

Голові разової спеціалізованої
вченої ради Національного
університету «Одеська політехніка»,
директору Навчально-наукового
інституту медичної інженерії,
професору кафедри цифрових
технологій в інжинірингу, доктору
технічних наук, професору
Прокоповичу Ігорю Валентиновичу

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора

Микийчука Миколи Миколайовича

на дисертаційну роботу Голобородька Володимира Володимировича
на тему «Розробка інформаційно-вимірювальної системи тепловізійного
контролю процесу зовнішнього точіння», подану на здобуття наукового
ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 «Метрологія та
інформаційно-вимірювальна техніка» в галузі знань 15 «Приладобудування
та автоматизація»

1. Актуальність теми дисертації та її зв'язок з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційне дослідження присвячене вирішенню значущої проблеми в сферах метрології та машинобудування – вимірюванню параметрів теплового стану процесу механічної обробки зовнішніх поверхонь на операції точіння із застосуванням інформаційно-вимірювальної системи тепловізійного контролю. Одним з ключових чинників, що впливає на якість та довговічність готових деталей є температурний режим у зоні різання, перевищення якого може негативно впливати, як на працездатність ріжучого інструменту так і на стан поверхневого шару оброблюваного матеріалу деталі й призводити до погіршення показників її геометричної точності. Існуючі методи вимірювання температури в зоні різання, такі як контактні термопари, вбудовані датчики та ін. мають низку недоліків, тому останнім часом багато досліджень пов'язано з використанням методів неруйнівного контролю засобами інфрачервоної техніки, що дозволяє отримати вимірювання температурного поля у реальному часі без втручання в процес різання. Разом з тим, варто зауважити, що застосування тепловізійних систем має низку недоліків пов'язаних з похибками вимірювань, зумовлених випромінювальною здатністю поверхонь, впливом умов спостереження, складністю обробки великого обсягу радіометричної інформації для

своєчасного прийняття рішень. Таким чином, виникає необхідність постановки та розв'язання завдання з розробки інформаційно-виміральної системи тепловізійного контролю процесу зовнішнього точіння, що має значний науково-практичний потенціал, як для сфери метрології та інформаційно-вимірвальних технологій так і для машинобудування та є актуальним завданням.

Актуальність дисертаційного дослідження також узгоджується з науково-дослідними роботами, що виконуються в Національному університеті «Одеська політехніка», затверджених Міністерством освіти та науки України, зокрема – № 244-27 «Дослідження технічних систем і їх метрологічне забезпечення» (ДР № 0124U002860) та № 117-27 «Ресурсозберігаючі технології в машинобудуванні; технологічна динаміка металообробляння» (ДР № 0116U004530).

2. Аналіз структури та змісту дисертації

Дисертація Голобородька В.В. складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 97 найменувань та 2 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 165 сторінок, 34 рисунків та 15 таблиць. У вступі подано загальну характеристику роботи та її актуальність, сформульовано мету та завдання, визначені об'єкт та предмет дисертаційного дослідження, а також обґрунтовано наукову новизну та практичне значення роботи.

У першому розділі наведено аналіз сучасних літературних джерел, на основі якого зроблено порівняльний аналіз методів та засобів вимірювання температури в зоні різання. Визначено переваги застосування методу тепловізійного контролю. Наголошено на необхідності врахування метрологічних характеристик тепловізорів.

В другому розділі визначено методики оцінювання метрологічних характеристик тепловізійних систем й запропоновано математичну модель для верифікації вимірювальних температур тепловізором та залежність для оцінювання невизначеності вимірювань.

В третьому розділі запропоновано алгоритм для розпізнавання та автоматичної обробки термограм з використанням згорткової штучної нейронної мережі на базі архітектури U-Net.

В четвертому розділі на основі отриманих експериментальних даних було оцінено невизначеність вимірювання температури методом інфрачервоної термографії для камери пістолетного типу та відеокамери. Опрацьовано результати роботи ШНМ з обробкою відео записів термограм з тепловізору Flir P640 та проведено їх верифікацію, з урахуванням реальних показників термограм.

Висновки за результатами виконання дисертаційного дослідження підкреслюють наукову новизну та практичну цінність проведених досліджень.

Список використаних джерел свідчить про аналіз сучасних результатів наукових досліджень в обраній тематиці дослідження.

Наукові положення, висновки, запропоновані методики подані в дисертаційному дослідженні, науково, теоретично та експериментально обґрунтовані.

Дисертація є завершеною науковою працею, а її оформлення відповідає вимогам МОН України.

3. Наукова новизна представлених теоретичних та експериментальних результатів дослідження

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

Теоретичні положення, висновки та практичні рекомендації сформульовані в дисертаційній роботі відображають наукову новизну та практичну цінність.

4. Значущість результатів дослідження для науки і практики

Визначені методики оцінювання метрологічних характеристик тепловізійних систем, зокрема просторової роздільної здатності та теплової чутливості, з урахуванням характеристик поля зору тепловізійної камери. Запропоновано адаптовану методику оцінювання характеристики еквівалентної шуму різниці температур (NETD) для об'єктів дослідження в умовах нестационарних режимів на основі даних отриманих з серії термограм за умов контрольованого нагріву об'єкту. При оцінюванні невизначеності вимірювання температури враховано внески від параметрів точності тепловізора та NETD. Запропоновано залежність для оцінювання загальної невизначеності вимірювань із врахуванням внеску від температури відбиття та залежність для оцінювання стандартної невизначеності зміни температури за часом, що базується на залишках апроксимованої моделі. Розроблено гібридний алгоритм бінаризації для формування навчальної вибірки згорткової нейронної мережі з використанням фреймворків TensorFlow та Keras, що дозволило реалізувати архітектуру U-Net. Створене програмне забезпечення забезпечує навчання та корекцію вибірки, та дозволяє отримати точні передбачення щодо температури. Отримані результати забезпечують метрологічне обґрунтування використання тепловізійного контролю для технологічних процесів обробки різанням.

Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій досягнуто за рахунок коректного застосування математичного апарату, даних комп'ютерних та експериментальних досліджень, які підтверджують адекватність використаних моделей. Отримані результати та висновки за дисертаційним дослідженням узгоджуються з результатами інших науковців наведених в інших працях у сфері метрології та інформаційно-вимірювальних технологій.

5. Повнота відображення наукових положень, висновків та рекомендацій в опублікованих автором дисертації працях

Основні положення дисертації оприлюднено у 8 наукових працях, з них: 2 статті у наукових фахових виданнях України (категорія Б), 2 статті у виданнях, включених до реєстру бази даних Scopus та 4 публікації, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

Основні результати та висновки дослідження викладено в дисертації. Здобувач брав участь у 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, травень 2025 р., м. Запоріжжя.

6. Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності

За результатами аналізу дисертаційного дослідження порушень академічної доброчесності не виявлено.

7. Дискусійні положення та зауваження

Після ознайомлення зі змістом дисертації та оцінюючи її загалом позитивно, вважаю за доцільне звернути увагу на деякі дискусійні моменти:

1. В другому розділі описано спрощену математичну модель теплового стану процесу різання та її експериментальну верифікацію, однак автором не було розглянуто її подальшого застосування, наприклад, для прогнозування показників працездатності інструменту, зокрема зносу. На мій погляд, реалізація зазначеного дозволила б підвищити ступінь функціональності моделі в задачах технічної діагностики.

2. В роботі наведено методiku оцінювання невизначеності вимірювання температури методом інфрачервоної термографії на прикладі тепловізійного контролю процесу зовнішнього точіння, але при цьому слід зауважити, що потенційно корисним було б узагальнення основних чинників, які можуть впливати на загальну невизначеність вимірювань для покращення сприйняття інформації.

3. В розділі 3 описано навчання запропонованої нейронної мережі для обробки термограм, постає питання, чи розглядалась можливість донавчання моделі на термограмах з інших джерел або для інших методів обробки?

4. Як у роботі реалізовано підхід, що забезпечує не лише візуальне отримання сегментованих масок, але й кількісно верифіковані результати з оцінкою точності вимірювань?

5. Яку середню довжину відео використовували для навчання нейронної мережі? Чи підтримує програмне забезпечення масштабування для обробки довгих відео? Чи можливо обробляти відео потік у реальному часі?

Наведені зауваження не знижують рівень якості дисертації, її наукової та практичної цінності і можуть бути використанні для подальшого наукового розвитку за напрямком досліджень.

8. Загальний висновок

Дисертація Голобородька Володимира Володимировича на тему «Розробка інформаційно-вимірювальної системи тепловізійного контролю процесу зовнішнього точіння» є завершеним самостійним науковим дослідженням, містить положення наукової новизни та теоретично обґрунтовані результати, які в сукупності вирішують актуальну науково-технічну задачу з вимірювання параметрів теплового стану в зоні різання при зовнішньому точінні із застосуванням інформаційно-вимірювальної системи тепловізійного контролю.

Подана дисертаційна робота за темою та змістом цілком відповідає спеціальності 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка та відповідає вимогам, встановленим до кваліфікаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. № 44 (із змінами), а здобувач Голобородько Володимир Володимирович заслуговує присудження ступеня доктора філософії з спеціальності 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка із галузі знань 15 – Автоматизація та приладобудування.

Офіційний опонент
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інформаційно-
вимірювальних технологій
Національного університету
«Львівська політехніка»

Микола МИКИЙЧУК