

Самчук Л.М., Придальний Б.І., Гулієва Н.М., Сичук В.А.
*Луцький національний технічний університет***АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПІДХОДІВ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ У ЗВАРЮВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЯХ**

У статті узагальнено сучасні підходи до забезпечення точності позиціонування промислових роботів у роботизованому зварюванні. Метою роботи є порівняльний аналіз повторюваності та абсолютної точності маніпуляторів, а також чинників, що визначають відхилення траєкторії інструмента в реальних умовах зварювального процесу. Дослідження має оглядово-аналітичний характер і ґрунтується на системному аналізі наукових публікацій, міжнародних стандартів і відкритої технічної документації провідних виробників промислових роботів. Показано, що паспортна повторюваність не відображає повною мірою фактичну точність зварювання, оскільки реальне зміщення ТСР формується під загальним впливом кінематичних, теплових, динамічних і сенсорних чинників. Систематизовано основні джерела похибки та встановлено доцільність їх поділу на чотири групи: кінематичні, теплові, динамічні та сенсорні. Узагальнення літературних даних показало, що підвищення температури в зоні зварювання на 10-30 °С може спричинити зміщення траєкторії інструмента на 0,1-0,5 мм залежно від довжини робочого плеча маніпулятора. У межах узагальненого розрахункового аналізу показано, що за помірних умов сумарна похибка позиціонування може становити близько 0,24 мм, а при інтенсивному зварюванні зростати до близько 0,50 мм, причому частка теплової складової є однією з домінуючих. Проаналізовано технічні рішення, що застосовуються провідними виробниками, зокрема кінематичне калібрування, алгоритми динамічної компенсації руху, машинний зір, адаптивне відстеження шва та цифрову верифікацію траєкторії. Обґрунтовано, що найбільш доцільним для підвищення точності позиціонування є комплексний підхід, який поєднує калібрування, сенсорну корекцію, температурну компенсацію та цифрові засоби валідації процесу. Отримані узагальнення можуть бути використані для обґрунтованого вибору технічних рішень під час проектування, налаштування та модернізації роботизованих зварювальних комплексів.

Ключові слова: автоматичне керування; мехатронні приводи роботів; сервіс роботизованого устаткування; вплив теплових ефектів, проектування обробного обладнання.

ВСТУП

У сучасному зварювальному виробництві точність позиціонування промислового робота безпосередньо визначає якість формування шва, стабільність технологічного процесу та рівень виробничого браку. Особливої ваги ця проблема набуває в умовах застосування офлайн-програмування, складних просторових траєкторій і змінних теплових навантажень, коли паспортної повторюваності маніпулятора недостатньо для забезпечення потрібної реальної точності ведення інструмента. Наявні наукові підходи підтверджують ефективність кінематичного калібрування, удосконалення систем керування, адаптивного відстеження шва та врахування температурних деформацій. Однак у більшості досліджень ці чинники розглядаються окремо, без комплексного аналізу їх загального впливу на точність позиціонування робота саме в умовах зварювального процесу.

У роботизованому зварюванні точність позиціонування визначає геометрію шва, стабільність процесу та рівень дефектності. Особливо це важливо в умовах офлайн-програмування, складних просторових траєкторій і змінних теплових навантажень, коли паспортної повторюваності маніпулятора недостатньо для забезпечення потрібної фактичної точності ведення інструмента.

Невирішена проблема полягає в тому, що недостатньо дослідженим залишається питання комплексного оцінювання точності позиціонування промислових роботів при виконанні зварювальних операцій з одночасним урахуванням кінематичних, теплових і динамічних чинників, а також із чітким розмежуванням повторюваності та абсолютної точності як різних, але взаємопов'язаних характеристик. Саме ця невирішена проблема зумовлює необхідність порівняльного аналізу сучасних підходів до забезпечення точності позиціонування роботів у роботизованому зварюванні.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасні дослідження точності позиціонування промислових роботів у зварювальних операціях зосереджені переважно на кількох напрямках: удосконаленні систем керування [1], кінематичному калібруванні та ідентифікації параметрів маніпуляторів [2, 5-9], офлайн-програмуванні траєкторій [3], адаптивному відстеженні шва [4, 10], а також оцінюванні впливу теплових деформацій [10]. Важливу нормативну основу для аналізу характеристик точності

становлять міжнародні стандарти оцінювання промислових роботів [11]. Роботи, присвячені системам керування та калібруванню [1, 2, 5, 9, 12], переконливо доводять, що геометричні та кінематичні похибки можуть бути суттєво зменшені. Проте ці підходи здебільшого орієнтовані на підвищення абсолютної точності в стандартизованих або стендових умовах і не враховують повною мірою специфіку реального зварювального процесу, де на траєкторію інструмента додатково впливають теплові та динамічні збурення. Отже, калібрування є необхідною, але недостатньою умовою забезпечення високої якості роботизованого зварювання. Дослідження офлайн-програмування [3] показують значний потенціал цього підходу для скорочення часу підготовки виробництва та формування траєкторій на основі САД-моделей. Водночас ефективність OLP безпосередньо залежить від абсолютної точності робота та відповідності віртуальної моделі реальному технологічному комплексу. За відсутності належного калібрування і компенсації процесних похибок офлайн-згенерована траєкторія не забезпечує потрібного положення інструмента в зоні зварювання. Праці, присвячені адаптивному відстеженню шва [4, 13], демонструють ефективність сенсорної корекції траєкторії безпосередньо під час виконання зварювальних операцій. Проте такі системи не замінюють базової точності робототехнічного комплексу, а лише компенсують частину відхилень у реальному часі. Тому сенсорна адаптація повинна розглядатися як доповнення до калібрування, а не як його альтернатива. Окрему групу становлять дослідження теплових деформацій [10], які підтверджують суттєвий вплив температурного чинника на зміщення ТСП у процесі зварювання. Це показує обмеженість підходів, у яких точність позиціонування оцінюється лише через геометричні та керувальні параметри. Разом з тим у більшості робіт теплові, кінематичні та динамічні чинники аналізуються ізольовано, без інтегрованого оцінювання їх сумарного впливу на похибку позиціонування. Праці [13, 14] розкривають конструктивні, кінематичні та силові засади механізмів маніпулювання, але не висвітлюють проблему точності кінцевого положення в реальному циклі. Як показано в [15], навіть за жорсткого упора точність обмежується залишковою динамічною похибкою, тому поряд із конструктивними рішеннями потрібна активна компенсація відхилень.

Таким чином, літературні джерела підтверджують важливість калібрування, удосконалення керування, офлайн-програмування та сенсорної компенсації для підвищення точності промислових роботів. Однак недостатньо опрацьованим залишається питання комплексного порівняльного аналізу точності позиціонування роботів у зварювальних операціях з одночасним урахуванням кінематичних, теплових і динамічних чинників, а також із чітким розмежуванням повторюваності та абсолютної точності. Дана недостатньо висвітлена проблема визначає актуальність даного дослідження.

ЦІЛІ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є порівняльний аналіз сучасних підходів до забезпечення точності позиціонування промислових роботів при виконанні зварювальних операцій з урахуванням особливостей повторюваності, абсолютної точності та впливу кінематичних, теплових і динамічних чинників на відхилення траєкторії інструмента. Завданнями дослідження є: проаналізувати сучасні наукові підходи до оцінювання точності позиціонування промислових роботів у роботизованому зварюванні; визначити та систематизувати основні чинники, що впливають на відхилення траєкторії інструмента під час виконання зварювальних операцій; порівняти технологічні рішення, що застосовуються для підвищення точності позиціонування промислових роботів у зварювальному виробництві; оцінити доцільність комплексного врахування кінематичних, теплових і динамічних складових при аналізі точності позиціонування роботів у процесах зварювання.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження має оглядово-аналітичний характер і спрямоване на порівняльне оцінювання підходів до забезпечення точності позиціонування промислових роботів при виконанні зварювальних операцій. Результати дослідження ґрунтуються на системному аналізі наукових публікацій, міжнародних стандартів та відкритої технічної документації провідних виробників промислових роботів.

Порівняльний аналіз виконували за такими критеріями: повторюваність позиціонування; абсолютна точність; стабільність траєкторії при динамічних навантаженнях; наявність засобів калібрування; наявність сенсорних або адаптивних систем корекції; придатність до застосування в роботизованому зварюванні. Для забезпечення коректності інтерпретації враховували, що паспортні характеристики роботів можуть бути отримані за різних умов випробувань, тому вони використовувалися переважно для якісного і відносного порівняння технологічних підходів.

Дослідження включало такі етапи. На першому – проводили відбір і змістовий аналіз джерел за напрямками, пов'язаними з точністю позиціонування у зварювальних процесах. На другому –

здійснювали класифікацію чинників впливу на точність із поділом на кінематичні, теплові, динамічні та сенсорні. На третьому етапі виконували порівняння технічних рішень різних виробників і визначали їх функціональну роль у компенсації відповідних складових похибки. На четвертому – узагальнювали результати у вигляді аналітичної схеми формування сумарної похибки позиціонування.

Пошук джерел здійснювали у за офіційною технічною документацією ABB, KUKA, FANUC, Yaskawa та міжнародними стандартами, зокрема ISO 9283:2020. До аналізу включали рецензовані публікації, стандарти й офіційні технічні матеріали, що містили дані про повторюваність, абсолютну точність, калібрування, відстеження шва, теплові або динамічні чинники похибки в промислових роботах для зварювання. Для коректності порівняння дані інтерпретували з урахуванням класу робота, способу зварювання, вантажопідйомності, досяжності та умов випробувань; за відсутності однакових умов вимірювання результати використовували переважно для якісного і структурного порівняння технічних підходів. Висновки дослідження поширюються насамперед на промислові роботизовані системи дугового, лазерного та контактного точкового зварювання серійного виробництва.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Відомо, що при підвищенні температури на 10-30°C у зоні зварювання відбувається теплове розширення як деталі, так і елементів оснащення, що може призводити до зміщення траєкторії на 0,1-0,5 мм залежно від довжини робочого плеча маніпулятора. Узагальнення експериментальних даних, представлених у роботах [10, 12], дозволяє встановити майже лінійну залежність між температурою та відхиленням TCP, що підтверджує необхідність застосування температурної компенсації в режимі реального часу. Таким чином, дослідження базується на узагальненні та системному аналізі літературних джерел і технічної документації провідних виробників. Дослідження має оглядово-аналітичний характер і ґрунтується на узагальненні сучасних наукових публікацій, технічної документації та стандартів у галузі промислової робототехніки.

Для проведення об'єктивного порівняльного аналізу необхідно чітко розмежувати два фундаментальні кінематичні параметри: повторюваність та абсолютну точність позиціонування. Традиційно виробники робототехніки вказують у специфікаціях саме повторюваність – здатність маніпулятора багаторазово повертатися в одну й ту саму фізично запрограмовану точку простору. У передових сучасних моделях цей показник сягає значень від $\pm 0,02$ до $\pm 0,08$ мм. Однак при впровадженні сучасних методів офлайн-програмування коли траєкторія генерується безпосередньо з CAD-моделі деталі на комп'ютері і передається в контролер робота, на перший план виходить абсолютна точність. Вона визначає відхилення реального положення інструмента від заданих математичних координат. Без застосування спеціальних методів калібрування абсолютна похибка стандартного промислового робота може становити від 1 до 5 міліметрів через мікроскопічні відхилення у розмірах ланок, люфти в редукторах та пружні деформації конструкції. Тому передові виробники впроваджують складні апаратно-програмні комплекси для підвищення саме абсолютної точності.

Наведені в табл. 1 дані показують, що провідні виробники реалізують підвищення точності позиціонування різними шляхами: через точніше керування траєкторією, заводське або прикладне калібрування, сенсорну корекцію шва в реальному часі та конструктивне зменшення зовнішніх збурень від кабельних пакетів. Тому при виборі роботизованого комплексу для зварювання доцільно порівнювати не лише паспортні точнісні показники, а й те, яким саме способом виробник забезпечує абсолютну точність, точність шляху та процесну адаптацію до реальної геометрії стику.

Таблиця 1 – Порівняння підходів до забезпечення точності позиціонування в роботизованому зварюванні у провідних виробників

Виробник	Ключове технологічне рішення	Основний принцип дії	Яку складову точності посилює передусім	Практичне значення для зварювання
ABB	TrueMove, QuickMove, AbsoluteAccuracy	TrueMove забезпечує точніше ведення траєкторії, QuickMove підвищує динамічну ефективність руху, AbsoluteAccuracy	Точність траєкторії, динамічна стабільність, абсолютна точність	Доцільно для процесів, де важливі безперервний рух пальника, OLP і зменшення

		зменшує розбіжність між реальною та офлайн-моделлю робота		похибки між віртуальною та реальною траєкторією
KUKA	PathMode,absolutelyaccuratecalibration , hollow-wrist ARC-конфігурації	Поєднання заводського/прикладного калібрування з режимом підвищеної точності безперервного руху	Абсолютна точність і точність ведення шляху	Ефективно для дугового зварювання складних контурів, де критичні безперервність руху та стабільність орієнтації пальника
FANUC	iRVision, SeamTracking, TAST, hollowwrist, advancedmotioncontrol	Комбінація базової повторюваності робота з візуальною та процесною корекцією траєкторії у реальному часі	Повторюваність, процесна корекція, точність відносно реального стику	Особливо корисно в умовах варіативної геометрії деталей і потреби в адаптації до зміщення шва
YaskawaMotoman	MotoCalV-EG, thru-arm / symmetricwrist ARC-роботи, MotoSim EG	Калібрування абсолютного положення, TCP і орієнтації інструмента; конструкція thru-arm зменшує кабельні збурення; OLP уточнюється через калібрування і симуляцію	Абсолютна точність, точність TCP, точність OLP	Доцільно для високоточного дугового зварювання, де важливі доступність у вузьких зонах, зменшення зносу кабелів і точна відповідність між моделлю та реальним роботом

Для кількісної оцінки ефективності наведених вище технологій доцільно розглянути заявлені виробниками параметри точності (табл. 2). Дані узагальнено за даними технічної документації виробників (ABB, KUKA, FANUC, Yaskawa). Параметри показують, що виробники подають точнісні характеристики неуніфіковано: у відкритих джерелах зазвичай прямо наводиться повторюваність, тоді як абсолютна точність забезпечується окремими опціями калібрування, програмними засобами корекції або спеціалізованими конфігураціями для зварювання. Тому пряме зіставлення роботів лише за одним числовим показником є методично обмеженим; коректніше одночасно враховувати клас робота, вантажопідйомність, досяжність і те, чи стосується наведена характеристика базового режиму, чи режиму з додатковим калібруванням.

Таблиця 2 – Приклади моделей/класів промислових роботів для зварювання та режим подання точнісних характеристик виробниками

Виробник	Приклад моделі / класу	Основне застосування	Вантажопідйомність, кг	Досяжність, мм	Повторюваність (ISO 9283), мм	Режим подання точності виробником	Коментар для порівняння
ABB	IRB 2600	дугове зварювання, середній клас	20	1850	±0,04	Для моделі у відкритих специфікаціях наведено	Базова повторюваність і засіб покращення

						повторюваність; для підвищення абсолютної точності застосовується опція AbsoluteAccuracy	абсолютної точності подаються окремо
KUKA	KR 6 R1840-2 arc HW / KR CYBERTE CH nano ARC	дугове зварювання	6	1843	±0,04	Для ARC-моделей виробник акцентує PathMode	Виробник позиціонує точність як посвідчення геометрично го калібруванн я і точності ведення траєкторії
FANUC	ARC Mate 100iD/8L	дугове зварювання	8	2032	±0,03	У відкритому описі наголошено на точності, і придатності до інтеграції	Для точного порівняння і потрібен datasheet саме цієї моделі
YaskawaMotoman	AR1440	дугове зварювання	12+	1440	не наведено на відкритій сторінці моделі*	Для підвищення абсолютної точності та OLP виробник пропонує MotoCalV-EG	Базові габаритно- кінематичні параметри наведено відкрито, а засіб підвищення абсолютної точності подається окремо

Для ABB IRB 2600 офіційна сторінка моделі вказує 20 кг payload, 1850 мм reach і repeatability 0,04 мм, а окремий матеріал ABB описує Absolute Accuracy як засіб підвищення відповідності між реальним і віртуальним роботом.

Для KUKA KR 6 R1840-2 arc HW офіційна сторінка моделі вказує rated payload 6 кг, maximum reach 1843 мм і pose repeatability 0,04 мм; окремо KUKA для ARC-серії підкреслює absolutely accurate calibration і PathMode.

Для FANUC ARC Mate 100iD/8L офіційна сторінка моделі вказує payload 8 кг, reach 2032 мм, hollow arm/wrist і можливість прокладання seam-tracking/vision cables, але у відкритому фрагменті сторінки числове значення repeatability не наведено.

Для Yaskawa Motoman AR1440 офіційна сторінка моделі вказує payload 12 кг і horizontal reach 1440 мм; Yaskawa також окремо подає MotoCalV-EG як засіб покращення absolute positioning accuracy, TCP, tool posture і OLP accuracy.

З метою узагальнення отриманих результатів доцільно представити класифікацію факторів впливу на точність позиціонування (табл. 3). Дані узагальнено за даними технічної документації виробників (ABB, KUKA, FANUC, Yaskawa).

Таблиця 3 – Класифікація факторів впливу на точність позиціонування

Група факторів	Конкретні фактори	Характер впливу	Методи компенсації
Кінематичні	люфти, неточності ланок	систематичний	калібрування
Теплові	нагрів, деформації	змінний	температурна компенсація
Динамічні	інерція, вібрації	випадковий	фільтрація, демпфування
Сенсорні	похибки датчиків	випадковий	калібрування сенсорів

Наведені дані, кінематичні показники варіюються залежно від застосованих інженерних рішень. Найвищу повторюваність демонструють роботи FANUC ($\pm 0,03$ мм), що досягається завдяки оптимізованій жорсткості механічних вузлів та інтеграції сенсорних систем. Водночас найкращий показник абсолютної точності забезпечують маніпулятори KUKA (до 0,8 мм) завдяки їхньому фокусу на глибокому індивідуальному калібруванні (опція AbsoluteAccuracy). Моделі ABB та Yaskawa пропонують збалансовані характеристики (абсолютна похибка до 1,0 мм), компенсуючи відхилення за допомогою предиктивних математичних моделей та конструкції з порожнистими валами відповідно. Ці результати підтверджують, що вибір роботизованого комплексу має базуватися на специфіці конкретного завдання: чи є для процесу критичною стабільна повторюваність сотень тисяч однотипних рухів, чи пріоритетом виступає абсолютна відповідність реальної траєкторії офлайн-змодельованій програмі.

На основі узагальнення наведених у табл. 3 чинників доцільно подати інтегровану схему формування сумарної похибки позиціонування та основних засобів її компенсації в роботизованому зварюванні (рис. 1). Такий підхід дає змогу перейти від ізольованого розгляду окремих джерел похибки до їх комплексного оцінювання в межах єдиної логіки аналізу.

Як показано на рис. 1, фактична похибка позиціонування формується під спільним впливом кінематичної, теплової та динамічної складових, а її зменшення потребує поєднання калібрування, поточної компенсації та адаптивної корекції відносно реального стику.

Специфіка порівняльного аналізу полягає також у тому, що різні методи зварювання висувають кардинально різні вимоги до кінематики робота. Найбільш поширене дугове зварювання (MIG/MAG/TIG) вимагає базового позиціонування на рівні $\pm 0,1$ мм. Однак головним викликом тут є температурні деформації зварюваних деталей, які можуть змінювати геометрію стику на міліметри просто під час процесу. Для кількісної оцінки сумарної похибки доцільно використовувати більш узагальнену модель, що враховує незалежність складових похибок:

Для кількіснішого подання результатів узагальненого аналізу доцільно оцінити не лише абсолютні значення окремих складових похибки, а й їхній відносний внесок у сумарну похибку позиціонування. З цією метою були розглянуті два ілюстративні сценарії – помірні умови та інтенсивне зварювання – для яких обчислено частки кінематичної, теплової та динамічної складових у структурі сумарної похибки.

Для наочного оцінювання ролі окремих складових сумарної похибки доцільно використовувати не самі значення E_{kin} , E_{therm} , E_{dyn} , а їх відносний внесок у сумарну похибку, визначений за квадратами складових:

$$P_{therm} = \frac{E_{therm}^2}{E_{kin}^2 + E_{therm}^2 + E_{dyn}^2} \cdot 100 \%, P_{kin} = \frac{E_{kin}^2}{E_{kin}^2 + E_{therm}^2 + E_{dyn}^2} \cdot 100 \%, P_{dyn} = \frac{E_{dyn}^2}{E_{kin}^2 + E_{therm}^2 + E_{dyn}^2} \cdot 100 \%, \text{ що наведено в таблиці 4.}$$

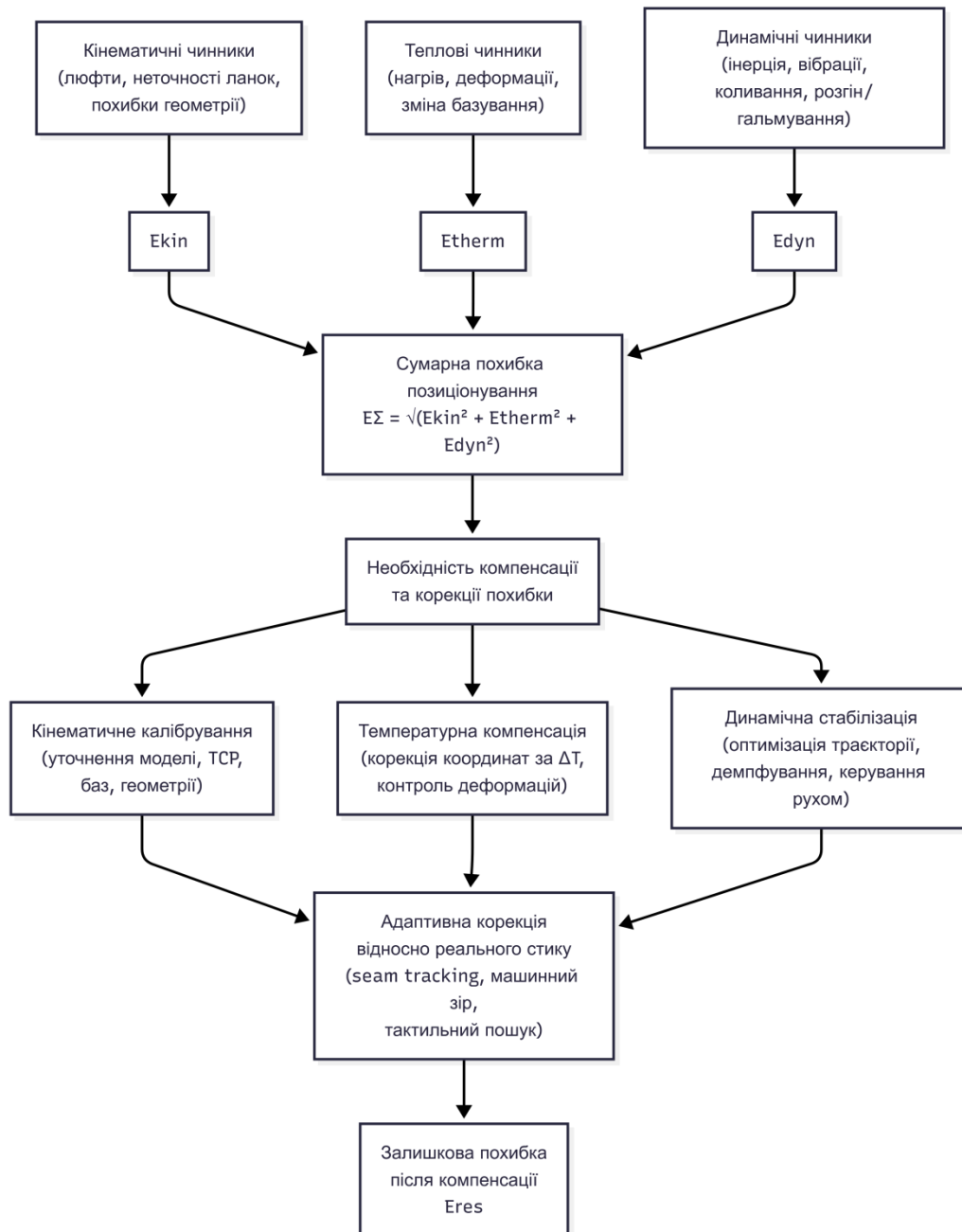


Рисунок 1 – Схема формування сумарної похибки позиціонування промислового робота та основних засобів її компенсації

Таблиця 4 – Відносний внесок кінематичної, теплової та динамічної складових у сумарну похибку позиціонування промислового робота за різних умов зварювання

Сценарій	$E_{kin}, \text{ мм}$	$E_{therm}, \text{ мм}$	$E_{dyn}, \text{ мм}$	$E_{\Sigma}, \text{ мм}$	$P_{kin}, \%$	$P_{therm}, \%$	$P_{dyn}, \%$
Помірні умови	0,05	0,20	0,12	0,24	4,4	70,3	25,3
Інтенсивне зварювання	0,05	0,40	0,30	0,50	1,0	63,4	35,6

Як видно з табл. 4, в обох сценаріях домінуючою є тепла складова похибки, частка якої становить близько 70,3% за помірних умов і 63,4% при інтенсивному зварюванні. Водночас зі зростанням інтенсивності процесу істотно збільшується внесок динамічної складової – з 25,3% до 35,6%, що свідчить про підвищення ролі інерційних навантажень, коливань і швидкісних режимів руху. Частка кінематичної складової в обох випадках є відносно малою, однак вона формує базу точності системи й визначає ефективність подальших компенсаційних заходів. Отримані результати підтверджують доцільність комплексного підходу до підвищення точності

позиціонування, за якого поряд із калібруванням необхідно враховувати температурну компенсацію та засоби динамічної стабілізації траєкторії.

$$E = \sqrt{E_{\text{kin}}^2 + E_{\text{therm}}^2 + E_{\text{dyn}}^2} \quad (1)$$

де E_{kin} – кінематична похибка, обумовлена геометричними неточностями ланок та з'єднань маніпулятора; E_{therm} – похибка, спричинена температурними деформаціями робочої зони та конструкції;

E_{dyn} – динамічна похибка, пов'язана з інерційними навантаженнями та вібраціями.

Такий підхід відповідає методології статистичного підсумовування незалежних похибок та дозволяє отримати більш реалістичну оцінку точності позиціонування. Крім того, термічна складова може бути описана залежністю:

$$\Delta L = \alpha L \Delta T \quad (2)$$

де α – коефіцієнт лінійного теплового розширення матеріалу, L – характерний розмір, ΔT – зміна температури.

Такий підхід дозволяє не лише якісно, але й кількісно оцінювати внесок кожного фактора, що є основою для побудови алгоритмів компенсації у сучасних роботизованих системах. Тому висока точність самого маніпулятора обов'язково повинна доповнюватися адаптивними системами: лазерними 3D-сканерами стику, що йдуть попереду дуги, або тактильними системами пошуку через газове сопло самозварювальний дріт. Для типового промислового робота середнього класу характерні такі значення: $E_{\text{kin}} = 0,05$ мм, $E_{\text{therm}} = 0,2 \dots 0,4$ мм при нагріванні $20-40$ °C; $E_{\text{dyn}} = 0,1 \dots 0,3$ мм при швидкісному переміщенні. Підставляючи середні значення, отримуємо загальну похибку $E \approx 0,24$ мм за помірних умов та $E \approx 0,5$ мм при інтенсивному зварюванні. Це доводить, що температурна складова є домінуючою, і реальна точність може погіршуватись у 5-10 разів порівняно з паспортною повторюваністю, що вимагає застосування систем *SeamTracking* чи тактильного пошуку. На основі узагальнення літературних даних та наведених оцінок було проведено узагальнений розрахунковий аналіз впливу температурного фактора на сумарну похибку позиціонування. Встановлено, що при збільшенні температури робочої зони на $20-40$ °C внесок термічної складової може перевищувати 60% загальної похибки. Це дозволяє зробити висновок про домінуючу роль теплових ефектів у процесах роботизованого зварювання та обґрунтовує необхідність застосування систем температурної компенсації в режимі реального часу.

Значно жорсткіші вимоги висуваються до роботизованих комплексів лазерного та плазмового зварювання. Діаметр сфокусованого енергетичного променя у цих технологіях часто становить від 0,1 до 0,6 міліметра. Відхилення траєкторії навіть на соті частки міліметра або найменша мікровібрація маніпулятора на високій швидкості призведуть до дефекту – розриву шва або пропалу матеріалу. Для цих завдань обирають спеціалізовані високоточні роботи з мінімальними показниками вібрації та обов'язковою інтеграцією систем коаксіального відеоспостереження, які наводять промінь з мікроскопічною точністю. Окремий і складний випадок представляє собою контактне точкове зварювання, яке є стандартом кузовного виробництва. Головна проблема точності позиціонування тут пов'язана не з мікроскопічними розмірами шва, а з масогабаритними характеристиками інструмента. Сучасні сервопривідні зварювальні кліщі з вбудованими трансформаторами важать від 100 до 150 кг і створюють значні інерційні навантаження під час швидких переміщень між точками. Порівняльний аналіз показує, що для забезпечення точності в таких умовах контролери роботів використовують складні алгоритми гасіння залишкових коливань. Це дозволяє масивному маніпулятору швидко зупинитися в заданій координаті без паразитного розгойдування, що забезпечує ідеальне позиціонування електродів і точне програмування зусилля їх стискання синхронно з подачею струму.

Узагальнення літературних даних свідчить, що практична ефективність роботизованого зварювання визначається здатністю системи забезпечувати стабільне ведення інструмента, відтворюваність траєкторії та адаптацію до відхилень реального стику. Це досягається поєднанням базової точності механічної системи, калібрування, алгоритмів керування рухом і сенсорної корекції в режимі реального часу. За таких умов підвищення якості зварного з'єднання пов'язане не з окремим технічним рішенням, а з узгодженою роботою кінематичних, керувальних і вимірювальних підсистем роботизованого комплексу. Сучасним напрямом розвитку є інтеграція технологій штучного інтелекту та цифрових двійників. Використання цифрових двійників дозволяє здійснювати попередню валідацію траєкторій та корекцію похибок ще на етапі моделювання, що значно підвищує абсолютну точність при OLP. Алгоритми машинного навчання, у свою чергу, застосовуються для адаптивної

корекції параметрів зварювання в режимі реального часу, що дозволяє компенсувати невизначеності середовища та підвищити стабільність якості шва.

Результати узагальнення літературних джерел свідчать про те, що традиційне орієнтування виключно на показник повторюваності є недостатнім для сучасних виробничих умов. Встановлено, що в умовах реального зварювального виробництва визначальну роль відіграє абсолютна точність, яка залежить від комплексного впливу температурних, динамічних та кінематичних факторів. Порівняльний аналіз показав, що сучасні виробники застосовують різні підходи до вирішення цієї проблеми – від механічної жорсткості до інтелектуальних систем компенсації. Тому, перспективним напрямом є комбінування калібрування, сенсорних систем та алгоритмів адаптивного керування. Останні дослідження (2023–2025 р.) демонструють активне впровадження методів штучного інтелекту у задачі роботизованого зварювання. Зокрема, застосування алгоритмів глибинного навчання для обробки зображень зварювальної ванни дозволяє здійснювати адаптивну корекцію траєкторії в режимі реального часу. Крім того, інтеграція комп'ютерного зору та нейронних мереж забезпечує підвищення точності позиціонування в умовах невизначеності геометрії деталей, що є одним із ключових напрямів розвитку сучасних кіберфізичних виробничих систем.

ВИСНОВКИ

На основі узагальнення наукових джерел і технічних матеріалів встановлено, що точність позиціонування промислових роботів у зварювальних операціях визначається не окремим показником, а сукупністю взаємопов'язаних характеристик, серед яких ключовими є повторюваність, абсолютна точність і стабільність траєкторії в умовах дії технологічних збурень. Для сучасних роботизованих зварювальних систем, особливо при використанні офлайн-програмування, вирішального значення набуває саме абсолютна точність, а не лише паспортна повторюваність.

Систематизовано основні чинники, що зумовлюють відхилення траєкторії інструмента під час зварювання, та показано доцільність їх поділу на чотири групи: кінематичні, теплові, динамічні та сенсорні. Встановлено, що в умовах реального зварювального процесу теплова складова часто є однією з домінуючих, оскільки нагрів робочої зони, оснащення та елементів робототехнічної системи може істотно погіршувати фактичну точність позиціонування порівняно з паспортними значеннями.

Порівняльний аналіз підходів провідних виробників показав, що підвищення точності позиціонування забезпечується різними, але функціонально взаємодоповнювальними інженерними рішеннями, зокрема кінематичним калібруванням, алгоритмами динамічної компенсації руху, підвищенням конструктивної жорсткості, застосуванням машинного зору та систем адаптивного відстеження шва. Це свідчить, що ефективність роботизованого комплексу у зварюванні визначається не окремим заявленим параметром, а узгодженістю механічних, керувальних і сенсорних засобів компенсації похибок.

Обґрунтовано доцільність комплексного підходу до оцінювання точності позиціонування, за якого сумарна похибка розглядається як результат спільного впливу кінематичних, теплових і динамічних складових. Практично це означає, що для підвищення якості роботизованого зварювання найбільш обґрунтованим є поєднання кінематичного калібрування, засобів динамічної стабілізації, температурної компенсації, сенсорного відстеження шва та попередньої валідації траєкторій у цифровому середовищі.

У межах виконаного аналітичного огляду узагальнено та систематизовано чинники, що впливають на точність позиціонування промислових роботів при виконанні зварювальних операцій, а також уточнено підхід до інтерпретації сумарної похибки як результату суперпозиції кінематичної, теплової та динамічної складових. Це дає підстави розглядати комплексне врахування зазначених факторів як методичну основу для обґрунтованого вибору, налаштування та модернізації роботизованих зварювальних комплексів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Villani, V., Pini, F., Leali, F., Secchi, C. (2018). Survey on human-robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics*, 55. P. 248-266. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.02.009>
2. Nubiola, A., Bonev, I.A. (2014). Absolute calibration of industrial robots using a single telescoping ballbar. *Precision Engineering*, 38(3). P. 472-480. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.01.001>
3. Dong, W., Li H., Teng X. (2007). Off-line programming of Spot-weld Robot for Car-body in White Based on Robcad. *Mechatronics and Automation*, 2007. ICMA 2007. P. 1109. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2007.4303640>

- 4.Hao, L.,Wang, H.,Shen,Y., Wang, X.,Xu, K. (2023) A novel multi-seamextraction method for structured weldments with medium-thick platesbased on DLP vision.*Measurement*, 223. P. 113808. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113808>
- 5.Gao, G., Li, Yu., Liu, F., Han,Sh. (2021).Kinematic Calibration of Industrial Robots Based on DistanceInformation Using a Hybrid Identification Method. *HindawiComplexity*, 2021, ID 8874226, 10 p.<https://doi.org/10.1155/2021/8874226>
- 6.Huliieva, N.M., Somov, D.O., Pasternak, V.V., Samchuk, L.M., Chetverzhuk, T.I. (2020).The selection of boron nitride circles for grinding saponite – titanium composites using non-parametric method. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 57(6). P. 36-47. <https://doi.org/10.2478/lpts-2020-0033>
- 7.Huliieva, N., Lishchyna, N., Pasternak, V., Huliieva, Z. (2025).Development of a system for predicting failures of bagging machines. *Informatyka, Automatyka, Pomiar W Gospodarce I OchronieŚrodowiska*. 2025. Vol. 15(4). P. 10–13. <https://doi.org/10.35784/iapgos.8054>
- 8.Zhao, P.(2023). Design of an arc welding robot monitoring system based on voice integrated circuit*International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 14(2), P. 756-764. <https://www.scopus.com/pages/publications/85123882903>
- 9.Jing,H.,Ma,X.,Chen,M.,Xing,H.,Tan,J., Chen,J.(2025).Kinematic Parameter Identification for Space Manipulators Using a Hybrid PSO-LM Optimization Algorithm. *Aerospace* 2025, 12(11).P. 1006.<https://doi.org/10.3390/aerospace12111006>
- 10.Kluz, R., Kubit, A.,Trzepieciniski, T. (2018). Investigations of temperature-induced errors in positioning of an industrial robot arm. *J.Mech.Sci.Technol.* 32.P. 5421-5432 <https://doi.org/10.1007/s12206-018-1040-9>
- 11.ISO 9283:1998. Manipulating industrial robots – Performance criteria and related test methods. [<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9283:ed-2:v1:en>] (<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9283:ed-2:v1:en>)
- 12.Zhang, J., Li, P.-H.,Zhang, M.-X.,Shen,K.-H.,Xing, Ya-Z. (2026).A review of algorithms for surface defect detection in welds based on machine learning. *Expert Systems with Applications*, 299(C). P. 130188.<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.130188>
- 13.Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. Приводи затискних механізмів металообробних верстатів: монографія. Луцьк: Вежа-Друк, 2016. 352 с.<https://surl.li/rfjrfs>
- 14.Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. Проектуванняцільовихмеханізмівманіпулювання верстатів нового покоління: навч. посібник. 2-ге вид. Луцьк: Вежа-Друк, 2014. 428 с.<https://surl.li/qknbie>
- 15.Придальний Б.І., Янюк Д.В. Вплив упорного обмеження автоматичної подачі довгомірної заготовки на точність її осьового позиціонування в токарному верстаті *ВМТ*, 2025, 22(2).С. 71-80.<https://doi.org/10.31649/2413-4503-2025-22-2-71-80>

REFERENCE

- 1.Villani, V., Pini, F., Leali, F., Secchi, C. (2018).Survey on human-robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics*, 55. P. 248-266. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.02.009>
- 2.Nubiola, A., Bonev, I.A. (2014).Absolute calibration of industrial robots using a single telescoping ballbar. *Precision Engineering*,38(3).P. 472-480.<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.01.001>
- 3.Dong,W., Li H., TengX. (2007).Off-line programming of Spot-weld Robot for Car-body in White Based on Robcad. *MechatronicsandAutomation*, 2007. ICMA 2007.P. 1109. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2007.4303640>
- 4.Hao, L., Wang, H., Shen,Y., Wang, X., Xu, K. (2023) A novel multi-seamextraction method for structured weldments with medium-thick platesbased on DLP vision.*Measurement*, 223. P. 113808. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113808>
- 5.Gao, G., Li, Yu., Liu, F., Han,Sh. (2021).Kinematic Calibration of Industrial Robots Based on DistanceInformation Using a Hybrid Identification Method. *HindawiComplexity*, 2021, ID 8874226, 10 p.<https://doi.org/10.1155/2021/8874226>
- 6.Huliieva, N.M., Somov, D.O., Pasternak, V.V., Samchuk, L.M., Chetverzhuk, T.I. (2020).The selection of boron nitride circles for grinding saponite – titanium composites using non-parametric method. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 57(6). P. 36-47. <https://doi.org/10.2478/lpts-2020-0033>

7. Huliieva, N., Lishchyna, N., Pasternak, V., Huliieva, Z. (2025). Development of a system for predicting failures of bagging machines. *Informatyka, Automatyka, Pomiarzy W Gospodarce I Ochronie Środowiska*. 2025. Vol. 15(4). P. 10–13. <https://doi.org/10.35784/iapgos.8054>
8. Zhao, P. (2023). Design of an arc welding robot monitoring system based on voice integrated circuit. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 14(2), P. 756-764. <https://www.scopus.com/pages/publications/85123882903>
9. Jing, H., Ma, X., Chen, M., Xing, H., Tan, J., Chen, J. (2025). Kinematic Parameter Identification for Space Manipulators Using a Hybrid PSO-LM Optimization Algorithm. *Aerospace* 2025, 12(11). P. 1006. <https://doi.org/10.3390/aerospace12111006>
10. Kluz, R., Kubit, A., Trzepieciniski, T. (2018). Investigations of temperature-induced errors in positioning of an industrial robot arm. *J. Mech. Sci. Technol.* 32.P. 5421-5432 <https://doi.org/10.1007/s12206-018-1040-9>
11. ISO 9283:1998. Manipulating industrial robots – Performance criteria and related test methods. [<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9283:ed-2:v1:en>] (<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9283:ed-2:v1:en>)
12. Zhang, J., Li, P.-H., Zhang, M.-X., Shen, K.-H., Xing, Ya-Z. (2026). A review of algorithms for surface defect detection in welds based on machine learning. *Expert Systems with Applications*, 299(C). P. 130188. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.130188>
13. Kuznetsov, Yu.M., Prydalnyi, B.I. (2016). Drives of clamping mechanisms of metalworking machines: monograph. Lutsk: Vezha-Druk, 352 p. <https://surl.li/rfjrfs>
14. Kuznetsov, Yu.M., Prydalnyi, B.I. (2014). Design of target manipulation mechanisms of new generation machines: textbook. 2nd ed. Lutsk: Vezha-Druk, 428 p. <https://surl.li/qknbie>
15. Prydalnyi, B.I., Yanyuk, D.V. (2025). Influence of persistent limitation of automatic feed of a long workpiece on the accuracy of its axial positioning in a lathe. *VMT*, 22(2). P. 71-80. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2025-22-2-71-80>

L. Samchuk, B. Prydalnyi, N. Huliieva, V. Sychuk. Analytical review of approaches to ensuring positioning accuracy of industrial robots in welding operations

The article summarizes modern approaches to ensuring the accuracy of positioning of industrial robots in robotic welding. The purpose of the work is a comparative analysis of the repeatability and absolute accuracy of manipulators, as well as factors that determine the deviation of the tool trajectory in real conditions of the welding process. The study is of a review-analytical nature and is based on a systematic analysis of scientific publications, international standards and open technical documentation of leading manufacturers of industrial robots. It is shown that the passport repeatability does not fully reflect the actual welding accuracy, since the real TCP displacement is formed under the combined influence of kinematic, thermal, dynamic and sensor factors. The main sources of error are systematized and the feasibility of dividing them into four groups is established: kinematic, thermal, dynamic and sensor. A generalization of the literature data showed that an increase in temperature in the welding zone by 10-30 °C can cause a shift in the tool trajectory by 0.1-0.5 mm, depending on the length of the manipulator working arm. Within the framework of the generalized computational analysis, it is shown that under moderate conditions the total positioning error can be about 0.24 mm, and during intensive welding it can increase to about 0.50 mm, with the share of the thermal component being one of the dominant ones. The technical solutions used by leading manufacturers are analyzed, in particular kinematic calibration, dynamic motion compensation algorithms, machine vision, adaptive seam tracking and digital trajectory verification. It is substantiated that the most appropriate approach for increasing positioning accuracy is a comprehensive approach that combines calibration, sensor correction, temperature compensation and digital means of process validation. The obtained generalizations can be used for a well-founded choice of technical solutions during the design, configuration, and modernization of robotic welding complexes.

Keywords: automatic control; mechatronic robot drives; robotic equipment service; influence of thermal effects, design of processing equipment.

САМЧУК Людмила Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, e-mail: Samchuk204@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-2516-045X>

ПРИДАЛЬНИЙ Борис Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної

механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, e-mail:b.prydalnyi@lutsk-ntu.com.ua <https://orcid.org/0000-0001-8565-5986>

ГУЛІЄВА Наталія Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, e-mail:n.huliieva@lntu.edu.ua <https://orcid.org/0000-0001-9282-4880>

СИЧУК Віктор Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, e-mail:v.sychuk@lntu.edu.ua <https://orcid.org/0000-0002-8267-0846>

Liudmyla SAMCHUK – PhD in Engineering, associate professor of Applied Mechanics and Mechatronics department, Lutsk National Technical University e-mail:Samchuk204@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-2516-045X>

Borys PRYDALNYI – PhD in Engineering, associate professor of Applied Mechanics and Mechatronics department, Lutsk National Technical University e-mail:b.prydalnyi@lutsk-ntu.com.ua <https://orcid.org/0000-0001-8565-5986>

Nataliia HULIEVA – PhD in Engineering, associate professor of Applied Mechanics and Mechatronics department, Lutsk National Technical University e-mail:n.huliieva@lntu.edu.ua <https://orcid.org/0000-0001-9282-4880>

Viktor SYCHUK – PhD in Engineering, associate professor of Applied Mechanics and Mechatronics department, Lutsk National Technical University e-mail:v.sychuk@lntu.edu.ua <https://orcid.org/0000-0002-8267-0846>

Дата надходження статті до видання: 02.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

<https://doi.org/10.36910/2zmnscs77>