

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-WBi3HRAeexBl2kgewHx4y-3QcMiUHQ/view>