забезпечення якісного навчання був використаний алгоритм навчання з «Вчителем», коли за неякісні результати система отримує штрафи, що понижує вагу погано навчених тензорів, тим самим підсилюючи вплив на результат якісно навчених тензорів.

11. Отримане ПЗ дає змогу навчати та корегувати навчальну вибірку, та дає точні передбачення щодо температури. За допомогою інференсу реалізовано можливість опрацьовувати інші термограми на базі вже навченої моделі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Shaw, M. C. Metal cutting principles. – 2nd ed. – New York : Oxford University Press, 2005. – 651 p.
2. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів: підручник [для вищ. навч. закладів] / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новосьолов, Ф.Я. Якубов; під заг. ред. М.П. Мазура. – 2-е вид. перероб. і доп. – Львів: Новий світ – 2000, 2011. – 422 с.
3. Childs, T., Maekawa K., Obikawa T. & Yamane Y. Metal Machining.: Theory and Applications. Butterworth-Heinemann, London-New York-Toronto (2000).
4. Якимов А.В. Теплофизика механической обработки: Учеб. пособие / А.В. Якимов, П.Т. Слободяник, А.В. Усов. – К.; Одесса: Лыбидь, 1991. – 240с.
5. Якимов О.В. Теплофізика механічної обробки: Підручник / О.В. Якимов, А.В. Усов, П.Т. Слободяник, Д. В. Іоргачов. – Одесса: Астропрінт, 2000. – 256 с.
6. Теплометрия: теория, метрология, практика. Монография в трех книгах. / Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша, Л.И. Воробьев [и др.]; под ред. д-р техн. наук Т.Г. Грищенко. Кн. 1: Методы и средства измерения теплового потока - К.: Институт технической теплофизики НАН Украины, 2017. – 438 с.
7. Vacci da Silva, M., Wallbank, J.: Cutting temperature: prediction and measurement methods – a review. Journal of Materials Processing Technology, 88(1–3), 195202 (1999). DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00395-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00395-1)
8. Guimarães B, Rosas J, Fernandes C.M, Figueiredo D, Lopes H, Paiva O.C, Silva F.S, Miranda G.: Real-Time Cutting Temperature Measurement in Turning of AISI 1045 Steel through an Embedded Thermocouple – A Comparative Study with Infrared Thermography. Journal of Manufacturing and Materials Processing. 7(1), 50 (2023). <https://doi.org/10.3390/jmmp7010050>
9. Nyatte, J., Epee, F., Kikmo, W., Batambock, S., Abbe, C. and Nzengwa, R.: Prediction of Wearing of Cutting Tools Using Real Time Machining Parameters and Temperature Using Rayleigh-Ham Method. Modern Mechanical Engineering, 13, 35–54 (2023). doi:10.4236/mme.2023.132003.

10. Cichosz P, Karolczak P, Waszczuk K.: Review of Cutting Temperature Measurement Methods. *Materials*. 16(19), 6365 (2023). <https://doi.org/10.3390/ma16196365>
11. Pereira Guimarães, B.M., da Silva Fernandes, C.M., Amaral de Figueiredo, D. & Macedo Miranda M.G.: Cutting temperature measurement and prediction in machining processes: comprehensive review and future perspectives. *Int J Adv Manuf Technol* 120, 2849–2878 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08957-z>
12. Jinghui Han, Zhiyong Liu, Kaiwei Cao, Long Xu, Tielin Shi, Guanglan Liao Cutting temperature measurement in turning using fiber-optic multi-spectral radiation thermometry and its application in tool wear status recognition., *Measurement*, Volume 198, 2022, Page111413 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111413>
13. Bagavathiappan, S., Lahiri, B.B., Saravanan, T., John Philip, Jayakumar, T. Infrared thermography for condition monitoring – A review, *Infrared Physics & Technology*, Volume 60, 2013, Pages 35-55, <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2013.03.006>.
14. De Maddis, M., Lunetto, V., Razza, V., & Russo Spena, P. (2022). Infrared Thermography for Investigation of Surface Quality in Dry Finish Turning of Ti6Al4V. *Metals*, 12(1), 154. <https://doi.org/10.3390/met12010154>
15. Uhryński, A., Nurkusheva, S., Usserbayev, M., Hyla, P., and Bembenek, M. (2024). A Comparative Thermal Analysis of Two Workpiece Materials of Different Machinability When Turning Based on Ir Thermography. *Journal of Machine Engineering*, 24(1), pp.50-59. <https://doi.org/10.36897/jme/185359>
16. Carlos Henrique Lauro, Lincoln Cardoso Brandão, and Sergio Luiz Moni Ribeiro Filho. Monitoring the temperature of the milling process using infrared camera.
17. Brili, N., Ficko, M., & Klančnik, S. (2021). Tool Condition Monitoring of the Cutting Capability of a Turning Tool Based on Thermography. *Sensors*, 21(19), 6687. <https://doi.org/10.3390/s21196687>
18. Oborsky, G.A., Goloborodko V., Perperi L.M. 2024. Implementation of the hybrid binarisation method for thermogram analysis. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. 2(70) (2024), 123–130. <https://doi.org/10.15276/opu.2.70.2024.14>

19. Oláh, J.; Aburumman, N.; Popp, J.; Khan, M.A.; Haddad, H.; Kitukutha, N.: Impact of Industry 4.0 on Environmental Sustainability. Sustainability 12, 4674 (2020). <https://doi.org/10.3390/su12114674>
20. Furstenau, L. B. et al.: Link Between Sustainability and Industry 4.0: Trends, Challenges and New Perspectives. In IEEE Access, vol. 8, pp. 140079-140096 (2020). <https://doi:10.1109/ACCESS.2020.3012812>.
21. Криксунов Л.З. Тепловизоры. Справочник / Л.З. Криксунов, Г.А. Падалко. – К.: Техника, 1987. – 164 с.
22. Minella, M. Algoritmi di elaborazione di immagini termiche per analisi dei difetti superficiali: su componenti in fibre composite di carbonio e in acciaio [Master's thesis, Università degli Studi di Padova]. Università degli Studi di Padova, Facoltà di Ingegneria (2013) – 140 p.
23. Eisenkrein-Kreksch H., Bavendiek F. Detektierung von Betonschäden an schwer zugänglichen Bauwerken mittels Thermografie [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/ressourcen/dateien/veranstaltungen/seub/9-seub_2017/SEUB2017_03_Eisenkrein-Kreksch_Bavendiek.pdf/?lang=en
24. Назаренко Л.А. Фізичні основи джерел світла: Навчальний посібник. – Харків: ХНАМГ, 2009. - 206 с.
25. Minkina, W., Dudzik, S. Infrared thermography: Errors and uncertainties. – Chichester: John Wiley & Sons, 2009. – 251 с.
26. Vollmer, M., Möllmann, K.-P. Infrared thermal imaging: Fundamentals, research and applications. – Weinheim : Wiley-VCH, 2011. – 552 с.
27. Holst, G. C. Common sense approach to thermal imaging. – Winter Park (FL): JCD Publishing; SPIE Optical Engineering Press, 2000. – 202 с.
28. ДСТУ ISO 10878:2016. Неруйнівний контроль. Інфрачервона термографія. Характеристики систем та устаткування (ISO 10878:2013, IDT). – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 24 с.
29. Класифікація тепловізорів та отримання ними зображення [Електронний ресурс] // Forca.com.ua. – Режим доступу:

<https://forca.com.ua/info/teploviziinii/klasifikaciya-teplovizoriv-ta-otrimannya-nimi-zobrazhennya.html>, вільний. – Назва з екрана. – Дата звернення: 01.12.2023.

30. Тепловізори: що вибрати? [Електронний ресурс] // Rama.com.ua. – Режим доступу: <https://rama.com.ua/teplovizori-shho-vibrati/>, – Дата звернення: 01.12.2023.

31. Дзіковська, Ю. М. Нормативно-технічне забезпечення вимірювань розподілу температури теплового поля об'єктів промисловості та медицини : дис. канд. техн. наук: 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення / Юлія Миколаївна Дзіковська. – Харків, 2017. – 199 с.

32. Озгович А., Панчук О. Методи і засоби вимірювання розподілу температури // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2017. – № 78. – С. 35–42.

33. Chrzanowski, K. Testing Thermal Imagers: Practical Guidebook / Krzysztof Chrzanowski. – Warsaw: Military University of Technology, 2010. – 164 p.

34. What is NETD in a Thermal Camera? [Електронний ресурс] // MoviTHERM. – Режим доступу: <https://movitherm.com/blog/what-is-netd-in-a-thermal-camera/>

35. Anny D. The Challenges of Temperature Measurement in Rotating Objects [Електронний ресурс] // ResearchGate. – 2023. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/390426093_The_Challenges_of_Temperature_Measurement_in_Rotating_Objects (дата звернення: 02.06.2024).

36. ISO 10880:2017. Non-destructive testing – Infrared thermographic testing – General principles. Geneva: International Organization for Standardization, 2017. 13 p.

37. ISO/DIS 18251-1:2015. Non-destructive testing – Infrared thermography – Part 1: Characteristics of system. Geneva: International Organization for Standardization, 2015. 21 p.

38. D. Pan, Z. Jiang, W. Gui, X. Maldague and K. Jiang, "Influence of Dust on Temperature Measurement Using Infrared Thermal Imager," in IEEE Sensors Journal, vol. 20, no. 6, pp. 2911-2918, 15 March 15, 2020, doi: 10.1109/JSEN.2019.2957064.

39. Oborskyi, G., Gugnin, V., Perperi, L., Goloborodko, G., Goloborodko, V. (2024). Evaluation of Dust Concentration Using Computer Measurement Technologies. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds)

Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_50.

40. Gugin, V., Perperi, L., Oborskyi, G., Goloborodko, G., Goloborodko, V. (2025). Development of a Simulator Program for Studying the Effect of Cutting Modes on Cutting Temperature. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G. (eds) Advanced Manufacturing Processes VI. Interpartner 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_25

41. Minh Duc, P., Hieu Giang, L., & Nguyen, V. T. (2025). Analyzing Cutting Temperature in Hard-Turning Technique with Standard Inserts Through Both Simulation and Experimental Investigations. Applied Sciences, 15(2), 983. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15020983>

42. Mozammel Mia, Nikhil R Dhar, Response surface and neural network based predictive models of cutting temperature in hard turning, Journal of Advanced Research, Volume 7, Issue 6, 2016, Pages 1035-1044. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2016.05.004>

43. Агулов, А. В., Бондаренко, Р. Ю., Васильева, Л. В., Гончаров, А. А. Моделирование тепловых процессов в режущей пластине // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія : Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – 2015. – Вип. 27. – С. 5–12.

44. Резников А. Н., Резников Л. А. Тепловые процессы в технологических системах: Учебник для вузов по специальностям «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты». – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.

45. Boothroyd, G., Knight, W. A. Fundamentals of machining and machine tools. – New York : Marcel Dekker, Inc., 1989. – 565 с.

46. Feng, X.; Fan, X.; Hu, J.; Wei, J.: Research on Cutting Temperature of GH4169 Turning with Micro-Textured Tools. Appl. Sci. 13(11), 6832 (2023). <https://doi.org/10.3390/app13116832>

47. Stupnytskyy, V. & Xianning, S.: Comparative Analysis of Simulation Results of Hard-to-Cut Materials Machining by Coated Cutting Tools. *Strojnícky časopis – Journal of Mechanical Engineering*. 70, 153–166 (2020). <https://doi.org/10.2478/scjme-2020-0028>.

48. Oborskyi, H., Gugnin, V., Perperi, L., Goloborodko, G., Goloborodko, V.: Simulation modelling in the tasks of digital engineering in the creation of information-measuring systems: *Proceedings of Odessa Polytechnic University* 1(65), 129–136 (2022). <https://doi.org/10.15276/opu.1.65.2022.15>.

49. Campbell, S.L., Chancelier, J.P., Nikoukhah, R. *Modeling and Simulation in Scilab/Scicos with Scicoslab 4.4*. 2nd edn. Springer (2011)

50. Гугнин В. П. Исследование технологических предпосылок и способа управления точностью обработки валов резцами с цилиндрической передней поверхностью: дис. канд. техн. наук: 05.02.08 – Технология машиностроения / В. П. Гугнин; Одесский политехнический ин-т. – Одесса, 1982. – 162 с.

51. ISO 513:2012. Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges

52. User's manual FLIR Ex series. <https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/flir-ex-series-user-manual.pdf>

53. FLIR Technical Support Center, <http://support.flir.com>

54. Uni-T. UTI730E / UTI720E User Manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://thermal.uni-trend.com/download/uti730e-uti720e-user-manual-english/>. – Назва з екрана.

55. FLIR Systems. User's Manual – ThermoCAM™ P640 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.irtech-environnement.fr/userfiles/FCKeditor/P640.pdf>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 2024/12/01.

56. The Engineer. How far can I measure with thermal imaging camera? [Электронный ресурс] // *The Engineer*. – 2021. – Режим доступа: <https://www.theengineer.co.uk/content/product/how-far-can-i-measure-with-thermal-imaging-camera>, вільний. – Назва з екрана.

57. Parametry techniczne kamer termowizyjnych i ich znaczenie w diagnostyce [online] // Świat Szkła. – Dostępny w Internecie: <https://swiat-szkla.pl/article/8409-parametry-techniczne-kamer-termowizyjnych-i-ich-znaczenie-w-diagnostyce> – Назва з екрана.

58. FLIR Systems. How is NEDT measured? [Електронний ресурс] // FLIR – офіційний сайт. – Режим доступу: https://www.flir.eu/support-center/instruments2/how-is-nedt-measured/?srsltid=AfmBOooUnUReriHu9JS6E9wsrYp4yieGQ-pLgrt2S5Ikiumml45_6f50&utm_source=chatgpt.com. – Назва з екрана.

59. Колобродов В.Г., Лихоліт М.І. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження.- Підручник.- - К.: Політехніка, - 2007. – 364 с.

60. Колобродов В.Г., Норберт Шустер Тепловізійні системи (фізичні основи, методи проектування і контролю, застосування).- Підручник.- ДКПП «Тираж». - 1999. - 340 с.

61. Strobl D., Unger J. F., Ghnatios Ch., Robens-Radermacher A. PGD in thermal transient problems with a moving heat source: A sensitivity study on factors affecting accuracy and efficiency [Електронний ресурс] // *Engineering Reports*. – 2024. – 27 березня. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1002/eng2.12887>

62. The Solution of Backward Heat Conduction Problem with Piecewise Linear Heat Transfer Coefficient [Електронний ресурс] // *Mathematics*. – 2019. – Т. 7, № 5. – Стаття 388. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/math7050388>

63. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. JCGM 100:2008. – 1st ed. – Joint Committee for Guides in Metrology, 2008. – 120 p. – Режим доступу: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf

64. ДСТУ ISO/IEC Guide 98-1:2018. Невизначеність вимірювань. Частина 1. Вступ до подання невизначеності у вимірюванні (ISO/IEC Guide 98-1:2009, IDT). – [Чинний від 2018-12-01]. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 22 с. – (Національний стандарт України).

65. Застосування інформації про непевність вимірів під час оцінювання відповідності : настанова / переклад з англ. ; Eurachem/CITAC ; пер. офіц. ДП

«Укрметртестстандарт». – Київ : ДП «Укрметртестстандарт», 2022. – 60 с. – Режим доступу:

https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/MUC2021_P1_UA.pdf?utm_source=chatgpt.com

66. Голофєєва М.О. Теоретичні основи та метрологічне забезпечення вимірювання параметрів внутрішніх процесів в неметалевих гетерогенних матеріалах: дис. д-ра техн. наук: 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення / М. О. Голофєєва. – Одеса, 2024. – 339с.

67. Tonkonogyi, V., Holofieieva, M., Dašić, P., Klimov, S., Buriachenko, O. (2024). Fractal Dimension Measurement Uncertainty. In: Karabegovic, I., Kovačević, A., Mandzuka, S. (eds) New Technologies, Development and Application VII. NT 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1069. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-66268-3_50

68. Єврохем. Термінологія аналітичного вимірювання. Вступ до VIM 3 [Електронний ресурс] / пер. з англ. Т. Забродська, О. Лембарг; наук. ред. В. Бачинський. – К. : УкрНДНЦ, 2011. – 20 с. – Режим доступу: <https://www.eurachem.org>

69. ISO 18434-1:2008. Condition monitoring and diagnostics of machines – Thermography Part 1: General procedures. Geneva: International Organization for Standardization, 2008. 18 p.

70. Livada Č., Glavaš H., Baumgartner A., Jukić D. The Dangers of Analyzing Thermographic Radiometric Data as Images [Електронний ресурс] // J. Imaging. – 2023. – Т. 9, № 7. – С. 143. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/jimaging9070143>

71. Ring, E.F.J., & Ammer, K. (2019). Sources of uncertainty in the evaluation of thermal images in medicine. In Proceedings of SPIE – Thermosense: Thermal Infrared Applications XLI, Vol. 11005. <https://doi.org/10.1117/12.2525340>

72. Jain A. K. Fundamentals of Digital Image Processing. – Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall, 1989. – 569 с.

73. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1979. – Vol. 9, No. 1. – P. 62–66.

74. Bernsen J. Dynamic Thresholding of Gray-Level Images // Proc. of the 8th International Conference on Pattern Recognition. – Paris, France, 1986. – Vol. 2. – P. 1251–1255.

75. Sauvola J., Pietikäinen M. Adaptive Document Image Binarization // Pattern Recognition. – 2000. – Vol. 33, No. 2. – P. 225–236.

76. MacQueen J. Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations // Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. – Berkeley, CA : University of California Press, 1967. – Vol. 1. – P. 281–297.

77. Kapur J. N., Sahoo P. K., Wong A. K. C. A New Method for Gray-Level Picture Thresholding Using the Entropy of the Histogram // Computer Vision, Graphics, and Image Processing. – 1985. – Vol. 29, No. 3. – P. 273–285.

78. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // Proc. of the 18th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI). – Munich, Germany, 2015. – LNCS, Vol. 9351. – P. 234–241.

79. Sezgin M., Sankur B. Survey over Image Thresholding Techniques and Quantitative Performance Evaluation // Journal of Electronic Imaging. – 2004. – Vol. 13, No. 1. – P. 146–165.

80. Author(s). Title of the article // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – Year. – Vol. XX, No. X. – P. XX–XX. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350449523004048>

81. Naik N., Patel S. Color Image to Grayscale Image Conversion [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/> – Назва з екрана.

82. Gonzalez, R. C., Woods, R. E. (2018). Digital Image Processing. "Color Image to Grayscale Image Conversion", N. Naik & S. Patel– ResearchGate PDF

83. Rodríguez-Andina J. J. Binarization of thermal images using thresholding techniques [Электронный ресурс] // IEEE Xplore. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/>

84. Kingma D. P., Welling M. Auto-Encoding Variational Bayes [Електронний ресурс] // arXiv preprint. – 2013. – DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1312.6114>
85. Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S., Courville A., Bengio Y. Generative Adversarial Nets // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). – 2014. – P. 2672–2680. – DOI: <https://doi.org/10.5555/2969033.2969125>.
86. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention is All You Need // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). – 2017. – P. 5998–6008. – DOI: <https://doi.org/10.5555/3295222.3295349>.
87. Sutton R. S., Barto A. G. Reinforcement Learning: An Introduction. – 2nd ed. – Cambridge, MA : MIT Press, 2018. – 552 с.
88. TensorFlow. Learn | TensorFlow [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.tensorflow.org/learn>
89. PyTorch. Get Started Locally [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pytorch.org/get-started/locally/>
90. Olah C. Understanding LSTM Networks // Neural Information Processing: Proc. of the 22nd Int. Conference ICONIP, Istanbul, Turkey, Nov. 2015. – Cham : Springer, 2015. – (Lecture Notes in Computer Science ; Vol. 9492). – С. 361–367. – DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_28.
91. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015: Proc. of the 18th International Conference, Munich, Germany, October 2015. – Cham : Springer, 2015. – (Lecture Notes in Computer Science ; Vol. 9351). – с. 234–241. – DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_28.
92. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015: Матеріали 18-ї Міжнар. конф., Мюнхен, Німеччина, 5–9 жовтня 2015 р. – Cham : Springer, 2015. – (Lecture Notes in Computer Science ; т. 9351). – С. 234–241. – DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_28.

93. Jadon S. A survey of loss functions for semantic segmentation [Електронний ресурс] // arXiv preprint. – 2020. – arXiv:2006.14822. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2006.14822>

94. Sudre C. H., Li W., Vercauteren T., Ourselin S., Jorge Cardoso M. Generalised Dice overlap as a deep learning loss function for highly unbalanced segmentations [Електронний ресурс] // arXiv preprint. – 2017. – arXiv:1707.03237. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/1707.03237>

95. Голобородько В.В., Оборський Г.О., Перпері Л.М. Застосування тепловізора для вимірювання температури в зоні різання при токарній обробці / Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 11–12 грудня 2024 р., м. Одеса. – Одеса: 2024. – С. 188 – 190. <http://rp.onmu.org.ua/handle/123456789/4117>

96. Голобородько В.В., Оборський Г.О., Перпері Л.М. Цифрові трансформації Industry 4.0: виклики та можливості в сфері метрології / Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 6-7 грудня 2023 р., м. Одеса. – Одеса: 2023. – С. 64 – 65. <https://drive.google.com/file/d/1p8DLQpjO483tkaO55Px66qc01x74r-Jc/view>

97. Перпері Л.М., Голобородько Г.М., Гугнін В.П., Голобородько В.В. Застосування сучасних комп'ютерних технологій в підготовці здобувачів за інженерними спеціальностями / Всеукраїнський науково-педагогічний форум «Інноваційні технології в освіті», 21-22 жовтня 2024 р., м. Івано-Франківськ, ІФНУНГ, С. 33-34. <https://drive.google.com/file/d/1W-WBi3HRaexBl2kgewHx4y-3QcMiUHQ/view>

ДОДАТОК А
ДОКУМЕНТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ



ДОВІДКА

Про використання результатів дисертаційної роботи
Голобородька Володимира Володимировича
представленої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю
152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Надана довідка затверджує, що дисертаційне дослідження Голобородька В.В. «Розробка інформаційно-вимірювальної системи тепловізійного контролю процесу зовнішнього точіння» виконано відповідно до планів, затверджених Міністерством освіти та науки України і є складовою частиною науково-дослідних робіт кафедри цифрових технологій в інжинірингу - № 244-27 «Дослідження технічних систем і їх метрологічне забезпечення» (ДР № 0124U002860) та № 117-27 «Ресурсозберігаючі технології в машинобудуванні; технологічна динаміка металообробляння» (ДР № 0116U004530).

Довідка надана у зв'язку із захистом дисертації.

Проректор



Дмитро ДМИТРИШИН



ДОВІДКА

Про використання результатів дисертаційної роботи
Голобородька Володимира Володимировича
представленої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю
152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Надана довідка затверджує, що матеріали дисертаційного дослідження Голобородька В.В. «Розробка інформаційно-вимірювальної системи тепловізійного контролю процесу зовнішнього течіння» використовуються Національним університетом «Одеська політехніка» при підготовці докторів філософії за освітньою програмою «Інформаційно-вимірювальні технології» та магістрів за освітньою програмою «Інформаційно-вимірювальні технології» в Навчально-науковому інституті цифрових технологій, дизайну та транспорту (ННЦТДТ) на кафедрі цифрових технологій в інженірингу при викладанні наступних дисциплін:

- Технічна діагностика засобами інфрачервоної техніки;
- Комп'ютерне моделювання інформаційно-вимірювальних систем.

Довідка надана у зв'язку із захистом дисертації.

Перший проректор



Сергій НЕСТЕРЕНКО

ДОДАТОК Б
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Список публікацій здобувача за темою дисертації, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Oborsky, G.A., **Goloborodko V.V.**, Perperi L.M. 2024. Implementation of the hybrid binarisation method for thermogram analysis. Proceedings of Odessa Polytechnic University. 2(70) (2024), 123–130. <https://doi.org/10.15276/opu.2.70.2024.14> (Реєстр наукових фахових видань України, **категорія Б**)

2. Oborskyi, G., Gugnin, V., Perperi, L., Goloborodko, G., **Goloborodko, V.** (2024). Evaluation of Dust Concentration Using Computer Measurement Technologies. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_50 (Scopus)

3. Gugnin, V., Perperi, L., Oborskyi, G., Goloborodko, G., **Goloborodko, V.** (2025). Development of a Simulator Program for Studying the Effect of Cutting Modes on Cutting Temperature. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G. (eds) Advanced Manufacturing Processes VI. Interpartner 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_25 (Scopus)

4. **Голобородько В.**, Перпері Л. Верифікація результатів тепловізійного контролю теплових процесів зовнішнього точіння на основі математичного моделювання теплового стану зони різання // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». – 2025. – № 2. – С. 142–150. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-82-19>. [ISSN 2219-9365](https://doi.org/10.31891/2219-9365) (Реєстр наукових фахових видань України, **категорія Б**)

Список публікацій здобувача за темою дисертації які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. H. Oborskyi, V. Gugnin, L. Perperi, G. Goloborodko, **V. Goloborodko.** Simulation modelling in the tasks of digital engineering in the creation of information-

measuring systems. Proceedings of Odessa Polytechnic University, Issue 1(65), 2022. P. 129 – 136. URL: <https://doi.org/10.15276/opu.1.65.2022.15>

6. **Голобородько В.В.**, Оборський Г.О., Перпері Л.М. Цифрові трансформації Industry 4.0: виклики та можливості в сфері метрології / Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 6-7 грудня 2023 р., м. Одеса. – Одеса: 2023. – С. 64 – 65. <https://drive.google.com/file/d/1p8DLQpjO483tkaO55Px66qc01x74r-Jc/view>

7. **Голобородько В.В.**, Оборський Г.О., Перпері Л.М. Застосування тепловізора для вимірювання температури в зоні різання при токарній обробці / Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 11–12 грудня 2024 р., м. Одеса. – Одеса: 2024. – С. 188 – 190. <http://rp.onmu.org.ua/handle/123456789/4117>

8. Перпері Л.М., Голобородько Г.М., Гугнін В.П., **Голобородько В.В.** Застосування сучасних комп'ютерних технологій в підготовці здобувачів за інженерними спеціальностями / Всеукраїнський науково-педагогічний форум «Інноваційні технології в освіті», 21-22 жовтня 2024 р., м. Івано-Франківськ, ІФНУНГ, С. 33-34. <https://drive.google.com/file/d/1W-WBi3HRaexBl2kgewHx4y-3QcMiUHQ/view>