

ВОРОПАЄВ М. В., НАБОКА О. В.**КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ У МАШИНОБУДУВАННІ**

У статті представлено системний огляд сучасних засобів і систем індустріальної метрології, що застосовуються у виробничих галузях промисловості — машинобудуванні, енергетиці, авіабудуванні та автомобілебудуванні. На основі матеріалів гостьової лекції, проведеної фахівцями компанії «Кода» — офіційного представника концерну Hexagon в Україні, — розглянуто класифікацію вимірювальних систем, їх технічні характеристики, особливості застосування та тенденції автоматизації вимірювальних процесів. Описано стаціонарні координатно-вимірювальні машини (КВМ) різних класів, портативні вимірювальні системи, засоби вимірювання на верстатах, а також роботизовані вимірювальні комплекси. Особливу увагу приділено питанням зворотного інженерингу як сучасного методу відтворення конструкторської документації за наявним зразком деталі.

Ключові слова: індустріальна метрологія, координатно-вимірювальна машина, Hexagon, портативні системи, лазерний сканер, зворотній інженеринг, контроль якості, автоматизація вимірювань.

VOROPAIEV M., NABOKA O.**A COMPREHENSIVE APPROACH TO MODERN MEASUREMENT TOOLS IN MECHANICAL ENGINEERING**

This paper presents a systematic overview of modern industrial metrology tools and systems applied in mechanical engineering, energy, aviation, and automotive industries. Based on materials from a guest lecture delivered by specialists of the Coda company — an official representative of Hexagon in Ukraine — the article examines the classification of measurement systems, their technical characteristics, application specifics, and trends in measurement process automation. Stationary coordinate measuring machines (CMMs) of various classes, portable measurement systems, on-machine measurement tools, and robotic measurement complexes are described. Particular attention is given to reverse engineering as a modern method of reconstructing design documentation from an existing part sample.

Keywords: industrial metrology, coordinate measuring machine, Hexagon, portable systems, laser scanner, reverse engineering, quality control, measurement automation.

Вступ.

Сучасне машинобудування характеризується постійним зростанням вимог до точності виготовлення деталей і вузлів, що обумовлює необхідність застосування прецизійних засобів вимірювання. Проблема забезпечення метрологічного контролю якості продукції набуває особливої актуальності в умовах впровадження цифрових технологій виробництва та автоматизованих систем управління технологічними процесами.

Стрімкий розвиток індустрії вимірювальних технологій зумовив появу широкого спектру засобів контролю геометричних параметрів виробів — від класичних стаціонарних координатно-вимірювальних машин (КВМ) до портативних лазерних трекерів і роботизованих вимірювальних комплексів. Провідним світовим виробником таких систем є концерн Hexagon, якому належать понад 15 великих заводів у різних частинах світу, що спеціалізуються на випуску вимірювального обладнання та відповідного програмного забезпечення.

В Україні налічується близько 100 координатно-вимірювальних машин виробництва Hexagon, що функціонують на підприємствах різних галузей — машинобудування, приладобудування, енергетики. Значна частина цих машин поставлена компанією «Кода», яка є офіційним дистриб'ютором Hexagon в Україні та також представляє обладнання таких відомих виробників, як Renishaw (Велика Британія) і Jenoptik Industrial Metrology.

Мета статті — систематизувати актуальну інформацію щодо класів, технічних характеристик і сфер застосування сучасних систем індустріальної метрології, представлених у портфоліо компанії Hexagon, для підвищення обізнаності фахівців у галузі машинобудування та технологій вимірювань.

Мета дослідження.

Метою даної роботи є систематизація сучасного портфеля засобів індустріальної метрології — від стаціонарних координатно-вимірювальних машин до портативних і роботизованих систем — та формування практичних рекомендацій щодо вибору вимірювального обладнання для підприємств машинобудівної галузі з урахуванням вимог до точності, умов виробничого середовища та завдань зворотного інженерингу.

3. Викладення основного матеріалу та результати.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі завдання дослідження:

- розглянути класифікацію систем індустріальної метрології та принципи їх роботи у трьох основних режимах: розмірний контроль, інспекція за CAD-моделлю та зворотній інженеринг;
- проаналізувати технічні характеристики та особливості застосування стаціонарних КВМ різних класів — портальних, цехових, ультрапрецизійних, мостових і мультисенсорних;
- охарактеризувати портативні вимірювальні системи (вимірювальні руки, лазерні трекери, сканери структурованого світла, фотограметричні системи) та їх застосування для великогабаритних об'єктів;
- описати типи датчиків і вимірювальних головок для стаціонарних КВМ — тактильних і безконтактних оптичних;
- розкрити зміст і послідовність процесу зворотного інженерингу, включаючи програмне забезпечення для обробки хмар точок;

- визначити критерії вибору вимірювального обладнання та окреслити провідні тенденції розвитку галузі.

Для порівняльного аналізу класів обладнання застосовано метод зіставлення за ключовими метрологічними характеристиками: точністю, діапазоном вимірювання, мобільністю та умовами експлуатації. Узагальнення практичного досвіду компанії «Кода» щодо впровадження систем на підприємствах України (ДП «Антонов», НКМЗ, Турбоатом та ін.) дозволило сформулювати рекомендації, що мають прикладний характер і орієнтовані на фахівців машинобудівної галузі.

Сучасний портфель метрологічних систем Hexagon охоплює чотири основні класи обладнання: стаціонарні координатно-вимірювальні машини; портативні вимірювальні системи; системи вимірювання на верстатах; роботизовані вимірювальні комплекси. Кожен клас відповідає певному рівню вимог щодо точності, мобільності та ступеня автоматизації вимірювального процесу.

Принципи роботи будь-якої вимірювальної машини реалізуються у трьох основних режимах застосування:

- розмірний контроль (поточковий) — перевірка відповідності виробу кресленню;
- інспекція за CAD-моделлю — порівняння реального виробу із цифровою математичною моделлю (STP, IGES тощо);

– зворотній інженіринг (reverse engineering) — отримання математичної моделі за наявним фізичним зразком деталі.

Слід підкреслити, що у сучасній виробничій практиці понад 95% вимірювань виконується шляхом порівняння реального виробу з CAD-моделлю, оскільки це значно підвищує інформативність і швидкість аналізу геометрії деталі.

Стаціонарні координатно-вимірювальні машини.

Портальні КВМ загального застосування. Портальні КВМ є найбільш поширеним класом стаціонарних вимірювальних систем. Вони призначені для геометричної та просторової інспекції виготовлених деталей і можуть застосовуватися з контактними (тактильними) або безконтактними (оптичними) датчиками. Машини цього класу використовуються як у лабораторних умовах, так і безпосередньо у виробничих цехах за умови відповідного температурного режиму (від 15 до 30°C за стандартом ISO 1 : 2002).

Стандартна лінійка портальних КВМ Hexagon Global характеризується повторюваністю вимірювань на рівні 1,3–1,5 мкм. Такої точності достатньо для вирішення переважної більшості задач машинобудівного виробництва. Діапазони вимірювання машин цього класу: по осі X — до 1,5 м, по осі Y — до 4 м, по осі Z — до 2 м. В Україні встановлено машини, зокрема, на підприємствах ДП «Антонов» та ін.

Переваги портальних КВМ: універсальне застосування; гнучкість у виборі технологій вимірювання та типів датчиків; висока швидкість аналізу (від кількох хвилин до кількох десятків хвилин залежно від складності деталі); можливість автоматичної зміни вимірювального інструменту за допомогою магазину.

Цехові КВМ. Цехові КВМ призначені для встановлення безпосередньо в умовах виробничого цеху поруч з технологічним обладнанням. Їх основна відмінність від лабораторних машин — можливість роботи в ширшому температурному діапазоні та стійкість до вібрацій і промислового запилення. Характерним представником цього класу є машина TIGO SF, яка, на відміну від лабораторних систем з пневматичними підшипниками, використовує кульково-гвинтові передачі та енкодері, що усуває потребу у стисненому повітрі.

Ключові переваги цехових КВМ: скорочення «логістичного плеча» між верстатом і засобом контролю; оперативне отримання зворотного зв'язку для коригування технологічного процесу; легка інтеграція в автоматизовані гнучкі виробничі лінії; можливість автоматичного коригування припусків на обробку за результатами вимірювань. Широке використання цехових КВМ характерне для провідних європейських виробників, де вони є невід'ємним елементом цифрових виробничих систем.

Ультрапрецизійні КВМ. Ультрапрецизійні машини призначені для вимірювань, де стандартна точність є недостатньою. Клас точності таких машин — субмікронний. Наприклад, машина серії Leitz PMM-C має точність $0,28 + L/1000$ мкм, що дозволяє вимірювати деталь метрового розміру з похибкою не більше 1,3 мкм. Для порівняння: товщина людського волосся становить 30–50 мкм, а відбиток пальця — близько 5 мкм.

Ультрапрецизійні машини потребують строго контрольованого лабораторного середовища зі стабільним температурним режимом. Їх застосовують: для вимірювання підшипників і різального інструменту; як референтні (еталонні) машини для перевірки стандартних КВМ підприємства; у розробці нових моделей вимірювальних машин на виробничих підприємствах Hexagon.

Мостові та горизонтальні КВМ. Мостові (великогабаритні) КВМ є продовженням лінійки портальних машин для вимірювання великих виробів. Конструктивно вони виконані у вигляді мостового крана з траверсою, що переміщається вздовж двох колон. Це дає змогу встановлювати важкі деталі безпосередньо на підлогу без обмежень по масі. Максимальний розмір робочої зони таких машин може досягати 20 м (рекорд — машина в Китаї для потреб енергетики). В Україні найбільша встановлена мостова машина має зону вимірювання $2,5 \times 5 \times 2,3$ м і розташована на Новокраматорському машинобудівному заводі (НКМЗ).

Горизонтальні (стоечні) КВМ спеціалізовані для вимірювання кузовних елементів автомобілів. Вони можуть виконуватися з однією або двома стойками (остання конфігурація передбачає синхронну роботу двох машин). Точність таких систем становить 5–10 мкм, що відповідає вимогам автомобільного виробництва до контролю штампованих елементів кузова.

Мультисенсорні КВМ. Мультисенсорні КВМ (серія Optiv) поєднують контактний і безконтактний методи вимірювання в одній машині. Вони є, по суті, мікроскопами нового покоління, де замість ока людини використовуються цифрові камери та оптичні системи з автоматичним фокусуванням. Точність оптичних вимірювань — до 0,1 мкм з роздільною здатністю, точність по осі Z (за рахунок конфокального фокусування) — близько 0,01 мм.

Типові галузі застосування мультисенсорних КВМ: радіоелектроніка та мікроелектроніка (контроль розташування елементів на друкованих платах); точна механіка (вимірювання важкодоступних малих розмірів); виробництво мобільних пристроїв та корпусів складної геометрії. Мінімальний діаметр вимірювального щупа для тактильного контакту — 0,3 мм, що відповідає деталям дуже малих розмірів.

Датчики та вимірювальні головки для стаціонарних КВМ.

Стаціонарна КВМ є багатокоординатною системою. З урахуванням усіх ступенів свободи: трьох лінійних осей машини (X, Y, Z), двох осей поворотної головки (A і B), шести осей тактильного скануючого датчика та однієї осі поворотного столу — загальна кількість осей досягає 13. Це забезпечує унікальну гнучкість у досягненні будь-яких поверхонь деталі.

Тактильні датчики. Touch Trigger Probe (ТТР) — класичний дотиковий датчик — є тривимірним високоточним мікровимикачем, який реєструє координати точки в момент торкання кульки щупа до поверхні деталі. Продуктивність такого методу — близько 1 точки на секунду. Незважаючи на обмежену продуктивність, ТТР забезпечує мікронну точність і широко застосовується для відповідальних вимірювань.

Скануючі (аналогові) датчики — сучасніший клас тактильних засобів. Вони дозволяють виконувати як поточкові вимірювання, так і сканування поверхні у безвідривному режимі (сплайнове сканування). Завдяки безперервному ковзанню по поверхні продуктивність значно перевищує можливості ТТР. Саме скануючі датчики є основним типом, який постачається разом із сучасними КВМ Hexagon. Особливої уваги заслуговує застосування голкоподібних щупів для вимірювання різьби і різбових калібрів безпосередньо на КВМ, що дозволяє уникнути необхідності в окремих контурографах.

Безконтактні оптичні датчики. Лазерний рядковий сканер HP-L 10.10 є найбільш сучасним безконтактним датчиком для стаціонарних КВМ. Він дозволяє одночасно знімати велику кількість точок (рядковий метод), забезпечуючи точність 5–8 мкм. Це є достатнім для аналізу складних пресформ, литих і штампованих деталей. Попередня модель HP-L 10.6 продемонструвала 70% скорочення часу інспекції порівняно з тактильним методом. Нова модель HPL 10.10 за даними виробника є в 7 разів швидшою.

Конфокальний датчик (субмікронна точність) застосовується для вимірювань у режимі мультисенсорних систем, зокрема для контролю координат елементів друкованих плат. Оптичний датчик структурованого світла може монтуватися на порталну машину, перетворюючи її у мультисенсорну систему для задач, де потрібно поєднати тактильне і оптичне вимірювання.

Портативні вимірювальні системи.

Вимірювальні руки. Портативні вимірювальні руки (FARO, Romer та ін. у портфоліо Hexagon) є шести- або семиосьовими пристроями, які «несуть» вимірювальну машину до деталі, а не навпаки. Вони ідеально підходять для вимірювання великогабаритних деталей там, де транспортування виробу до лабораторії неможливе або недоцільне. Метафора для розуміння точності: якщо КВМ — це «3D мікрометр», то вимірювальна рука — «3D штангенциркуль».

Технічні характеристики вимірювальних рук: діапазон вимірювання — від 1,2 м до 4,5 м радіусу; максимальна точність (найменша рука) — 8 мкм при тактильному вимірюванні; точність при лазерному скануванні — 2–5 соток міліметра; вартість найкращих варіантів комплектації з лазерним сканером — близько 150 000 євро. Захист від виробничого середовища досягає рівня IP54, що дозволяє використовувати руки безпосередньо на верстатах у зоні охолоджувальних рідин.

Важливою перевагою є можливість вимірювання деталей безпосередньо на верстаті без зйому заготовки. Перевстановлення деталі неминує вносить похибки в подальшу обробку, тому міжопераційний контроль на верстаті дозволяє суттєво підвищити якість виготовлення складних деталей. Найновіший лазерний сканер AS1 (Absolute Scanner AS1) для вимірювальних рук вирішив традиційну проблему відзеркалення від металевих поверхонь: адаптивне керування інтенсивністю лазера здійснюється не один раз на сесію, а для кожної рядкової смуги сканування окремо.

Лазерні трекери. Лазерні трекери — координатно-вимірювальні машини, що здійснюють прецизійне стеження за положенням оптичної призми (відбивача) або безпосередньо скануванням поверхні. Вони є ключовим інструментом для великих об'єктів в енергетиці, суднобудуванні та авіабудуванні.

Новітня модель ATS600 реалізує безпосереднє лазерне сканування поверхні з точністю 0,3 мм при великих відстанях, що відкриває нові можливості для авіабудування та суднобудування. У травні 2025 року Hexagon випустив нову систему Leica Absolute Tracker ATS800, яка поєднує точність лазерного трекера з можливостями прямого безконтактного сканування і оптимізована для роботи в складі автономних мобільних роботів (AMR). На великих промислових підприємствах України (НКМЗ, Турбоатом) трекери використовуються одночасно з вимірювальними руками для виконання різних задач — прив'язки, розмічення заготовок та контролю точності складання.

Сканери структурованого світла. Сканери структурованого світла є одним з найновіших напрямків у портативній метрології. В світі лише близько п'яти виробників успішно застосовують цю технологію. Принцип роботи — проектування спеціального оптичного малюнка зі зміною фаз на поверхню деталі та аналіз деформації цього малюнка для відновлення тривимірної геометрії.

Найновіша модель Hexagon SmartScan VR800 є першим у світі оптичним сканером із запатентованим моторизованим оптичним зумом і камерами 20 МП, що дозволяє програмно змінювати поле зору без фізичної заміни об'єктивів. Сканер використовує четверту вісь (поворотний стіл) для сканування деталі з різних ракурсів. Погрешність форми (Probing Size error) VR800 складає від 3 до 8 мкм, однак глобальна масштабна погрешність відстані (Sphere Spacing Error, SSE) у робочому об'ємі становить від 9 до 28 мкм залежно від конфігурації. Це робить сканери структурованого світла привабливими для авіабудування (контроль лопаток турбін, пресформ) та точного машинобудування.

Системи структурованого світла легко автоматизуються шляхом встановлення сканера на промисловий робот або кобот. В Україні перші такі системи з'явилися близько 7 років тому. Їх основні замовники — підприємства авіаційної промисловості і точного машинобудування.

Фотограметричні системи та ручні сканери. Фотограметричні системи (не більше 10–12 років на ринку) засновані на алгоритмах фотограметрії та використовують спеціальні маркери для вимірювання великогабаритних об'єктів. Ці системи стали можливими лише після того, як обчислювальна потужність сучасних комп'ютерів забезпечила аналіз даних у режимі реального часу.

Ручні метрологічні сканери (серія Leica RTC360, HandySCAN та ін. у портфоліо Hexagon) дозволяють використовувати фотограметричні алгоритми для вимірювання великогабаритних об'єктів у «вільному» режимі. Вони застосовуються при відсутності чіткої прив'язки до системи координат, коли оператор обходить виріб і збирає хмару точок з різних позицій.

Особливу позицію займає запатентована система інспекції труб, аналогів якій немає у жодного іншого виробника. Вона дозволяє контролювати розміри і корекцію трубогібів при виготовленні труб складної просторової конфігурації або стрижнів прямокутного перерізу для генераторів і турбін.

Зворотній інженіринг як метод відтворення конструкторської документації.

Зворотній інженіринг (reverse engineering) — це процес отримання математичної моделі або конструкторської документації на підставі наявного фізичного зразка деталі, механізму або виробу. На відміну від інспекції (перевірки відповідності виробу моделі), це зворотній процес — від реального об'єкта до його цифрового опису. Зворотній інженіринг набуває особливого значення в умовах необхідності відновлення виробництва деталей за відсутності оригінальної документації.

Процес зворотного інженірингу включає кілька обов'язкових етапів: підготовку деталі (очищення від забруднень, нагару); сканування (оптичне або тактильне) для отримання «хмари точок»; моделювання — перетворення хмари точок у твердотільну CAD-модель; конструкторська обробка — призначення номінальних розмірів, допусків, посадок та матеріалів кваліфікованим конструктором. Важливо підкреслити, що вимірювальна система надає тільки реальну геометрію зразка; призначення допусків і посадок залишається компетенцією конструктора і технолога.

Для моделювання компанія «Кода» використовує програму Geomagic Design X — спеціалізований інструмент зворотного інженірингу, що дозволяє автоматизовано конвертувати хмару точок у параметричну твердотільну модель, придатну для подальшого редагування в CAD-системах (CATIA, SolidWorks, NX тощо). Для інспекції застосовується також програмний пакет PolyWorks з модулями IMInspect та IMAlign. Обидва програмні засоби постачаються та супроводжуються компанією «Кода».

Практичний досвід компанії свідчить, що більшість замовників перших систем зворотного інженірингу спочатку замовляють послуги сканування, а вже після нагромадження практичного досвіду переходять до придбання власного обладнання.

Критерії вибору вимірювального обладнання.

Вибір класу вимірювальної системи визначається сукупністю факторів: розміром вимірюваних деталей; необхідною точністю вимірювань; умовами виробничого середовища; необхідністю мобільності; вимогами до продуктивності; бюджетом інвестицій.

Ключовим метрологічним принципом при виборі засобу вимірювання є правило Test Accuracy Ratio (TAR): точність інструменту має перевищувати допуск вимірюваного параметра не менше ніж у 5 разів (рекомендована норма для КВМ-класу) або в 10 разів (для ручних інструментів). Значення TAR у 2–3 рази є абсолютним нижнім допустимим порогом, при якому метрологічна достовірність починає знижуватись. Тобто для контролю розміру з допуском 0,1 мм необхідна машина з точністю не гіршою за 0,003–0,005 мм.

Орієнтовні ціни на основні класи систем: стандартна портальна КВМ — від 50 000 до 200 000 євро залежно від розміру і комплектації; вимірювальна рука з лазерним сканером — близько 150 000 євро; мостова КВМ великого розміру — кілька сотень тисяч євро; лазерний трекер — зіставний з вартістю вимірювальної руки або вищий.

Для умов виробництва, де основними задачами є зворотній інженіринг і контроль деталей із допусками 2–5 соток, оптимальним вибором є вимірювальна рука або настільний 3D-сканер типу Spider. Якщо ж на

підприємстві виробляється відповідальна продукція з мікронними допусками (підшипники, пресформи, прецизійні деталі), необхідна стаціонарна КВМ.

Тенденції розвитку індустріальної метрології.

Аналіз представленого портфоліо дозволяє виокремити такі основні тенденції розвитку галузі.

- Інтеграція вимірювань у виробничий процес. Зміщення контролю якості від лабораторного до цехового — використання цехових КВМ і вимірювальних рук безпосередньо поруч з обробним обладнанням.
- Конвергенція контактних і безконтактних технологій. Мультисенсорні системи та комбіновані сканери усувають протиставлення тактильних і оптичних методів, забезпечуючи оптимальне поєднання точності й продуктивності.
- Роботизація вимірювальних процесів. Встановлення сканерів структурованого світла на роботи і коботи відкриває шлях до повністю автоматизованого вимірювання в складі гнучких виробничих систем.
- Зростання ролі програмного забезпечення. Виробники все активніше розвивають екосистеми програмних платформ (платформа Hexagon), що об'єднують управління обладнанням, обробку даних, навчання операторів та аналітику виробничих процесів.
- Збільшення циклу виставок. Провідні виробники перейшли від щорічної до дворічної участі у виставках (Control, Штутгарт) для накопичення значимих інновацій між показами, що відображає ускладнення та подорожчання розробки нового покоління систем.

Висновки.

Сучасні системи індустріальної метрології охоплюють широкий спектр класів обладнання — від субмікронних ультрапрецизійних лабораторних машин до мобільних роботизованих сканерів, — що дозволяє вирішувати практично будь-яку задачу вимірювання в машинобудуванні.

Ключовим критерієм вибору засобу вимірювань є відповідність точності інструменту допускам вимірюваних параметрів (2–3-кратний запас для КВМ-класу), а також відповідність умовам виробничого середовища і вимогам до мобільності.

Зворотній інжиніринг є важливим, але багатоетапним процесом, що вимагає не лише вимірювального обладнання та програмного забезпечення, а й кваліфікованих конструкторів і технологів, здатних інтерпретувати отримані геометричні дані та призначити допуски з урахуванням функціонального призначення деталі.

Провідна тенденція галузі — інтеграція вимірювань безпосередньо у виробничий процес із автоматизованою передачею даних на технологічне обладнання. Це суттєво скорочує цикл обробки та підвищує стабільність якості продукції.

Для підприємств України, що здійснюють або планують впровадження сучасних засобів метрологічного контролю, рекомендується розпочинати з послуг вимірювання — це дозволяє сформувати реалістичне уявлення про задачі та потреби до придбання власного обладнання.

Список літератури:

1. Hexagon Manufacturing Intelligence. Portfolio of Metrology Systems [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.hexagon.com> — Дата звернення: квітень 2025.
2. UA ТОВ Фірма «КОДА» [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.koda.ua/ukr/> — Дата звернення: квітень 2025.
3. De Chiffre L., Quagliotti D. The Role of Geometrical Metrology in Manufacturing—An Update // 2024 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor) 2024.
4. Stojadinovic S. M., Majstorovic V. D., Gaška A., Sładek J., Durakbasa N. M. Development of a Coordinate Measuring Machine—Based Inspection Planning System for Industry 4.0 // Applied Sciences, 11(18), 8411. 2021.
5. Debnath B., Pourfarash Z., Ghorpade B., Raman S. Integrating Reverse Engineering for Digital Model Reconstruction and Remanufacturing of Mechanical Components: A Systematic Review // Metrology, 5(4), 66. 2025.
6. Magdziak M. Estimating Time of Coordinate Measurements Based on the Adopted Measurement Strategy // Sensors, 22(19), 7310. 2022.
7. Козловський В. В., Шкварницька Т. Ю. Автоматизовані системи контролю геометричних параметрів деталей на базі координатно-вимірювальних технологій // Системні технології № 2 (157) 2025. с. 120-127. ISSN 1562-9945.
8. Gabštur P., Kočíško M., Kaščák J., Pollák M. Methodology for Verification of Geometrically Complex Components Through Reverse Engineering // Applied Sciences, 15(7), 3963. 2025.
9. Phillips S., Shakarji C., Balsamo A., Krystek M., Morse E. The 2016 Revision of ISO 1 - Standard Reference Temperature for the Specification of Geometrical and Dimensional Properties // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol. 121. 2016. с. 503.
10. Wang W., et al. On-site calibration method of the AACMM based on a high-precision CNC machine tool // Measurement Science and Technology 2022.
11. Пермяков О. А., Яковенко І. Е., Калініченко В. А., Скіба О. С., Юзковіч П. Реверсивний інжиніринг та впровадження сучасних методів і засобів контрольних операцій // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. 2023.

References (transliterated)

1. Hexagon Manufacturing Intelligence. Portfolio of Metrology Systems [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.hexagon.com> — Date of access: April 2025.
2. UA LLC Firm "KODA" [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.koda.ua/ukr/> — Application date: April 2025.
3. De Chiffre L., Quagliotti D. The Role of Geometrical Metrology in Manufacturing—An Update // 2024 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor) 2024.

4. Stojadinovic S. M., Majstorovic V. D., Gaška A., Sładek J., Durakbasa N. M. Development of a Coordinate Measuring Machine—Based Inspection Planning System for Industry 4.0 // *Applied Sciences*, 11(18), 8411. 2021.
5. Debnath B., Pourfarash Z., Ghorpade B., Raman S. Integrating Reverse Engineering for Digital Model Reconstruction and Remanufacturing of Mechanical Components: A Systematic Review // *Metrology*, 5(4), 66. 2025.
6. Magdziak M. Estimating Time of Coordinate Measurements Based on the Adopted Measurement Strategy // *Sensors*, 22(19), 7310. 2022.
7. Kozlovsky V. V., Shkvarnytska T. Yu. Automated systems for controlling geometric parameters of parts based on coordinate measuring technologies // *System Technologies No. 2 (157) 2025*. pp. 120-127. ISSN 1562-9945.
8. Gabštur P., Kočíško M., Kaščák J., Pollák M. Methodology for Verification of Geometrically Complex Components Through Reverse Engineering // *Applied Sciences*, 15(7), 3963. 2025.
9. Phillips S., Shakarji C., Balsamo A., Krystek M., Morse E. The 2016 Revision of ISO 1 - Standard Reference Temperature for the Specification of Geometrical and Dimensional Properties // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Vol. 121. 2016. p. 503.
10. Wang W., et al. On-site calibration method of the AACMM based on a high-precision CNC machine tool // *Measurement Science and Technology* 2022.
11. Permyakov O. A., Yakovenko I. E., Kalinichenko V. A., Skiba O. S., Yuzkovich P. Reverse engineering and implementation of modern methods and means of control operations // *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Technologies in Mechanical Engineering*. 2023.

Надійшла (received) 03.03.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Воропаєв Мирослав Вячеславович (Voropaiev Myroslav) - аспірант кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: Myroslav.Voropaiev@mit.khpi.edu.ua, ORCID:0009-0009-6540-7999

Набока Олена Володимирівна (Naboka Olena) - канд. техн. наук, професор кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: Olena.V.Naboka@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3997-5481