

М. В. ВОРОПАЄВ, О. В. НАБОКА

СУЧАСНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНОГО КОНТРОЛЮ В МАШИНОБУДУВАННІ

У статті представлено систематизований огляд сучасних засобів вимірювальної техніки вітчизняних виробників, зокрема фірми «КОДА» (м. Харків), що здійснює поставки широкого спектру для корпорації Hexagon Metrology (бренд Tesa Technology). Огляд охоплює множину прецизійних вимірювальних приладів для потреб машинобудівного виробництва. Розглянуто конструктивні особливості, технічні характеристики та специфіку застосування таких засобів, як штангенциркулі, мікрометри, нутроміри, індикатори годинникового та важільного типу, інклінометри, висотоміри, профілометри, оптичні вимірювальні системи та трикоординатні вимірювальні мікроскопи. Особливу увагу приділено питанням метрологічного забезпечення, простежуваності результатів вимірювань та вимогам стандарту ISO 17025. Проаналізовано переваги пневматичних та індуктивних вимірювальних систем для потокового контролю. Стаття призначена для фахівців у галузі метрології, контролю якості та машинобудівного виробництва.

Ключові слова: Hexagon Metrology, Tesa Technology, засоби вимірювальної техніки, прецизійний контроль, нутроміри, мікрометри, штангенциркулі, індикатори, інклінометри, метрологічна простежуваність.

M. VOROPAIEV, O. NABOKA

MODERN SOLUTIONS FOR PRECISION CONTROL IN MECHANICAL ENGINEERING

The article presents a systematic review of modern measuring instruments of domestic manufacturers, in particular the company "KODA" (Kharkiv), which supplies a wide range of products to the Hexagon Metrology corporation (Tesa Technology brand). The review covers a variety of precision measuring instruments for the needs of machine-building production. The design features, technical characteristics and specifics of the application of such instruments as calipers, micrometers, internal gauges, dial and lever indicators, inclinometers, altimeters, profilometers, optical measuring systems and three-coordinate measuring microscopes are considered. Special attention is paid to the issues of metrological support, traceability of measurement results and the requirements of the ISO 17025 standard. The advantages of pneumatic and inductive measuring systems for flow control are analyzed. The article is intended for specialists in the field of metrology, quality control and machine-building production.

Keywords: Hexagon Metrology, Tesa Technology, measuring instruments, precision control, bore gauges, micrometers, calipers, indicators, inclinometers, metrological traceability.

Вступ.

Розвиток сучасного машинобудування невіддільно пов'язаний з підвищенням вимог до якості та точності виготовлення деталей і вузлів. В умовах цифровізації виробничих процесів, широкого застосування верстатів із числовим програмним керуванням (ЧПК) та автоматизованих виробничих ліній особливої актуальності набуває питання метрологічного забезпечення виробництва – від вхідного контролю матеріалів до фінального приймального контролю готової продукції.

Серед провідних світових виробників засобів вимірювальної техніки в галузі геометричних вимірювань виділяються три основних гравці: японська компанія Mitutoyo, німецька Mahr та шведсько-американська Hexagon Metrology.

Кожна з цих корпорацій займає значну частку глобального ринку та пропонує широкий спектр рішень – від традиційних ручних засобів вимірювань до складних автоматизованих вимірювальних комплексів, але саме з останньою тісно співпрацює вітчизняна фірма «КОДА», що має можливість запропонувати замовникам як невеликі напівавтоматичні вимірювальні машини Hexagon Metrology TESA (Швейцарія), так і машини різних компонувань (портальні, стійкові, мостові) Hexagon Metrology DEA (Італія) з габаритами вимірюваних деталей до декількох десятків метрів.

Мета дослідження.

Метою даної статті є систематизований науково-технічний огляд засобів вимірювальної техніки, що розробляється вітчизняним постачальником для зовнішніх ринків.

Актуальність теми зумовлена необхідністю ознайомлення вітчизняних спеціалістів із сучасним рівнем розвитку вимірювальних технологій, виробленням чіткого розуміння принципів вибору вимірювальних засобів залежно від виробничих завдань, а також важливістю дотримання вимог міжнародних метрологічних стандартів.

3. Викладення основного матеріалу та результати.

Для реалізації визначеної мети необхідно проаналізувати конструктивні особливості, технічні характеристики та специфіку практичного застосування широкого спектра прецизійних вимірювальних приладів, серед яких штангенциркулі, мікрометри, нутроміри, індикатори годинникового та важільного типу, інклінометри, висотоміри, профілометри, а також оптичні та трикоординатні системи.

Важливим завданням є також дослідження питань метрологічного забезпечення, простежуваності результатів вимірювань відповідно до вимог стандарту ISO 17025 та оцінка переваг індуктивних і пневматичних систем для потокового контролю.

© М.В. Воропаєв, О.В.Набока. 2025

У процесі роботи застосовано методи науково-технічного огляду та систематизації даних щодо конструктивних та інноваційних рішень компанії, а також аналіз умов забезпечення метрологічної простежуваності вимірювань до державних еталонів згідно з вимогами стандарту ISO/IEC 17025.

Корпорація Hexagon Metrology є глобальним лідером у галузі вимірювальних технологій та метрологічних рішень. У складі корпорації функціонують такі визнані бренди, як Tesa Technology (Швейцарія), Leica Geosystems, DEA (Італія – трикоординатні вимірювальні машини), а також виробники сканерів (Франція) та інші спеціалізовані підрозділи. Корпоративна мережа налічує підрозділи та представництва на всіх континентах: в Європі, Північній та Південній Америці, Азії (Китай, Японія), Африці.

Корпоративний слоган Tesa Technology – "When you need to be sure" ("Коли вам необхідно бути впевненими") – відображає ключову ідеологію компанії: кожен засіб вимірювань повинен забезпечувати надійний, точний та повторюваний результат незалежно від умов застосування. Компанія виокремлює п'ять основних причин обрати її продукцію:

— Використання виключно високоякісних матеріалів: зносостійкі загартовані сталі спеціальних сортів, графітові та скляні компоненти для відповідних застосувань.

— Гарантована точність у повному діапазоні вимірювань: точність, прописана в специфікації, зберігається в будь-якій точці діапазону та в будь-яких нормованих умовах.

— Застосування сучасних технологій: мікроелектроніка, 3D-друк для виготовлення прецизійних компонентів, інтерферометричні шкали тощо.

— Метрологічна простежуваність: кожен засіб вимірювання постачається з протоколом заводського калібрування або сертифікатом калібрування акредитованої лабораторії відповідно до вимог ISO/IEC 17025.

— Довготривала надійність: задокументовані випадки підтримання мікрометрів та штангенциркулями своєї метрологічної придатності протягом 20 і більше років інтенсивної експлуатації.

Забезпечення метрологічної простежуваності є одним із ключових принципів роботи компанії. Відповідно до вимог стандарту ISO/IEC 17025 усі засоби вимірювань – від простих мікрометрів до складних координатних машин – постачаються з підтверджуючими документами, що встановлюють ланцюжок простежуваності до державних еталонів.

Ручні засоби вимірювань.

Штангенциркулі. Штангенциркуль є одним із найрозповсюдженіших і найпізнаваніших засобів вимірювальної техніки в машинобудуванні. Tesa Technology пропонує широку лінійку штангенциркулів – від класичних ноніусних до сучасних електронних моделей із захистом від пилу та вологи на рівні IP67.

Електронні штангенциркулі Tesa демонструють здатність проводити вимірювання в агресивних умовах: у воді, при контакті з льодом, при вимірюванні м'яких матеріалів. Точність позиціонування електронних штангенциркулів у діапазоні до 200 мм досягає $\pm 0,01$ мм (10 мкм).

Однією з інноваційних розробок компанії є полегшені штангенциркулі великих розмірів. Якщо традиційний сталевий штангенциркуль завдовжки 2 м важить від 10 до 18 кг, то аналогічний прилад із вуглецевого волокна (CFRP) важить лише близько 3,3 кг завдяки застосуванню легких вуглецевих матеріалів і спеціальних конструктивних рішень. Це дозволяє одному оператору проводити вимірювання без застосування підйомних механізмів, що суттєво підвищує продуктивність та ергономіку праці.

Мікрометри. Мікрометри Tesa Technology вирізняються запатентованою технологією перетворення кутового переміщення в лінійне, що забезпечує точність вимірювань на рівні 1 мкм у діапазоні до 600 мм. Це суттєво перевищує можливості традиційних мікрометрів, де забезпечення мікронної точності обмежується значно меншими діапазонами.

Принципово важливою особливістю є те, що мінімальний діапазон вимірювань мікрометрів Hexagon становить 0–30 мм, тоді як у конкурентів (Mitutoyo, Mahr) цей діапазон традиційно складає 0–25 мм. Дане рішення зумовлене практичними вимогами машинобудування: значна частина токарних деталей має розміри в межах 25–30 мм, а також необхідністю вимірювання розмірів, близьких до 1 дюйма (25,4 мм), що є стандартним розміром у дюймовій системі, широко вживаній при нарізуванні різей.

Технічна складність розширення діапазону мікрометра пов'язана з тим, що стандартний крок вимірювального гвинта становить 0,5 мм, і забезпечення рівномірної мікронної точності на всьому ході гвинта є вкрай складним конструктивним завданням. Запатентована технологія Tesa дозволяє вирішити цю проблему.

Нутроміри. В асортименті Hexagon Metrology представлено декілька типів нутромірів для вимірювання внутрішніх діаметрів:

Двоточкові нутроміри традиційно застосовуються для вимірювання внутрішніх діаметрів на невеликих глибинах (до 100–200 мм). Похибка вимірювання двоточковим нутроміром складає від 4 до 10 мкм залежно від ціни поділки відлікового пристрою. Навіть при застосуванні нутроміра з ціною поділки 1–2 мкм загальна інструментальна похибка результату вимірювання становить не менше 6 мкм, що регламентується технічними умовами і відповідними ГОСТ.

Триточкові нутроміри є власною розробкою компанії Hexagon і призначені для вимірювань з похибкою 1 мкм. Конструкція з трьома вимірювальними контактами, розташованими під кутом 120° один до одного, реалізована за допомогою спеціалізованого механізму позиціонування. Це дозволяє: уникнути перекосів і швидкого зносу вузла; мінімізувати мертвий хід вимірювальної ніжки; забезпечити самоцентрування в отворі.

Для збільшення глибини вимірювання система Tesa IMICRO оснащується спеціальними сталевими подовжувальними вставками (довжиною 100, 150, 500 та до 1000 мм), що дозволяє вимірювати на глибині до кількох сотень міліметрів залежно від діапазону приладу. Слід зазначити, що подовжувачі виготовляються зі

сталі (а не вуглецевого волокна), оскільки передача крутного моменту через мікрометричний механізм вимагає відповідної жорсткості матеріалу.

Для вимірювання надвеликих діаметрів (понад 1 м, аж до 32 м і більше), що характерно для енергетичного та аерокосмічного машинобудування, Hexagon пропонує спеціальні двоточкові нутроміри з додатковими вимірювальними наконечниками, що забезпечують точність 2–3 мкм. Конструктивно вставки виконані з карбонових матеріалів, що робить їх стійкими до температурних деформацій.

Індикатори та відлікові пристрої.

Індикатори годинникового типу. Швейцарія традиційно є визнаним лідером у виробництві прецизійних механічних систем, і годинникова техніка займає в цьому особливе місце. Саме швейцарські майстри заклали основи виробництва точних механізмів, які пізніше перейняли японські виробники. Tesa Technology успадкувала ці традиції і виробляє індикатори годинникового типу з ціною поділки 1 мкм та загальною похибкою не більше 2 мкм на ході 12,5 мм.

Поряд із традиційними механічними моделями, Tesa Technology розробила інноваційну технологію електронних індикаторів. В них шток переміщує спеціальну решітку вздовж прецизійної інтерферометричної електронної шкали, що дозволяє досягти відліку в 1 мкм. Ці компоненти виготовлені із застосуванням нанометрових технологій. Заводські серійні номери таких індикаторів сягають восьмизначних чисел, що свідчить про надзвичайно широке їх розповсюдження у виробництві.

Важільні індикатори. Важільні індикатори знайшли широке застосування при визначенні відхилень форми та розташування поверхонь: радіального биття, відхилення від прямолінійності, площинності, співвісності. Tesa Technology є одним із небагатьох виробників, що пропонують електронні важільні індикатори з точністю 1 мкм і діапазоном вимірювань близько 0,2 мм.

Серед конкурентів подібну точність забезпечують лише провідні європейські виробники вимірювального інструменту (зокрема чеська компанія Somet/Kinex) та сама Tesa, проте саме продукти під брендом Tesa вважаються еталоном у цьому сегменті. Типова область застосування – налагодження металорізальних верстатів: перевірка паралельності напрямних, прямолінійності кулькогвинтових пар (ШВП), а також монтаж і юстирування вузлів верстатів із ЧПК, де необхідно забезпечити паралельність або прямолінійність на рівні 10 мкм на метр ходу каретки.

Вимірювальні стійки. Вимірювальні стійки Hexagon Metrology є прецизійними базовими пристроями для монтажу відлікових пристроїв і проведення відносних вимірювань. Ключові характеристики: рух колони з мікронною точністю, мікроподача з переміщенням на висоту до 300 мм, допуск виготовлення колони менше 1 мкм. Рейкова направляюча, на відміну від конкурентів, виведена за межі колони, що забезпечує рівноваженість системи та відсутність перекосів при переміщенні відлікового пристрою.

Важливою особливістю стійок Hexagon є уніфіковані кріпильні системи, які дозволяють встановлювати відлікові пристрої різних виробників. Стійки використовують загартований сплавний чавун як матеріал колони – з нормалізованими деформаціями і стабільними геометричними параметрами.

Електронні інклінометри та вимірювання кута нахилу.

Електронні інклінометри (рівні) Tesa Technology серії CLINOBEVEL (моделі Clinobevel 1 USB, 2 та 3) є унікальними засобами вимірювань з похибкою 1 мкм/м, що відповідає куту менше однієї кутової секунди. Для ілюстрації: розрізнення об'єкта розміром із футбольний м'яч на відстані близько 30 км відповідає приблизно одній кутовій хвилині, тобто точність інклінометра є ще на порядок вищою.

Застосування інклінометрів надзвичайно широке в контрольно-вимірювальній практиці машинобудування:

— Контроль площинності гранітних повірочних плит – базового елемента будь-якого вимірювального лабораторного обладнання.

— Перевірка горизонтальності та прямолінійності направляючих токарних, фрезерних та шліфувальних верстатів.

— Калібрування та атестація верстатів із ЧПК, у тому числі з поворотними столами (понад сім осей позиціонування).

— Контроль кутів нахилу вузлів складних виробничих установок.

Порівняно з традиційним автоколіматорним методом (наприклад, з використанням автоколіматора Taylor Hobson), який вимагає значних фінансових витрат і є складним в обслуговуванні, застосування електронних інклінометрів Tesa дозволяє досягти аналогічної точності при суттєво меншій вартості обладнання. Метод застосування інклінометрів визнаний стандартом ISO як один із допустимих методів контролю точності верстатів. Діапазон вимірювань на базах до 30 м дозволяє перевіряти великогабаритні верстати і споруди.

Кінцеві міри довжини та калібри.

Кінцеві міри довжини. Кінцеві міри довжини (КМД) є первинними еталонами довжини в машинобудівному виробництві. Tesa Technology виготовляє КМД класу К – найвищого класу відповідно до стандарту ISO 3650. Класифікація передбачає класи К, 0, 1, 2 за спаданням точності; в умовах виробництва застосовуються також класи 3 і 4, проте нижче четвертого класу КМД не використовуються.

Особливістю продукції Tesa є титанові кінцеві міри, які мають підвищену зносостійкість, корозійну стійкість і застосовуються безпосередньо у виробничих умовах як робочі еталони. КМД класу К

використовуються виключно для калібрування та передачі розміру в повірочних та калібрувальних лабораторіях.

Компаратори кінцевих мір. Компаратор кінцевих мір Tesa Technology є унікальним метрологічним інструментом, що дозволяє проводити калібрування КМД від нульового до другого класу точності включно. Похибка вимірювання при цьому становить менше 2 мкм. Умовою досягнення такої точності є застосування термостабілізованих лабораторій (температура $20 \pm 0,1$ °C), використання відповідних еталонів з підтверженою простежуваністю до національних стандартів та висококваліфікований персонал.

Калібри. Допусковий контроль за допомогою калібрів, попри розвиток кількісних методів вимірювань, залишається актуальним і широко застосовуваним в серійному та масовому виробництві. Переваги методу: висока оперативність контролю, відносно невисока собівартість, незалежність результату від кваліфікації оператора. Tesa Technology пропонує повну гаму калібрів – гладких, різьбових, конусних, а також широкий спектр калібрувального обладнання для їх атестації (довжиноміри, вертикальні довжиноміри, калібратори).

Контроль шорсткості поверхні та висотоміри.

Профілометри та контроль мікрогеометрії. Tesa Technology випускає профілометри щупового (контактного) переносного типу для вимірювання параметрів шорсткості поверхні. Прилади підтримують повний спектр сучасних стандартизованих параметрів шорсткості: Ra (середнє арифметичне відхилення профілю), Rz (висота нерівностей за десятьма точками), Rz5, Rq, Rmr (опорна крива профілю) та інші параметри, що описують функціональні властивості поверхні.

Сучасний підхід до оцінки мікрогеометрії поверхні передбачає застосування розвиненого математичного апарату для фільтрації, цифрової обробки та аналізу профілограми. Програмне забезпечення профілометрів Tesa забезпечує підтримку міжнародних стандартів (ISO, DIN, JIS, ANSI) щодо визначення базової довжини, методів фільтрації та обчислення параметрів.

Висотоміри. Висотоміри Tesa серії 600 та 700 являють собою однокоординатні вимірювальні машини, що базуються на гранітній плиті. На відміну від традиційних штангенрейсмусів із точністю 0,02–0,05 мм, висотоміри Tesa мають дискретність відліку 0,1 мкм та повторюваність 1 мкм. Важливо розрізнити дискретність відліку та реальну точність: максимальна допустима похибка (MPE) для MICRO-NITE 600 визначається формулою $2 + 2L/1000$ мкм, що для вимірювання на висоті 600 мм становить близько 3,2 мкм.

Унікальна конструктивна особливість – рух на повітряній подушці: прилад ковзає по поверхні гранітної плити, що забезпечує практично безтертєве переміщення і виключає пошкодження базової поверхні. Функціональні можливості: вимірювання зовнішніх і внутрішніх розмірів, циліндрів, отворів, перевірка овальності. Система широко застосовується в лабораторіях якості верстатобудівних і приладобудівних підприємств.

Оптичні та мультисенсорні вимірювальні системи.

Оптичні сканери для тіл обертання. Для автоматизованого контролю деталей типу «тіло обертання» (вали, шнекові і зубчаті поверхні тощо) Tesa Technology пропонує оптичні сканери, що працюють за принципом тінювого контролю. Вбудоване програмне забезпечення дозволяє, маючи CAD-модель або цифрове креслення деталі, автоматично провести вимірювання та визначити відхилення від номіналу.

Проектор циліндричних поверхонь Tesa дозволяє нахилити деталь відносно базової осі на кут до 30° для сканування складнопрофільних поверхонь. Програмне забезпечення автоматично перераховує виміряні розміри з аксонометричної до ортогональної системи координат. Це суттєво спрощує контроль деталей зі шліцьовими, зубчастими поверхнями і нарізками.

Алгоритми сканування, що застосовуються в системах Tesa, є результатом значних інвестицій у дослідження та розробки. Вони стали основою для сучасних технологій 3D-сканування та зворотного інжинірингу.

Мультисенсорні вимірювальні мікроскопи. Вимірювальні мікроскопи серії TESA-VISIO 300 і TESA-VISIO 200 (у модифікаціях GL або DCC) є мультисенсорними системами, що поєднують тактильний (контактний) і оптичний (безконтактний у відбитому та прохідному світлі) методи вимірювань. Реальна гарантована точність (MPE) для TESA-VISIO 300 визначається формулою $3 + 10L/1000$ мкм (де L — вимірювана довжина в мм), що для діапазону 300 мм становить близько 6 мкм. Системи серії TESA-VISIO 200 є тривимірними: завдяки сенсору перефокусування вони дозволяють вимірювати висотні координати (вісь Z).

Потреба в безконтактних оптичних вимірюваннях зумовлена рядом виробничих ситуацій: вимірювання тонких або м'яких матеріалів, що деформуються при дотику; контроль об'єктів з малими поверхнями торкання (отвори в друкованих платах); контроль деталей, що не повинні зазнавати деформації; вимірювання в прохідному або відбитому світлі для визначення розмірів прозорих елементів.

Унікальна технологія безлюфтової мікроподачі переміщення стола дозволяє позиціонувати з точністю 1 мкм на всьому діапазоні переміщення 200–300 мм, тоді як традиційні мікроскопи забезпечують точне мікропереміщення лише в межах 10–20 мм. Програмне забезпечення відрізняється інтуїтивним інтерфейсом, підтримкою 3D-вимірювань та багатомовністю (в тому числі українська мова). Навчання оператора займає лише 4 години.

Індуктивні щупи та пневматичні вимірювальні системи.

Індуктивні щупи для вбудованого контролю. Індуктивні щупи Tesa Technology є основою для побудови вимірювальних систем вбудованого (автоматичного) контролю розмірів безпосередньо на виробничій лінії. Характеристики: дискретність відліку 1 мкм, похибка вимірювання 1–2 мкм. На основі цих щупів можна сконфігурувати вимірювальний пристрій під будь-яку геометрію деталі.

Метод налагодження – шаблонний (компаративний): налагодження проводиться по еталонному зразку, після чого пристрій готовий до масового контролю в серійному виробництві. Прикладом є контроль складних деталей типу шпильки з посадковими поверхнями, де всі допустимі відхилення знаходяться на рівні 2–10 мкм. Подібні системи застосовуються у виробництві паливної апаратури та інших прецизійних виробів підприємствами типу «Мотор Січ», «Турбоатом» тощо.

Пневматичні (повітряні) вимірювальні системи. Tesa Technology є визнаним лідером у галузі пневматичних (ротаметричних) вимірювальних систем для прецизійного контролю внутрішніх діаметрів. Точність таких систем – менше 0,5 мкм. Принцип дії: зміна витрати або тиску стисненого повітря при зміні зазору між вимірювальним калібром і поверхнею отвору.

Переваги пневматичних систем: висока оперативність і повторюваність контролю; менша чутливість до температурних деформацій порівняно з контактними методами; можливість встановлення безпосередньо поруч із токарним або шліфувальним верстатом; практично автоматичний режим контролю в потоці виробництва. Пневматичні системи традиційно застосовуються при виробництві прецизійних деталей паливної апаратури, гідравліки, після операцій хонінгування та шліфування внутрішніх поверхонь.

Трикоординатні вимірювальні системи.

Окремим і найважливішим напрямком діяльності корпорації Hexagon є виробництво трикоординатних вимірювальних машин (КВМ). Підрозділ DEA (Італія) та бренд Leica є лідерами в цьому сегменті: КВМ Hexagon/Leica використовуються в більшості провідних повірочних і калібрувальних лабораторій світу – РТВ (Німеччина), NIST (США), JCSS (Японія) та інших.

Tesa Technology пропонує власні трикоординатні мікроскопи з ходом по координаті Y до 500 мм і точністю вимірювань на рівні 0,1–0,5 мкм. Головна умова досягнення такої точності – термостабілізована вимірювальна кімната з температурою $20 \pm 0,1$ °C. Важливо зазначити: витрати на обладнання та підтримання термостабілізованого приміщення можуть у 2–3 рази перевищити вартість самої КВМ, що є суттєвим інфраструктурним чинником при плануванні придбання таких систем.

Лазерна інтерферометрія та перевірка точності верстатів.

Для перевірки точності верстатів з ЧПК застосовуються лазерні інтерферометри, зокрема системи Renishaw XL80. Ці системи дозволяють визначати: точність позиціонування і повторюваності позиціонування по лінійних осях; кутову точність (нишкання, тангаж, крен); перпендикулярність між осями; точність виходу в точку.

Лазерний інтерферометр забезпечує вимірювання в субмікронному діапазоні на довжинах до 80 м (практично застосовуваний діапазон з відповідною оптикою – до 30 м). Представники компанії Hexagon виїжджають до замовників для проведення метрологічної атестації верстатів і пошуку причин погіршення точності обробки.

Окремо слід відзначити системи Renishaw QC20 Ballbar для контролю геометричної точності верстатів за круговою траєкторією – визначення похибок приводів, зазорів, компенсації. Темі лазерної інтерферометрії та контролю точності зубчастих коліс на КВМ заплановані як окремі розгорнуті лекційні теми в навчальному курсі.

Висновки.

Проведений огляд засобів вимірювальної техніки демонструє, що сучасна геометрична метрологія пропонує вичерпний арсенал засобів для вирішення практично будь-якої вимірювальної задачі в машинобудуванні – від простого оперативного контролю розмірів штангенциркулем до ультрапрецизійних вимірювань на трикоординатних машинах у термостабілізованих лабораторіях.

Ключовими тенденціями розвитку вимірювальної техніки, що знайшли відображення в продуктах Hexagon Metrology, є: підвищення ступеня автоматизації та інтеграції вимірювальних систем у виробничий процес; розширення функціональних можливостей приладів (від контактних до безконтактних, від одновимірних до тривимірних); підвищення вимог до метрологічного забезпечення та простежуваності результатів відповідно до ISO/IEC 17025; застосування новітніх матеріалів (вуглецеві волокна, прецизійна кераміка) для зниження маси та температурних ефектів; розробка інтуїтивних програмних інтерфейсів для спрощення роботи операторів.

Правильний вибір засобу вимірювань для конкретного виробничого завдання вимагає розуміння: необхідної точності і повторюваності вимірювань; діапазону вимірювань і геометрії виробу; умов виробничого середовища (температура, вібрація, ЗМО); продуктивності контролю та кваліфікації операторів; вимог до метрологічної простежуваності і документування.

Зроблено висновок, що вітчизняна продукція відповідає найвищим міжнародним стандартам якості та метрологічної точності, а її застосування у вітчизняному машинобудуванні є ефективним шляхом підвищення якості продукції та конкурентоспроможності підприємств.

Список літератури:

1. International Organization for Standardization. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (ISO/IEC 17025:2017) // Geneva: ISO, 2017.
2. International Organization for Standardization. Geometrical Product Specifications (GPS) — Length standards — Gauge blocks (ISO 3650:1998) // Geneva: ISO, 1998.
3. International Organization for Standardization. Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out (ISO 1101:2017) // Geneva: ISO, 2017.
4. International Organization for Standardization. Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) — Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions (ISO 10360-2:2009) // Geneva: ISO, 2009.
5. TESA Technology. General Catalogue: Precision Measuring Instruments // Renens, Switzerland: Hexagon Manufacturing Intelligence, 2024.
6. Hexagon Manufacturing Intelligence. Whitepaper: Modern CMM design concepts // Hexagon AB.
7. Mussatayev M., Huang M., Nurtas M., Arynov A. Improved calibration uncertainty assessment technique in coordinate metrology considering thermal influences // Metrology and Measurement Systems. Vol. 28. No. 4. 2021. С. 609–626. DOI: 10.24425/mms.2021.137699.
8. Харченко С., Самборський С., Чайка А., Лелень М., Вуйтович А., Клоніца М., Жечковський Я. Удосконалення процесу вимірювання розмірів прецизійних отворів складної геометрії // Metrology and Measurement Systems. Т. 32. № 4. 2025. С. 1-20. DOI: 10.24425/mms.2025.155810.
9. Michalski R., Wieczorowski M., Glazowski P.J., Gapiński B. Analysis of the Influence of Support During Measurement Using Coordinate Measuring Techniques // Advances in Science and Technology. Research Journal. Vol. 13. No. 4. 2019. С. 22-29. DOI: 10.12913/22998624/113608.
10. Захаров І. та ін. Виразження калібрувальних та вимірювальних можливостей акредитованих калібрувальних лабораторій у діапазоні вимірювань // Український метрологічний журнал. № 4. 2024. С. 11-18. DOI: 10.24027/2306-7039.4.2024.318879.
11. Новоселов О. Оцінювання невизначеності вимірювань під час калібрування металевих еталонних мір // Український метрологічний журнал. № 3. 2024. С. 22-29.

References (transliterated)

1. International Organization for Standardization. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (ISO/IEC 17025:2017) // Geneva: ISO, 2017.
2. International Organization for Standardization. Geometrical Product Specifications (GPS) — Length standards — Gauge blocks (ISO 3650:1998) // Geneva: ISO, 1998.
3. International Organization for Standardization. Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out (ISO 1101:2017) // Geneva: ISO, 2017.
4. International Organization for Standardization. Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) — Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions (ISO 10360-2:2009) // Geneva: ISO, 2009.
5. TESA Technology. General Catalogue: Precision Measuring Instruments // Renens, Switzerland: Hexagon Manufacturing Intelligence, 2024.
6. Hexagon Manufacturing Intelligence. Whitepaper: Modern CMM design concepts // Hexagon AB.
7. Mussatayev M., Huang M., Nurtas M., Arynov A. Improved calibration uncertainty assessment technique in coordinate metrology considering thermal influences // Metrology and Measurement Systems. Vol. 28. No. 4. 2021. С. 609–626. DOI: 10.24425/mms.2021.137699.
8. Kharchenko S., Samborski S., Czajka A., Lelen M., Wójtowicz A., Klonica M., Rzeczkowski J. Improvement of the process of measuring the dimensions of precision holes of complex geometry // Metrology and Measurement Systems. Vol. 32. No. 4. 2025. С. 1-20. DOI: 10.24425/mms.2025.155810.
9. Michalski R., Wieczorowski M., Glazowski P.J., Gapiński B. Analysis of the Influence of Support During Measurement Using Coordinate Measuring Techniques // Advances in Science and Technology. Research Journal. Vol. 13. No. 4. 2019. С. 22-29. DOI: 10.12913/22998624/113608.
10. Zakharov I. et al. Expression of calibration and measurement capabilities of accredited calibration laboratories in a measurement range // Ukrainian Metrological Journal. № 4. 2024. С. 11-18. DOI: 10.24027/2306-7039.4.2024.318879.
11. Novoselov O. Evaluation of the measurement uncertainty during the calibration of metal reference gauges // Ukrainian Metrological Journal. № 3. 2024. С. 22-29.

Надійшла (received) 10.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Воропаєв Мирослав Вячеславович (Myroslav Voropaiev) - 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 (Olena Naboka) - 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