

А.А. САВУЛА, А.П. КОРОТИНСЬКИЙ
 Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КРИТЕРІЇВ ОПТИМІЗАЦІЇ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ЕКСТРЕМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Розглянуто актуальну задачу підвищення ефективності та надійності автоматичних систем керування (АСК) промисловим обладнанням в умовах зміни його техніко-експлуатаційного стану. Обґрунтовано, що такі явища, як знос, перевантаження чи зміна властивостей сировини, спричиняють зміни в акустичних характеристиках (звучанні) обладнання. Для моніторингу цих змін пропонується використання методів звукової дефектоскопії як відносно дешевого та гнучкого інструменту, здатного в реальному часі виявляти аномальні режими роботи.

У роботі запропоновано підхід до адаптації АСК, що базується на екстремальному керуванні. У цій структурі блок звукової дефектоскопії виконує роль детектора, який фіксує відхилення від номінального режиму та ініціалізує алгоритм оптимізації для переналаштування системи керування до нових умов. Оскільки ключовим фактором, що визначає поведінку системи у разі такої адаптації, є вибраний критерій оптимізації, метою роботи є дослідження впливу цього критерію на ключові показники якості перехідного процесу (швидкодію, точність, стійкість) екстремальної системи. Дослідження спрямоване на формування рекомендацій щодо вибору критерію залежно від конкретних виробничих цілей (наприклад, мінімізація енергоспоживання, максимізація продуктивності, мінімальний час стабілізації).

У роботі проведено порівняльний аналіз функціонування екстремальної системи керування у разі використання різних інтегральних та специфічних критеріїв оптимізації. Досліджено класичні інтегральні критерії, такі як інтеграл від квадрата похибки (ISE), що сильно штрафує за великі відхилення, та інтеграл від зваженої за часом абсолютної похибки (ITAE), чутливий до тривалих залишкових похибок. Також розглянуто один з найбільш «суворих» критеріїв – інтеграл від зваженого за часом квадрата похибки (ITSE), який поєднує штрафи за амплітуду та тривалість похибки. Додатково проаналізовано статистичний критерій середньоквадратичної похибки (MSE) та два цільових підходи: критерій, орієнтований лише на мінімізацію похибки (Error-only), та енергоефективний критерій (Energy-aware), що балансує точність та «вартість» керуючого впливу (енергоспоживання, знос). Дослідження проводилося шляхом аналізу графіків перехідних процесів (зміна відхилення, керуючого впливу та виходу системи) після програмної фіксації аномалії.

У результаті дослідження встановлено, що вибір критерію оптимізації кардинально впливає на динаміку відновлення системи. Критерії ITSE та ITAE демонструють найкращу швидкодію щодо придушення похибки та найшвидший вихід на новий усталений рівень (проходження порога $\pm 2\%$), однак це досягається ціною значних коливань керуючого впливу, що може бути небажаним для виконавчих механізмів. Критерії ErrorOnly та MSE реагують агресивніше, що супроводжується вищим початковим перерегулюванням вихідної величини, але є виправданим, коли пріоритетом є виключно точність, а енерговитрати не є критичними. На противагу, критерій EnergyAware забезпечує найбільш плавну динаміку керування з мінімальними піками, що знижує енерговитрати та знос обладнання, проте характеризується значно повільнішим зближенням до нового режиму та потенційним невеликим відхиленням від еталонного усталеного стану.

Ключові слова: автоматична система керування, оптимізація, математичне моделювання, критерій оптимальності.

A.A. SAVULA, A.P. KOROTYNSKYI
 National Technical University of Ukraine
 “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

RESEARCH ON THE IMPACT OF OPTIMIZATION CRITERIA ON THE EFFICIENCY OF EXTREME CONTROL SYSTEMS

This paper addresses the pressing problem of enhancing the efficiency and reliability of automatic control systems (ACS) for industrial equipment operating under changing technical and operational conditions. It is substantiated that phenomena such as wear, overload, or changes in raw material properties cause alterations in the equipment's acoustic characteristics (sound). To monitor these changes, the use of acoustic non-destructive testing (NDT) methods is proposed as a relatively inexpensive and flexible tool capable of detecting anomalous operating modes in real-time.

The paper proposes an approach to ACS adaptation based on extremal control. In this structure, the acoustic NDT unit acts as a detector that identifies deviations from the nominal mode and initiates an optimization algorithm to retune

the control system to the new conditions. Since the key factor determining the system's behavior during such adaptation is the chosen optimization criterion, the aim of the work is to investigate the influence of this criterion on the key performance indicators of the transient process (response speed, accuracy, stability) of the extremal system. The research is focused on formulating recommendations for selecting a criterion based on specific production goals (e.g., minimizing energy consumption, maximizing productivity, minimum stabilization time).

The paper conducts a comparative analysis of the extremal control system's performance using various integral and specific optimization criteria. Classical integral criteria are examined, such as the Integral of Squared Error (ISE), which heavily penalizes large deviations, and the Integral of Time-weighted Absolute Error (ITAE), which is sensitive to long-lasting residual errors. One of the "strictest" criteria, the Integral of Time-weighted Squared Error (ITSE), which combines penalties for both the amplitude and duration of the error, is also considered. Additionally, the statistical criterion of Mean Squared Error (MSE) and two targeted approaches are analyzed: a criterion focused solely on error minimization (Error-only), and an energy-efficient criterion (Energy-aware), which balances accuracy against the "cost" of the control action (energy consumption, wear). The study was conducted by analyzing graphs of transient processes (changes in error, control input, and system output) after a programmed anomaly detection.

The research results establish that the choice of optimization criterion fundamentally affects the system's recovery dynamics. The ITSE and ITAE criteria demonstrate the best performance in terms of error suppression and the fastest convergence to a new steady state (passing the $\pm 2\%$ threshold). However, this is achieved at the cost of significant oscillations in the control input, which may be undesirable for actuators. The ErrorOnly and MSE criteria react more aggressively, accompanied by a higher initial overshoot of the output variable, but this is justified when accuracy is the sole priority and energy costs are not critical. In contrast, the EnergyAware criterion provides the smoothest control dynamics with minimal peaks, thereby reducing energy consumption and equipment wear; however, it is characterized by a much slower convergence to the new mode and a potential slight deviation from the reference steady state.

Key words: automatic control system, optimization, mathematical modeling, optimality criterion.

Постановка проблеми

Ефективна робота сучасних автоматичних систем керування (АСК) безпосередньо залежить від поточного техніко-експлуатаційного стану обладнання. Такі явища, як зношення підшипників, перевантаження конвеєра або зміна фізичних властивостей сировини, спричиняють зміни в технологічному процесі. Ці зміни неминуче відображаються на акустичних характеристиках (звучанні) обладнання.

Для моніторингу цих змін пропонується використання методів звукової дефектоскопії. Цей підхід, що базується на аналізі аудіальних даних, має переваги у вигляді відносної дешевизни датчиків та можливості їх застосування у важкодоступних місцях. Аналіз звуку дозволяє в реальному часі виявляти аномальні режими роботи, які можуть бути як новими технологічними станами, так і передумовами аварійних ситуацій.

Виявлення такого нового режиму сигналізує про необхідність переналаштування системи керування. Для вирішення цієї задачі пропонується використати підходи екстремального керування. У запропонованій системі блок звукової дефектоскопії виконує роль детектора, який фіксує відхилення від номінального режиму та ідентифікує «екстремальну точку». Ця точка слугує тригером для запуску алгоритму оптимізації з метою адаптації керування до нових умов.

Ключовим фактором, що визначатиме успішність такого керування, є не лише метод оптимізації, на основі якого відбувається переналаштування, але насамперед вибраний критерій оптимізації. Саме критерій (наприклад, мінімізація енергоспоживання, максимізація продуктивності, зниження навантаження або повернення до стаціонарного режиму за мінімальний час) визначатиме, до якого нового усталеного стану та яким чином система намагатиметься привести об'єкт керування.

Отже, для ефективного впровадження такого підходу необхідно провести дослідження впливу критеріїв оптимізації на швидкодію, точність та стійкість екстремальної системи керування, що спирається на дані звукової дефектоскопії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У статті [1] автори провели дослідження з метою оптимізації та порівняння технік аудіальної дефектоскопії для неруйнівного контролю елементів з композитних матеріалів, зокрема склопластику (GFRP). Дослідники експериментально порівнювали різні методи контролю

(контактний, імерсійний, з водяним струменем) та частоти перетворювачів. Було встановлено, що для виявлення малих дефектів у GFRP найкращі результати з максимальною амплітудою сигналу демонструє контактний ультразвуковий метод з використанням перетворювача на частоті 1 МГц. Для імерсійних технік більш точні результати, особливо для дефектів на різній глибині, були отримані з перетворювачем на частоті 2.25 МГц. Важливим результатом роботи стало підтвердження, що використання спеціалізованих пристосувань для позиціонування датчика значно підвищує відтворюваність результатів, зменшуючи стандартне відхилення під час повторних вимірювань.

У роботі [2] представлено дослідження чисельного підходу до оптимізації. Автори використовували програмний пакет COMSOL Multiphysics для моделювання та оптимізації ультразвукового контролю дерев'яних деталей. Деревина моделювалася як ортотропний матеріал для врахування її анізотропних властивостей. За допомогою методу планування експерименту (Design of Experiments) у віртуальному середовищі досліджувався вплив вхідних факторів (частота та амплітуда сигналу) на вихідні характеристики (ВСШ та втрата амплітуди). В результаті дослідження доведено, що оптимальні налаштування для контролю деревини досягаються за частоти 50 кГц та амплітуди вхідного сигналу 0,08 мм, що забезпечує 100% «бажаності» (desirability).

Оглядова стаття [3] присвячена технології кодованого збудження (КЗ) в ультразвуковому контролі. Автори пояснюють, що традиційний імпульсний метод має фундаментальне обмеження: компроміс між відношенням сигнал/шум (ВСШ), роздільною здатністю та ефективністю. Технологія КЗ долає це обмеження, використовуючи довгий, низькоамплітудний кодований сигнал замість короткого потужного імпульсу. Після прийому відлуння обробляється за допомогою узгодженого фільтра (процес, що називається стисненням імпульсу), що дозволяє відновити високу роздільну здатність і значно підвищити ВСШ. У статті наведено приклади застосування КЗ у промисловому НК, контролі напрямленими хвилями та медичній візуалізації. Зокрема, в одному з досліджень транскраніальної візуалізації було продемонстровано середнє збільшення ВСШ на 17,91 дБ, що дозволило отримати стабільні зображення, не досяжні раніше.

Авторами статей було розглянуто оптимізацію систем автоматизації на базі звукової дефектоскопії, з використанням одного чи двох критеріїв оптимальності, але у статтях не було проведено дослідження, який критерій краще підходить для вирішення поставлених задач, тому доцільно провести порівняльний аналіз критеріїв, що підходять для вирішення поточної задачі, пошуку аномалій у роботі промислового обладнання на базі звукової дефектоскопії.

Мета дослідження

Метою роботи є дослідження того, як критерій оптимізації впливає на швидкодію, точність і стійкість екстремальної системи керування, що ініціалізується детектором аномалій на основі звукової дефектоскопії; сформулювати рекомендації з вибору критерію під конкретні виробничі цілі (мінімізація енергоспоживання/вібрацій, максимізація продуктивності, мінімальний час стабілізації).

Виклад основного матеріалу дослідження

Екстремальна система керування (ЕСК) є специфічним класом адаптивних систем, призначених для автоматичного пошуку та підтримки такого режиму роботи об'єкта, який відповідає екстремуму (максимуму або мінімуму) заданого показника якості, що також називають цільовою функцією.

На відміну від класичних систем автоматичного регулювання, які стабілізують вихідну величину на відомому, заздалегідь заданому рівні, ЕСК функціонують в умовах апріорної невизначеності щодо точного положення цього оптимального режиму. Таким чином,

фундаментальна суть ЕСК полягає не стільки в регулюванні, скільки в реалізації алгоритму оптимізації в реальному часі, вбудованого в контур зворотного зв'язку. Якщо класичні регулятори приводять систему до відомого заданого значення, то ЕСК самостійно знаходить невідоме оптимальне задане значення, яке відповідає екстремуму цільової функції. У цьому контексті сам керований об'єкт (разом із засобами вимірювання) виступає в ролі «обчислювача», який надає значення цільової функції для поточного набору вхідних параметрів, а регулятор реалізує ітераційну процедуру, подібну до градієнтного спуску або підйому. Тому важливо дослідити, які переваги і недоліки можуть бути у разі використання різних критеріїв оптимізації. Для дослідження було розглянуто такі критерії:

ІТАЕ (Integral of Time-weighted Absolute Error) – інтегральний критерій якості, що використовується для аналізу та оптимізації перехідних процесів у системах автоматичного керування, є інтеграл від зваженої за часом абсолютної похибки.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt$$

Цей критерій здобув широке визнання завдяки своїй здатності забезпечувати добре згладжені системи з мінімальним часом встановлення. Ключовою особливістю критерію ІТАЕ є множник часу t . Цей множник цілеспрямовано змінює чутливість критерію до похибок на різних етапах перехідного процесу:

– На початковому етапі (t): Ваговий коефіцієнт t малий, тому критерій є відносно «поблажливим» до великих початкових похибок або сплесків перерегулювання, які неминуче виникають у реакції системи на збурення чи зміну завдання.

– На завершальному етапі (t): Ваговий коефіцієнт t зростає, що призводить до жорсткого «штрафування» навіть незначних похибок, які існують протягом тривалого часу.

Таким чином, мінімізація ІТАЕ примушує систему керування не просто мінімізувати сумарну похибку, а робити це якомога швидше, активно придушуючи довготривалі залишкові похибки та коливання, що повільно затухають.

ISE (Integral of Squared Error) – інтеграл від квадрата похибки (ISE) є класичними критеріями оптимізації, що застосовуються для оцінки якості перехідних процесів у системах автоматичного керування.

$$ISE = \int_0^{\infty} |e(t)|^2 dt$$

Його широке використання зумовлене математичною зручністю та чіткою фізичною інтерпретацією. В основі критерію ISE лежить операція піднесення похибки до квадрата, що надає йому двох ключових властивостей:

– Квадратична функція гарантує, що будь-яке відхилення від цілі (як позитивне, так і негативне) додається до загального інтегралу. Що важливо, вона непропорційно сильно «штрафує» за великі похибки. Наприклад, похибка величиною 10 робить внесок у 100 разів більший, ніж похибка величиною в 1.

– На відміну від часозважених критеріїв (як ІТАЕ), ISE однаково враховує похибку, що виникла на початку перехідного процесу, і таку ж саму похибку, що виникла наприкінці. Він не має механізму, який би примусово прискорював затухання процесу.

Через сильну чутливість до великих похибок системи, оптимізовані за критерієм ISE, мають тенденцію до мінімізації перерегулювання та отримання плавної, перехідної характеристики. Водночас цей критерій може бути менш чутливим до малих, але довготривалих залишкових похибок, оскільки їхній квадрат є дуже малою величиною.

ITSE (Integral of Time-weighted Squared Error) – інтеграл від зваженого за часом квадрата похибки (ITSE) є одним із найбільш «суворих» інтегральних критеріїв оптимізації, який використовується в теорії автоматичного керування.

$$ITSE = \int_0^{\infty} t |e(t)|^2 dt$$

Він поєднує у собі штрафні характеристики критерію ISE (чутливість до великих похибок) та критерію ITAE (чутливість до довготривалих похибок). Критерій ITSE одночасно використовує два потужних механізми штрафів:

– Як і в критерії ISE, піднесення похибки до квадрата призводить до того, що великі відхилення від цілі штрафуються експоненційно сильніше, ніж малі. Це змушує оптимізатор шукати рішення з якомога меншим перерегулюванням.

– Як і в критерії ITAE, множення на час призводить до того, що похибки, які існують довго, штрафуються сильніше, ніж початкові похибки. Це змушує систему швидко усувати залишкову усталену похибку та прискорювати затухання перехідного процесу.

Поєднання цих двох факторів робить ITSE виключно чутливим як до амплітуди перерегулювання, так і до часу встановлення. Він агресивно штрафує системи, які одночасно мають і велике початкове відхилення, і повільно затухаючий процес. Це часто призводить до отримання добре збалансованих систем, які швидко повертаються до норми без значних коливань.

MSE (Mean Squared Error) – це один із найбільш поширених статистичних критеріїв оптимізації, що використовується для оцінки якості систем керування, особливо в умовах стохастичних (випадкових) впливів.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y'_i)^2$$

На відміну від інтегральних критеріїв (як ISE чи ITAE), які оцінюють сумарну похибку протягом одного перехідного процесу, MSE оцінює усереднену в часі потужність похибки в усталеному режимі.

Error-only – це клас критеріїв, що цілеспрямовано мінімізують лише відхилення виходу від заданого (помилку), ігноруючи «вартість» керувального впливу. Перевага – висока точність і швидке згасання похибки; водночас можливі агресивні керувальні дії, перерегулювання.

Energy-aware – це енерго-орієнтований критерій, який балансує точність і «ціну» керування, враховуючи енергоспоживання, рівень зусиль і їх змінність (що пов'язано зі зносом, вібраціями та тепловими навантаженнями). На практиці це означає штрафування великих або частих керувальних впливів і перевагу більш гладких, економних дій регулятора. Такий підхід доцільний у системах із обмеженою потужністю, жорсткими вимогами до надійності та довговічності.

На рисунку 1 наведено графік зміни відхилення від заданого значення у разі застосування різних критеріїв оптимізації. ITSE і ITAE найшвидше гасять похибку, проте мають значні коливання. EnergyAware характеризується малими коливаннями, проте зближення до порога відбувається дуже повільно та не досягає порога стабілізації.

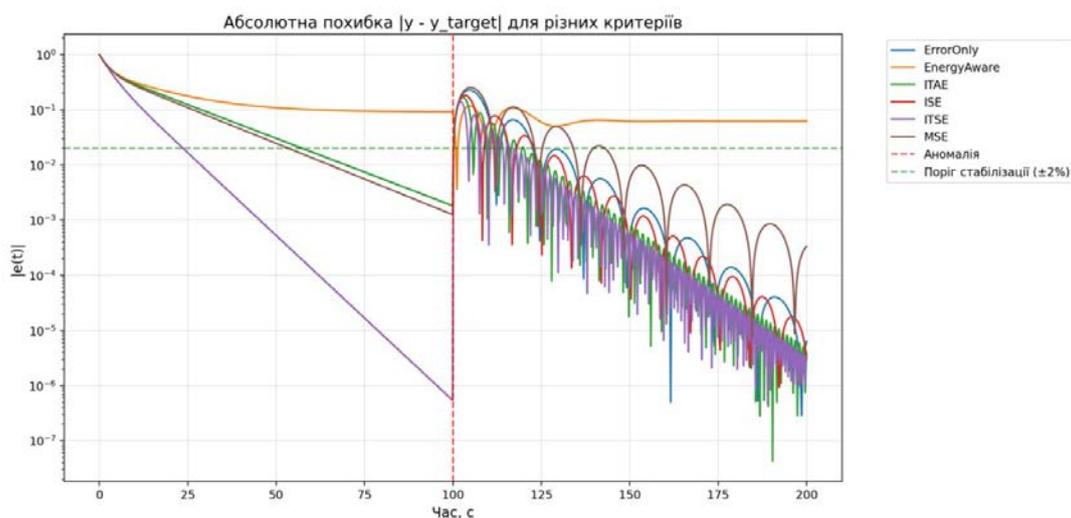


Рис. 1. Графік зміни відхилення від заданого значення у разі застосування різних критеріїв оптимізації

Після зафіксованої аномалії всі критерії формують затухаючі коливання навколо нового рівня керування, див. рис. 2. ITSE та ITAE дають найшвидше згасання за значних піків. ErrorOnly реагує плавніше. EnergyAware свідомо обмежує зусилля керування, тому коливання найменші, але зближення повільніше й усталений рівень нижчий порівняно з іншими критеріями. ISE і особливо MSE зберігають довший вихід на новий режим.

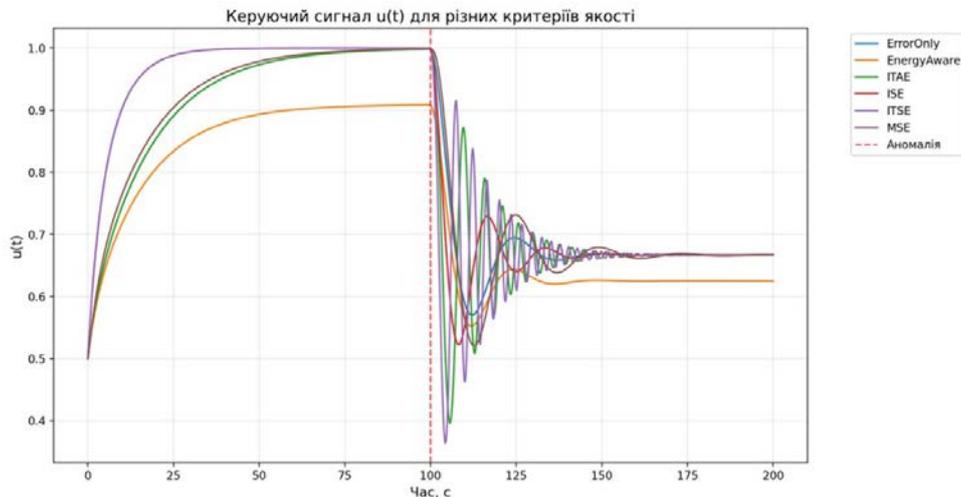


Рис. 2. Графік зміни керування у разі застосування різних критеріїв оптимізації

На рисунку 3 наведено графік зміни виходу на усталений рівень у разі застосування різних критеріїв. Після визначення аномалії ITSE та ITAE виходять на усталений рівень найшвидше та мають помірні перерегулювання та коливання. ErrorOnly та MSE реагують агресивніше з вищим початковим перерегулюванням, але також сходяться до усталеного рівня протягом кількох коливань. EnergyAware стримує піки, проте вихід сходиться повільніше і фіксується трохи нижче цільового рівня.

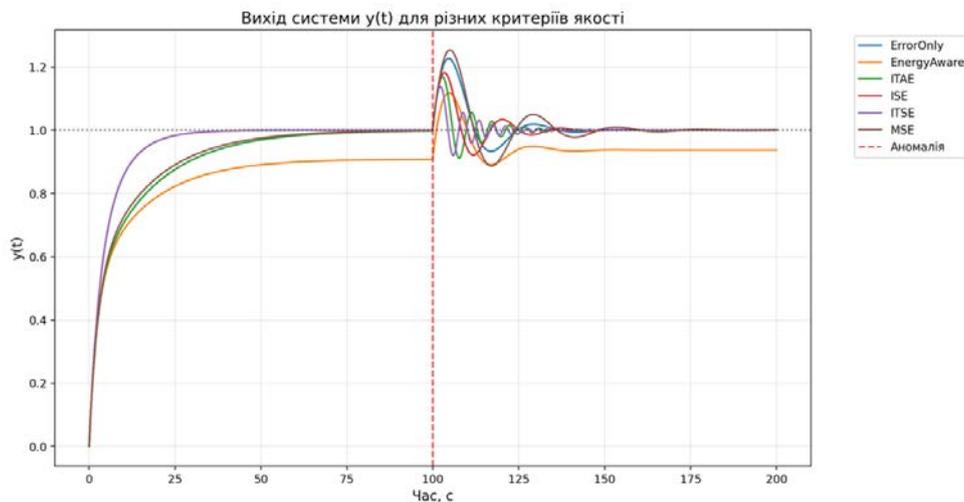


Рис. 3. Графік зміни виходу на усталений рівень застосування різних критеріїв оптимізації

Висновки

Описані результати показують, що ITSE та ITAE є найефективнішими для відновлення після аномалій. ITSE стабільно дає найшвидше затухання похибки та швидке проходження порога $\pm 2\%$. ITAE дуже близький за якістю, проте обидва ці критерії призводять до значного

коливання керування. ErrorOnly та MSE реагують найагресивніше: швидко проходить поріг, але супроводжується вищим перерегулюванням. Це виправдано, коли точність пріоритетна, а енерговитрати не критичні. EnergyAware демонструє найбільш плавну динаміку керування з найменшими піками, знижуючи енерговитрати, проте характеризується повільним зближенням до нового режиму та можливим невеликим відхиленням від еталонного усталеного режиму.

Список використаної літератури

1. Dattoma V., Nobile R., Panella F.W., Pirinu A., Saponaro A. Optimization and comparison of ultrasonic techniques for NDT control of composite material elements. *Procedia Structural Integrity*. 2018. Vol. 12. P. 9–18.
2. Ogunnowo E.O., Adewoyin M.A., Fiemotongha J.E., Igunma T.O., Adeleke A.K. Systematic review of non-destructive testing methods for predictive failure analysis in mechanical systems. *IRE Journals*. 2020. Vol. 4. No. 4. P. 207–215.
3. Wang Y., Yu Z., Yin Z., Zhang W., Zu L., Tao G., Yu S. Design of impact ultrasonic penetrator and optimization of impact efficiency. *Advances in Space Research*. 2025. Vol. 75. No. 8. P. 6070–6088.
4. Weng C., Gu X., Jin H. Coded excitation for ultrasonic testing: A review. *Sensors*. 2024. Vol. 24. No. 7. Article 2167. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24072167>.
5. Sheakholeslami M., Bayat Kazazi M., Amoochi A., Mazdak S., Ghaderi M.R., Zeighami Salimabad M. Numerical optimization of non-destructive ultrasonic testing in identifying defects in composite structure of pine tree trunk. *Mechanics of Advanced Composite Structures*. 2024. Vol. 11. No. 1. P. 249–258. DOI: <https://doi.org/10.22075/macs.2023.30382.1501>.
6. Fang S., Zhu Y., Zhang Q., Zhang Y. Process optimization for robotic ultrasonic strengthening of aviation blade surfaces based on intelligent compliance control. *Micromachines*. 2023. Vol. 14. No. 10. Article 1920. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi14101920>.
7. Qiu Z., Lu Y., Qiu Z. Review of ultrasonic ranging methods and their current challenges. *Micromachines*. 2022. Vol. 13. No. 4. Article 520. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi13040520>.

References

1. Dattoma, V., Nobile, R., Panella, F.W., Pirinu, A., & Saponaro, A. (2018). Optimization and comparison of ultrasonic techniques for NDT control of composite material elements. *Procedia Structural Integrity*, 12, 9–18 [in English].
2. Ogunnowo, E.O., Adewoyin, M.A., Fiemotongha, J.E., Igunma, T.O., & Adeleke, A.K. (2020). Systematic review of non-destructive testing methods for predictive failure analysis in mechanical systems. *IRE Journals*, 4(4), 207–215 [in English].
3. Wang, Y., Yu, Z., Yin, Z., Zhang, W., Zu, L., Tao, G., & Yu, S. (2025). Design of impact ultrasonic penetrator and optimization of impact efficiency. *Advances in Space Research*, 75(8), 6070–6088 [in English].
4. Weng, C., Gu, X., & Jin, H. (2024). Coded excitation for ultrasonic testing: A review. *Sensors*, 24(7), Article 2167. <https://doi.org/10.3390/s24072167> [in English].
5. Sheakholeslami, M., Bayat Kazazi, M., Amoochi, A., Mazdak, S., Ghaderi, M.R., & Zeighami Salimabad, M. (2024). Numerical optimization of non-destructive ultrasonic testing in identifying defects in composite structure of pine tree trunk. *Mechanics of Advanced Composite Structures*, 11(1), 249–258. <https://doi.org/10.22075/macs.2023.30382.1501> [in English].
6. Fang, S., Zhu, Y., Zhang, Q., & Zhang, Y. (2023). Process optimization for robotic ultrasonic strengthening of aviation blade surfaces based on intelligent compliance control. *Micromachines*, 14(10), Article 1920. <https://doi.org/10.3390/mi14101920> [in English].
7. Qiu, Z., Lu, Y., & Qiu, Z. (2022). Review of ultrasonic ranging methods and their current challenges. *Micromachines*, 13(4), Article 520. <https://doi.org/10.3390/mi13040520> [in English].

Савула Андрій Антонович – аспірант кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». E-mail: aasavula@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8583-4818.

Коротинський Антон Петрович – доктор філософії в галузі автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій, старший викладач кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». E-mail: ihfantkor@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6309-5970.

Savula Andrii Antonovich – Postgraduate Student at the Department of Technical and Software Automation of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. E-mail: aasavula@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5611-6529.

Korotynskiy Anton Petrovich – PhD, Senior Lecturer at the Department of Technical and Software Automation of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. E-mail: ihfantkor@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6309-5970.



Отримано: 28.10.2025
Рекомендовано: 10.12.2025
Опубліковано: 30.12.2025