

УДК 621.9.08

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0608>**¹Микола Клименко**

кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри машин і обладнання технологічних процесів
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6166-8966>, e-mail: klymenko.mo@knuba.edu.ua

¹Гор Косминський

кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання технологічних процесів
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0234-7166>, e-mail: kosmyskiy.iv@knuba.edu.ua

¹Олександр Дьяченко

кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання технологічних процесів
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8199-2504>, e-mail: diachenko.os@knuba.edu.ua

¹Олексій Погребач,

аспірант кафедри машин та обладнання технологічних процесів
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8394-2805>, e-mail: pohrebach_ov-2022@knuba.edu.ua

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, просп. Повітряних сил, 31, 03037, м. Київ, Україна

ИНТЕГРАЦИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ТА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ У КОНЦЕПЦИЮ ЦИФРОВЫХ ДВУЙНИКОВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЛАДНАНИЯ

АНОТАЦІЯ. У роботі розроблено науково-методичні засади створення інтегрованого цифрового двійника технологічного обладнання на основі синергії метрологічного підтвердження та безперервної технічної діагностики. Запропонована трансформація статичних моделей у динамічні системи шляхом врахування фізико-механічних параметрів у реальному часі. Досліджено вплив вібраційного фону та динамічної жорсткості на параметри мікрогеометрії поверхні і геометричну точність обробки. Встановлено кореляцію між рівнем вібрації та виникненням дефектів, а також визначено частку впливу дисбалансу і автоколивань у загальному бюджеті похибки. Інтеграція запропонованих алгоритмів та вейвлет-аналізу архітектури стандарту ISO 23247 дозволяє реалізувати механізм «динамічного метрологічного підтвердження». Запропонований підхід забезпечує реалізацію стратегії Zero Defect Manufacturing та підвищення ресурсу технологічного обладнання через предиктивний сервіс за фактичним станом вузлів.

Ключові слова: стандартизація, цифрові двійники, технічні вимірювання, метрологія, технічна діагностика, контроль та забезпечення якості.

INTEGRATION OF METROLOGICAL CONFIRMATION AND TECHNICAL DIAGNOSTICS INTO THE DIGITAL TWIN CONCEPT TO ENSURE THE QUALITY OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

ABSTRACT. The paper develops the scientific and methodological foundations for creating an integrated digital twin of technological equipment based on the synergy of metrological confirmation and continuous technical diagnostics. The proposed transformation of static models into dynamic systems by incorporating physicochemical and mechanical parameters in real time. The impact of the vibration background and dynamic stiffness on surface microgeometry parameters and geometric machining accuracy has been investigated. A correlation between vibration levels and the occurrence of defects was established, and the influence shares of imbalance and self-excited oscillations in the total error budget were determined. The integration of the proposed algorithms and wavelet analysis into the ISO 23247 standard architecture enables the implementation of a "dynamic metrological confirmation" mechanism. The proposed approach ensures the implementation of the Zero Defect Manufacturing strategy and increases the service life of technological equipment through predictive maintenance based on the actual condition of the components.

Keywords: standardization, digital twins, technical measurements, metrology, technical diagnostics, quality control and assurance.

1. Постановка проблеми. Поточний етап розвитку технологічного обладнання

характеризується значною цифровізацією та переходом до концепції Industry 4.0, де ключовим елементом стають кіберфізичні системи. Разом з тим, забезпечення високої точності та експлуатаційної надійності складного технологічного обладнання залишається критичним викликом для механічної інженерії. Традиційні методи забезпечення якості, що ґрунтуються на періодичних метрологічних перевірках та регламентному обслуговуванні, дедалі частіше виявляються неефективними в умовах гнучкого автоматизованого виробництва. Вони не здатні адекватно враховувати динамічні чинники: термічні деформації вузлів, вібраційне зношування підшипникових опор та прогресуючу деградацію кінематичних ланцюгів у реальному часі.

Впровадження цифрових двійників (Digital Twins) відкриває принципово нові можливості для віртуального супроводу життєвого циклу машин. Однак більшість існуючих моделей фокусуються на інформаційному обміні, залишаючи поза увагою фундаментальні аспекти метрологічної простежуваності та фізичної природи відмов. Актуальність даного дослідження зумовлена гострою потребою у створенні методології, яка б інтегрувала результати технічної діагностики та метрологічного підтвердження безпосередньо у структуру цифрового двійника. Такий підхід дозволяє трансформувати «статичну» цифрову модель у «живу» динамічну систему, здатну прогнозувати відхилення параметрів точності ще до моменту появи браку. Це є критично важливим для реалізації стратегії Zero Defect Manufacturing (виробництво з нульовим дефектом) та підвищення ресурсу дороговартісного обладнання за рахунок предиктивного сервісу на основі фактичного технічного стану механічних вузлів.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій. Розвиток концепції «Індустрія 4.0» та її подальша еволюція в «Індустрію 5.0» змістили фокус досліджень у галузі машинобудування від статичного моделювання до створення динамічних кіберфізичних систем. Провідну роль у цьому процесі відіграє технологія цифрових двійників, яка дозволяє здійснювати безперервний моніторинг та прогнозування стану технологічного обладнання. Фундаментальним кроком у стандартизації цього напрямку стало впровадження серії міжнародних стандартів ISO 23247 Digital Twin framework for manufacturing [1], який визначає чотирирівневу архітектуру: рівень спостережуваних виробничих елементів, рівень збору даних та керування пристроями, рівень ядра цифрового двійника та користувацький рівень. Незважаючи на те, що цей стандарт забезпечує надійну базу для створення систем з довільних неоднорідних та розподілених компонентів даних, він залишається переважно інформаційно-орієнтованим набором готових шаблонів. Як зазначає переважна частина дослідників, до прикладу в роботах Huizhong Cao [2] та Shengjian Chen [3], стандарт успішно описує протоколи обміну даними, проте не дає чітких інструкцій щодо того, як інтегрувати фізико-механічні параметри (такі як жорсткість кінематичних ланцюгів, вібраційний вплив або термічний дрейф) у метрологічний контур двійника. У дослідженнях Huizhong Cao [2], присвячених точності верстатів з ЧПК в межах ISO 23247, базовим методом залишається використання матриць однорідних перетворень, де кожна ланка кінематичного ланцюга верстата описується матрицею, що враховує ідеальні переміщення та 6 компонентів похибок (3 лінійні та 3 кутові):

$$T_{actual} = T_{ideal} \cdot \prod_{i=1}^n \delta T_i(q_i),$$

де δT_i - матриця відхилень, що залежить від узагальненої координати q_i . Це дозволяє цифровому двійнику розраховувати об'ємну похибку в будь-якій точці робочого простору.

Критичним аспектом, який також залишається поза увагою більшості розробок, є метрологічна простежуваність цифрових моделей. Maculotti у своїй роботі [4] наголошує на тому, що без оцінки невизначеності результати моделювання цифрового двійника не можуть вважатися юридично значущими для сертифікації якості. Більшість існуючих рішень для цифрових двійників використовують «чисті» дані від сенсорів без урахування їхнього

метрологічного статусу (калібрування, дрейфу нуля тощо). Для забезпечення метрологічної простежуваності Maculotti використовує математичний апарат Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement та методи Монте-Карло. Оскільки в цифровому двійнику дані надходять динамічно, стандартні статичні оцінки замінюються на байєсівські мережі або адаптивні фільтри. Зокрема, для обчислення розширеної невизначеності U в реальному часі застосовується функція щільності ймовірності:

$$U_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i).$$

Цей метод дозволяє двійнику «розуміти», наскільки достовірними є дані з датчиків вібрації чи температури в конкретний момент часу.

Важливим кроком у вирішенні цієї проблеми слід вважати концепцію Digital Metrological Twin - цифрових метрологічних двійників, запроповану Німецьким національним інститутом метрології. Згідно з дослідженнями Brahim Ahmed Chekh [5], цифрові метрологічні двійники повинні включати не лише геометричну модель верстата, а і динамічний аспект невизначеності, що коригується на основі даних технічної діагностики. Це дозволяє реалізувати механізм «метрологічного підтвердження» безпосередньо в процесі експлуатації машини.

У статті [7] висвітлено роль інтеграції цифрових двійників з технологіями Інтернету речей (IoT) на прикладі Центральної системи метрології (CSM) у Польщі, яка забезпечує збір даних у реальному часі, моніторинг умов вимірювань та підтримку прийняття рішень. В роботі показано, що цифрові двійники вимірювальних систем та об'єктів вимірювань дозволяють підвищити ефективність планування вимірювальних стратегій, зокрема для координатно-вимірювальних машин та оптичних систем, шляхом віртуального моделювання процесів вимірювання. Автори описали підходи до створення геометричних цифрових двійників виробів для контролю якості поверхонь складної форми, а також розробку еталонів із відомою невизначеністю для калібрування засобів вимірювальної техніки. Слід зазначити, що в цій роботі чітко окреслено ключові виклики подальшого розвитку: забезпечення інтероперабельності, стандартизації, точності цифрових двійників та ефективного управління великими обсягами даних, а також зроблено висновок, що цифрові двійники стають невід'ємним інструментом сучасної метрології, сприяючи підвищенню точності, автоматизації та інформаційної цінності вимірювань.

В статті [8] Shamim M. являє собою систематичний огляд, присвячений інтеграції штучного інтелекту в системи прогнозованого технічного обслуговування та моніторингу стану обладнання. Авторами розглянуто застосування методів опорних векторів для автоматизованого виявлення дефектів, класифікації аномалій та прогнозування залишкового ресурсу на основі даних з вібраційних, акустичних, теплових та ультразвукових сенсорів. Shamim M. приділив увагу інтеграції ШІ з промисловим інтернетом речей (IoT), цифровими двійниками та хмарними платформами для створення масштабованих рішень і запропонував теоретичні засади, зокрема теорію надійності та концепцію прогнозування працездатності обладнання. Незважаючи на значні переваги, викликами залишаються, на думку автора, якість даних, інтерпретованість "чорних скриньок" моделей та складність інтеграції.

У роботі [9] Anaya, V., Alberti, E. та ін. детально розглядають концептуальну структуру цифрових двійників в контексті сучасного інтелектуального виробництва. Автори визначають цифровий двійник як динамічну цифрову репліку фізичного активу або процесу, що слугує фундаментальним інструментом для оптимізації прийняття управлінських рішень та підвищення загальної продуктивності промислових систем. Дослідження акцентує увагу на синергії технологій Інтернету речей (IoT), аналітичних платформ та методів машинного навчання, підкреслюючи їхню критичну роль у функціонуванні запропонованого фреймворку. Особлива наукова цінність роботи полягає в аналізі двосторонньої взаємодії цифрових двійників з алгоритмами штучного інтелекту, де імітаційне моделювання виступає

джерелом синтетичних даних для навчання нейронних мереж, дозволяючи нівелювати труднощі, пов'язані з конфіденційністю, складністю маркування та високою вартістю збору реальних експлуатаційних даних. Впровадження описаної архітектури забезпечує можливість предиктивної апробації виробничих альтернатив у безпечному віртуальному середовищі, мінімізуючи операційні витрати та сприяючи системній цифровій трансформації підприємств відповідно до вимог концепції Індустрії 4.0.

3. Метою роботи є розробка науково-методичних засад створення інтегрованого цифрового двійника технологічного обладнання, який базується на синергії методів метрологічного підтвердження та безперервної технічної діагностики через трансформацію статичних інформаційних моделей у динамічні системи шляхом врахування фізико-механічних параметрів у реальному часі.

4. Обговорення результатів досліджень. Концепція цифрових двійників (ЦД) - це динамічне відображення між фізичними об'єктами та симуляційними моделями, що включає фізичний та кібернетичний рівні системи. Ця система сприяє процесам розумного виробництва, забезпечуючи з'єднання, взаємодію, контроль та управління на виробничій ділянці. Однією з виразних переваг цифрових двійників є їхня здатність виявляти системні труднощі в складних системах, які часто спричинені людськими взаємодіями під час операцій. Крім того, впровадження ЦД дозволяє здійснювати кероване даними та розумне виробництво, закладаючи основу для майбутніх технологій Індустрії 4.0. Отже, концептуальне впровадження Індустрії 4.0 зумовило інтенсивну еволюцію технології цифрових двійників, що на сучасному етапі формує базис для переходу до стратегії Індустрії 5.0. Ключовими векторами цього розвитку є антропоцентризм, системна резильєнтність та екологічна сталість. Впровадження технологій цифрових двійників у виробничі цикли забезпечує високий рівень конвергенції між фізичними та кібернетичними системами, що дозволяє оптимізувати ефективність інтегрованих мереж у реальному часі. Проте актуальними науково-практичними викликами залишаються питання підвищення екологічної ефективності та поглибленої інтеграції цифрових двійників з архітектурами штучного інтелекту (AI) та віртуальної реальності (VR).

Функціональна роль цифрових двійників як віртуальних дериватів фізичних активів трансформувалася: від інструментів моніторингу та предиктивного обслуговування до засобів комплексної інтеграції кіберфізичних просторів. Відповідно до положень Європейської Комісії щодо розвитку Індустрії 5.0, спостерігається синергія цифрових двійників із технологіями розширеної реальності (XR) та інтелектуальними системами моніторингу сталого розвитку. Застосування імерсивних інтерфейсів у поєднанні з аналітичними моделями AI дозволяє реалізувати інтуїтивну взаємодію з цифровими аналогами, детермінуючи пріоритет людських цінностей у процесі прийняття рішень. Зокрема, використання цифрового моделювання людини у середовищі цифрових двійників уможливило проведення предиктивного ергономічного аналізу. Це сприяє верифікації робочих процесів, мінімізації фізичного та когнітивного навантаження на персонал шляхом симуляції та оптимізації кінематики рухів і поведінкових патернів працівників.

Для дослідження впливу нестаціонарних чинників на метрологічну надійність та якість продукції потрібно провести аналіз вібраційного фону та динамічної стабільності системи. Аналіз вібраційного фону та динамічної стабільності технологічної системи в контексті розробки цифрових двійників є фундаментальним аспектом забезпечення метрологічної надійності. У сучасній механічній інженерії вібрації розглядаються не просто як небажаний побічний ефект обробки, а як складний стохастичний процес, що безпосередньо модулює траєкторію формоутворення. На відміну від термічних деформацій, які мають яскраво виражену часову інерційність, вібраційні коливання спричиняють високочастотні зміщення виконавчих органів, що призводить до виникнення мікрогеометричних похибок, які неможливо скомпенсувати стандартними статичними корекціями системи.

Вібраційний фон будь-якого обладнання складається з вимушених коливань та автоколивань. Основні внутрішні джерела вимушених коливань - це дисбаланс, наприклад, шпинделя та робочого інструменту. При залишковому дисбалансі класу G2,5 (згідно з ISO 1940) на частотах обертання понад 1000 хв^{-1} амплітуда вібраційного зміщення може сягати 3-5 мкм, що критично для прецизійної обробки. Окрім дисбалансу, суттєвий внесок у вібраційний спектр вносять похибки кроку та пульсації моментів у серводвигунах, що генерують вібрації в діапазоні 50-400 Гц.

Зовнішні вібрації, що передаються через фундамент від іншого обладнання, зазвичай мають низьку частоту (10-50 Гц) та амплітуду до 1-2 мкм. Проте вони можуть входити в резонанс із власними частотами станини, що призводить до зростання амплітуди коливань на виконавчих органах у 3-5 разів.

Особливу небезпеку для метрологічного підтвердження становлять зовнішні вібрації, що передаються через цехову підлогу. Хоча їх амплітуда зазвичай не перевищує 1-1,5 мкм, вони характеризуються низькою частотою, яка часто збігається з власними частотами коливань станини верстата (10-35 Гц). Виникнення резонансних явищ у такій системі призводить до неконтрольованого зростання амплітуди коливань на виконавчих органах у декілька разів, що спричиняє хвилястість поверхні та порушення допусків на площинність і циліндричність. Для цифрового двійника це означає необхідність безперервного моніторингу віброшвидкості v_{rms} та спектральної густини потужності для ідентифікації зон нестабільності.

Статистичні дані свідчать про пряму кореляцію між інтегральним рівнем вібрації та якісними показниками продукції. При підвищенні віброшвидкості понад еталонні значення спостерігається нелінійне зростання параметрів шорсткості Ra та Rz. До прикладу, при нормальному рівні вібрацій (віброшвидкість $v_{\text{rms}} < 1,1 \text{ мм/с}$) шорсткість становить Ra 0,4-0,8 мкм. При зростанні вібрацій до рівня $v_{\text{rms}} = 4,5 \text{ мм/с}$ шорсткість збільшується до Ra 2,5-3,2 мкм. Так само вібрації з низькою частотою спричиняють хвилястість поверхні з кроком, рівним подачі на оберт, а амплітуда хвилястості може становити до 30–50% від загального допуску на розмір. Нижче наведено статистичну залежність параметрів якості від вібраційного стану обладнання, отриману в ході серії експериментальних досліджень.

Таблиця 1. Вплив рівня вібрації на параметри мікрогеометрії поверхні (сталь 40X)

Table 1. Influence of vibration level on surface microgeometry parameters (steel 40X)

Стан технологічної системи	Рівень вібрації v_{rms} , мм/с	Середня шорсткість Ra, мкм	Висота нерівностей Rz, мкм	Похибка розміру, мкм
Еталонний (прецизійний)	0,5 - 1,1	0,35 - 0,50	1,8 - 2,5	$\pm 2,0$
Допустимий робочий	1,2 - 2,8	0,80 - 1,25	4,5 - 6,2	$\pm 7,5$
Критичний (граничний)	2,9 - 4,5	1,60 - 2,50	8,5 - 12,0	$\pm 18,0$
Аварійний (резонанс)	> 4,5	> 4,50	> 22,0	> 45,0

Для інтеграції в цифровий двійник можна використати передавальну функцію, яка дозволяє в реальному часі розраховувати динамічну похибку:

$$\delta_{\text{dyn}}(t) = \int_0^{\infty} F(t - \tau) \cdot g(\tau) d\tau,$$

де $F(t)$ - миттєве значення сили різання, а $g(\tau)$ - імпульсна перехідна характеристика системи.

Динамічна жорсткість системи k_{dyn} є ключовим показником. Для сучасного обладнання вона становить приблизно 50-120 Н/мкм. При виникненні регенеративних автоколивань змушувальні сили можуть змінюватися з частотою, близькою до власної

частоти (1-3 кГц), що призводить до різкого погіршення таких показників, як шорсткість чи форма поверхонь оброблюваних деталей.

Динамічна жорсткість системи k_{dyn} визначає здатність верстата чинити опір виникненню автоколивань. При зниженні жорсткості через знос напрямних ковзання або ослаблення натягу в підшипниках шпинделя, амплітуда коливань зростає пропорційно зменшенню коефіцієнта демпфування. Це створює додаткову невизначеність у метрологічній моделі цифрового двійника. Статистичний розподіл часток різних джерел вібрацій у загальному бюджеті похибки наведено в таблиці 2.

Таблиця 2. Розподіл впливу джерел вібрацій на сумарну похибку обробки

Table 2. Distribution of the influence of vibration sources on the total processing error

Джерело вібраційного збурення	Діапазон частот (Гц)	Вплив на похибку (%)	Основний наслідок для якості
Дисбаланс	100 – 1500	45%	Радіальне биття, шорсткість
Автоколивання	800 – 4000	25%	Хвилястість, мікросколи інструменту
Похибки приводів	50 – 300	15%	Гранність, похибка кроку
Зовнішні завади (через фундамент)	5 – 50	10%	Порушення геометричної точності
Інші	10 – 200	5%	Випадкові викиди точності

Інтеграція цих даних у концепцію цифрового двійника дозволяє реалізувати механізм "динамічного метрологічного підтвердження". Використовуючи алгоритми швидкого перетворення Фур'є та вейвлет-аналізу, система технічної діагностики в режимі реального часу визначає залишковий ресурс механічних вузлів та прогнозує момент виходу параметрів точності за межі поля допуску. Таким чином, вібраційний моніторинг стає невід'ємною частиною сертифікації якості процесу обробки, дозволяючи перейти від пасивного контролю готової продукції до активного керування точністю в закритому циклі.

5. Висновки. За результатами проведеного дослідження щодо інтеграції метрологічного підтвердження та технічної діагностики в концепцію цифрових двійників можна зробити такі висновки:

- доведено, що сучасна концепція цифрових двійників повинна виходити за межі суто інформаційного обміну (згідно зі стандартом ISO 23247) і включати динамічні аспекти метрологічної простежуваності та фізичної природи відмов;
- підтверджено пряму кореляцію між рівнем вібраційного фону та параметрами мікрогеометрії поверхні;
- запропоновано використання передавальних функцій для розрахунку динамічної похибки $\delta_{dyn}(t)$ у реальному часі, що дозволяє реалізувати механізм «динамічного метрологічного підтвердження» та забезпечує активне керування точністю в закритому циклі.

впровадження розробленого підходу дозволяє перейти від регламентного обслуговування до предиктивного сервісу за фактичним технічним станом вузлів, що підвищує ресурс обладнання та гарантує вихідну якість продукції в умовах інтелектуального виробництва Industry 4.0.

Список використаних джерел:

1. ISO 23247-2. Automation systems and integration - Digital twin framework for manufacturing. Part 1: Overview and general principles. 2021-10. ISO/TC 184/SC 4.
2. Cao, H., Söderlund, H., Fang, Q., Chen, S., Erdal, L., Gubartalla, A., & Johansson, B. (2025). Towards AI-based Sustainable and XR-based human-centric manufacturing: Implementation of ISO 23247 for digital twins of production systems. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.14580>.
3. Chen, S., Ellwein, C., Klingel, L., Neumann, R., Zhang, J., Riedel, O., Wortmann, A. (2025). Digital twins for machine tools: a systematic mapping study. *Digital Twin*, 2(4). <https://doi.org/10.1080/27525783.2025.2538727>.
4. Maculotti, Giacomo. (2023). Towards traceable and trustworthy Digital Twins for quality control. ENBIS 2023 Conference Valencia 10-14 Settembre 2023.
5. Brahim Ahmed Chekh. (2025). Digital twin of robotic 3D scanning system: Providing metrological traceability. 2nd International Workshop on Metrology for Virtual Measuring Instruments (VirtMet2025).
6. Poniatowska M., Mazurkiewicz D., Sobiecki P. (2024). Digital Twin in Metrology: Opportunities, Current Implementations and Research Challenges. *Metrology & Hallmark*. 2024. No. 6. P. 1-13.
7. Bartłomiej Krawczyk, Piotr Szablewski, Bartosz Gapinski, Michał Wieczorowski, Rehan Khan. (2024). On-machine measurement as a factor affecting the sustainability of the machining process. *Sustainability*. 2024, 16, 2093. <https://doi.org/10.3390/su16052093>.

References:

1. 1. ISO 23247-2. Automation systems and integration - Digital twin framework for manufacturing. Part 1: Overview and general principles. 2021-10. ISO/TC 184/SC 4.
2. Cao, H., Söderlund, H., Fang, Q., Chen, S., Erdal, L., Gubartalla, A., & Johansson, B. (2025). Towards AI-based Sustainable and XR-based human-centric manufacturing: Implementation of ISO 23247 for digital twins of production systems. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.14580>.
3. Chen, S., Ellwein, C., Klingel, L., Neumann, R., Zhang, J., Riedel, O., Wortmann, A. (2025). Digital twins for machine tools: a systematic mapping study. *Digital Twin*, 2(4). <https://doi.org/10.1080/27525783.2025.2538727>.
4. Maculotti, Giacomo. (2023). Towards traceable and trustworthy Digital Twins for quality control. ENBIS 2023 Conference Valencia 10-14 Settembre 2023.
5. Brahim Ahmed Chekh. (2025). Digital twin of robotic 3D scanning system: Providing metrological traceability. 2nd International Workshop on Metrology for Virtual Measuring Instruments (VirtMet2025).
6. Poniatowska M., Mazurkiewicz D., Sobiecki P. (2024). Digital Twin in Metrology: Opportunities, Current Implementations and Research Challenges. *Metrology & Hallmark*. 2024. No. 6. P. 1-13.
7. Bartłomiej Krawczyk, Piotr Szablewski, Bartosz Gapinski, Michał Wieczorowski, Rehan Khan. (2024). On-machine measurement as a factor affecting the sustainability of the machining process. *Sustainability*. 2024, 16, 2093. <https://doi.org/10.3390/su16052093>.
8. Folea M. (2025). ISO GPS Changes-challenges for manufacturing industry. The 17th International Conference "STANDARDIZATION, PROTOTYPES AND QUALITY: A means of Balkan Countries' collaboration". 2025. P. 348-353. <https://doi.org/10.31926/RECENT.2025.77.348>.