

УДК 621.315.32:004.032.26

ІНТЕГРОВАНІ МЕТРОЛОГІЧНІ СИСТЕМИ В ІНДУСТРІЇ 4.0

У. П. Пановик, Р. В. Гідей, О. О. Богоніс

*Українська академія друкарства,
вул. Під Голоском, 19, Львів, 79020, Україна*

Досліджено вплив інтегрованих метрологічних систем у межах концепції Industry 4.0 на якість та оптимізацію виробництва. Розглянуто оновлення стандартів метрології та методів вимірювання, необхідних для відповідності новим вимогам інтелектуальних виробничих систем. Особливу увагу приділено ролі безперервного вимірювання в контексті Industry 4.0 та його потенціалу для прискорення та покращення виробництва. Дослідження також охоплює аналіз технологій, їхніх переваг, а також технічних, економічних та організаційних викликів, що виникають за умови впровадження метрологічних систем у інтелектуальні фабрики. Висвітлення цих аспектів допомагає краще зрозуміти важливість метрології в Industry 4.0 та надає практичні поради для успішного впровадження передових технологій на підприємствах.

Ключові слова: *Індустрія 4.0, розумне виробництво, Метрологія 4.0, інтегровані метрологічні системи, система контролю якості.*

Постановка проблеми. Сучасний промисловий сектор перебуває на порозі Четвертої промислової революції, відомої як Індустрія 4.0, що характеризується повсюдним використанням кіберфізичних систем, Інтернету речей (IoT), великих даних та штучного інтелекту. Ці технології мають на меті створення «розумних фабрик», де процеси автоматизовані, інтегровані та саморегульовані, що забезпечує високу продуктивність, гнучкість та якість виробництва. Однією з ключових складових Індустрії 4.0 є інтегровані метрологічні системи, які забезпечують точність вимірювань та контроль якості на всіх етапах виробничого процесу. Незважаючи на значний потенціал цих систем, існують численні виклики, пов'язані з їхнім впровадженням та ефективною експлуатацією. Традиційні метрологічні підходи часто не відповідають вимогам сучасного виробництва, що призводить до зниження точності, надійності та економічної ефективності.

Основними проблемами, що потребують вирішення, є технічні виклики, інтеграція різних типів вимірювальних приладів та датчиків у єдину систему, забезпечення сумісності між старими та новими технологіями, а також обробка великих обсягів даних у реальному часі. Крім того, питання безпеки даних стають усе більш актуальними, адже необхідно захищати вимірювальні дані від несанкціонованого доступу та кібератак, забезпечуючи конфіденційність та цілісність інформації. Управління змінами також являє собою значну складність, оскільки потрібно адаптувати наявні виробничі процеси до нових метрологічних систем, навчати

персонал та змінювати управлінську культуру для підтримки нових технологій. Нарешті, економічні аспекти містять високі початкові витрати на впровадження інтегрованих метрологічних систем, необхідність довгострокових інвестицій та оцінку економічної доцільності таких проєктів.

Розв'язання цих проблем є критично важливим для успішного переходу до Індустрії 4.0 і забезпечення конкурентоспроможності сучасних виробничих підприємств. Ця стаття присвячена аналізу інтегрованих метрологічних систем, їхній ролі в Індустрії 4.0, а також обговоренню основних викликів і можливостей, пов'язаних із їхнім впровадженням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасні дослідження засвідчують, що інтегровані метрологічні системи в Індустрії 4.0 відіграють ключову роль у підтримці точності, надійності та якості виробництва. Вони використовують такі сучасні технології, як датчики, автоматизовані вимірювальні пристрої та системи збирання даних у реальному часі. Майбутні тенденції передбачають розвиток таких інноваційних підходів, як штучний інтелект, машинне навчання та аналітика даних, для оптимізації роботи цих систем та підвищення ефективності виробництва.

За даними публікації [6], індустрія 4.0, розумне виробництво, стійкість та цифрові метрологічні рішення становлять головні напрямки розвитку метрології у 2024 році. Ці тренди спричиняють появу нових методів, таких, як Метрологія 4.0, інтегровані системи та хмарні послуги, що роблять метрологію більш доступною та ефективною. Вони відіграють важливу роль у забезпеченні якості та продуктивності у виробництві. А в статті [7] досліджуються нові можливості, що виникають завдяки інтеграції кіберфізичних систем та Інтернету речей у виробничу метрологію. Це дає можливість створювати більш інтелектуальні та гнучкі кіберфізичні метрологічні системи виробництва, які генерують великі обсяги даних для аналізу та покращення якості продукції та ефективності процесів. Водночас робота [8] описує кіберфізичну метрологію виробництва (CP2M), яка поєднує кіберфізичне виробництво з Інтернетом речей та хмарними технологіями. Це створює нове покоління інтелектуальних та гнучких систем метрології виробництва.

Стаття [9] зосереджується на метрологічних аспектах інспектування та вимірювання деталей у межах Industry 4.0. Автори роботи [2] описують використання датчиків та аналізу даних у виробництві та наголошують на перевагах і викликах розумного виробництва, таких, як великі обсяги даних та безпека. Публікація [3] розглядає виклики та можливості використання оптичної метрології в розумному виробництві та підкреслює важливість цифрової трансформації метрологічних послуг. Стаття [5] описує висхідну тенденцію диджиталізації в метрології. Автори статті стверджують, що віртуальна метрологія може бути потужним інструментом для оцінки якості продукції в межах Industry 4.0. Також автори роботи [4] стверджують, що система віртуальної метрології може бути потужним інструментом для покращення якості та ефективності виробництва.

У роботі [1] досліджується, як машинне бачення трансформує метрологію в контексті Індустрії 4.0. У дослідженні підкреслюються важливість високої точності,

швидкості та гнучкості, які надає машинне бачення, а також можливості збирання даних у режимі реального часу. Машинне бачення використовується для контролю якості, моніторингу стану обладнання, оптимізації виробничих процесів та розроблення нових продуктів. А в роботі [10] висвітлюються перешкоди, з якими стикається метрологія в епоху Industry 4.0, пов'язані з впровадженням нових сенсорних технологій. Дослідження розглядає потенціал революціонізації метрології за допомогою сенсорів IoT та мікросенсорів і підкреслює необхідність співпраці між дослідниками, розробниками та користувачами сенсорів для подолання цих викликів. Стаття [11] розглядає вплив Індустрії 4.0 на сферу вимірювань і підкреслює інтеграцію метрологічних систем з іншими системами Індустрії 4.0 та відкриття нових можливостей для покращення точності, ефективності та гнучкості вимірювань через аналіз великих обсягів даних.

Дослідження та публікації підтверджують економічну доцільність впровадження інтегрованих метрологічних систем у Індустрії 4.0. Вони допомагають зменшити витрати на виробництво, підвищити продуктивність праці, ефективність виробництва та якість продукції, а також зменшити відхилення та відходи. Проте для успішного впровадження цих систем необхідно подолати виклики технічного, організаційного та кібербезпечного характеру.

Мета статті – дослідження ролі інтегрованих метрологічних систем у контексті Індустрії 4.0, а також аналіз викликів та можливостей, пов'язаних із їхнім впровадженням у сучасне виробництво.

Виклад основного матеріалу дослідження. У контексті Четвертої промислової революції важливо розглядати взаємозв'язок між розвитком метрології та Індустрією 4.0. Сучасні метрологічні системи, забезпечуючи контроль якості, визначають кінцевий результат і повторюваність виробництва, що вирішально для всіх промислових сценаріїв. Контроль якості може вважатися драйвером розвитку Індустрії 4.0, що підтверджується зростанням безконтактних метрологічних рішень, які інтегруються в процеси Industry 4.0.

Метрологія вже не лише виявляє збої у виробництві, але стає важливим джерелом даних для «розумних фабрик» та середовища Індустрії 4.0. Забезпеченням ефективного виробництва виробникам стають інноваційні рішення Індустрії 4.0, які використовують цифрові технології для оптимізації процесів. Удосконалення та здешевлення цих технологій робить Індустрію 4.0 ще більш впливовою.

Концепція Індустрії 4.0 спонукає підприємства до цифрової трансформації для забезпечення економічно ефективного виробництва та підвищення конкурентоспроможності. Це передбачає інтеграцію фізичного, цифрового і віртуального середовищ для створення вартості. Розвиток інтелектуальних виробничих систем та передових інформаційних технологій важливий для успішного майбутнього виробництва. Використання великих даних має ключове значення для досягнення цілей Індустрії 4.0, даючи змогу оптимізувати виробничий процес для досягнення найвищої ефективності та нульового рівня відмов. Впровадження безконтактних систем метрології дає можливість збирати дані під час виготовлення деталей та аналізувати їх у режимі реального часу. Це покращує якість, кількість і швидкість

збирання даних, що сприяє негайному виявленню та вдосконаленню виробничих процесів.

Метрологічні рішення в контексті Індустрії 4.0 відіграють ключову роль у цифровому виробництві. Вони забезпечують обмін даними та контроль якості на всіх етапах виробництва, підтримуючи розвиток «розумних фабрик». Впровадження внутрішньовиробничих та безконтактних метрологічних систем дає змогу одержувати дані швидше й ефективніше, що є критичним для успішної роботи в Індустрії 4.0. Порівнюючи з традиційними методами, внутрішньовиробничі метрологічні рішення мають значні переваги, включно з швидкістю прийняття рішень та відсутністю необхідності в переміщенні деталей до відділу контролю якості. Це сприяє попередженню проблем ще до їхнього виникнення та зменшенню часу, необхідного для їхнього вирішення. Безконтактні метрологічні рішення інтегруються в концепцію Індустрії 4.0, охоплюючи більші обсяги та прискорюючи виробництво. Ці системи сприяють автоматизації виробництва та розвитку «розумних фабрик», що стає ключем до ефективного та інноваційного виробництва в майбутньому.

Індустрія 4.0, або «розумне виробництво», впроваджує інноваційні системи визначення місцеперебування людей і об'єктів, які оптимізують час та поліпшують взаємодію між працівниками та компаніями. Застосування таких технологій, як RFID і GPS, дає можливість легше відстежувати рух деталей і продукції. У світі Industry 4.0 фізичний та цифровий світи зливаються, створюючи інтелектуальні фабрики, які контролюються кіберфізичними системами через IoT (рис. 1). Ця інтеграція дає змогу збирати та обробляти великі обсяги даних для підвищення прозорості та ефективності виробничих процесів. Обумовлюється перехід від традиційного виробництва до інтелектуальних підприємств, де розумні технології, включно з сенсорами та метрологічними системами, використовуються для оптимізації виробничих процесів та досягнення максимальної клієнтської задоволеності.

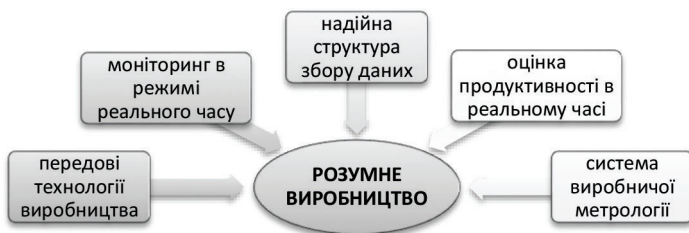


Рис. 1. Концепція «розумного виробництва»

У результаті революції в промисловості багато методів генерації та візуалізації даних переосмислюються для використання в реальному часі. Метрологія виявляється ключовою, оскільки вона постійно удосконалюється завдяки новим технікам та інноваціям у сенсорах, сприяючи підвищенню продуктивності та конкурентоспроможності в промисловості. Одним із новаторських напрямків є Metrology 4.0, що зумовлено Індустрією 4.0, яка революціонізує процес оцінювання точності параметрів у реальному часі. Застосування IoT відіграє важливу роль у поєднанні

систем оцінювання точності вимірювань, що стимулює розвиток новаторських підходів та рішень. Метрологія 4.0 допомагає підвищити продуктивність та конкурентоспроможність промисловості, сприяючи постійному контролю та аналізу процесів, та відкриває нові можливості для індустрій участі в Четвертій промисловій революції і розвитку інноваційних стратегій (рис. 2).

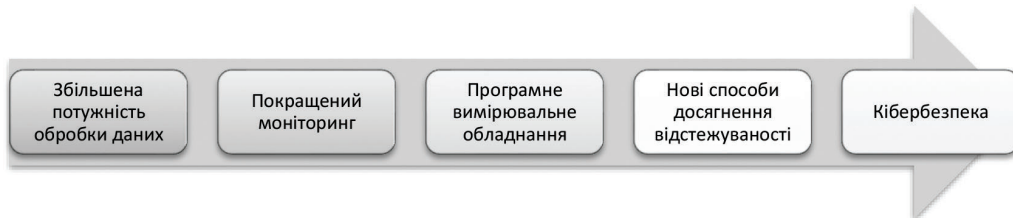


Рис. 2. Прогнозовані трансформації в Метрології 4.0

Дані, що генеруються в межах концепції «4.0», є повністю віртуалізованими. Це означає, що інформація збирається динамічно, спрощуючи процес прийняття рішень за допомогою великих даних. Дані зберігаються в хмарних обчисленнях, а доступ до них забезпечується через інтерфейс IoT та відповідні програми і протоколи. Для цього потрібна інтеграція програмного та апаратного забезпечення, включно зі зв'язком із сенсором для передання даних через мережі передання даних на короткі та довгі відстані, а також інтеграцією із серверами та базами даних.

Вимірювання під час виробництва, відоме як неперервне вимірювання, стає все популярнішим завдяки інтеграції автоматизованих вимірювальних технологій безпосередньо у виробничу лінію. Цей підхід надає зворотний зв'язок щодо якості продукції в реальному часі, не призупиняючи процес виробництва для перевірки. Порівнюючи з традиційними методами, неперервне вимірювання дозволяє ефективніше контролювати розміри продукції під час будь-якого процесу, оскільки вимірювання проводяться, коли продукція перебуває в русі, уникаючи помилок через зміщення або зміну позиції виробу. Крім того, неперервне вимірювання забезпечує зворотний зв'язок у реальному часі, дозволяючи оперативно вносити корективи в середовищі «розумного виробництва».

Старі методи вимірювання вже не відповідають вимогам «розумного виробництва» в епоху Industry 4.0. Натомість акцент зміщується на отримання більшої кількості інформації зворотного зв'язку, що є ключовим для забезпечення якості та ефективності виробництва. Використання комп'ютерів та електронних пристроїв прискорило цей процес, забезпечивши більш контрольований та точний процес за допомогою онлайн-зворотного зв'язку для керування.

Вимірювання може проводитися за допомогою різноманітних контактних або безконтактних датчиків, які дають змогу виробнику миттєво контролювати розміри продукції. Інтеграція вимірювальних систем із механізмом зворотного зв'язку допускає налаштувати виробничу лінію на випуск продукції відповідно до вимог якості, що є важливим аспектом у контексті «розумного виробництва».

Зазвичай системи неперервного вимірювання містять датчики та зонди, які безпосередньо інтегруються у виробничу лінію. Ці датчики постійно контролюють параметри продукції під час її проходження через вимірювальну станцію (рис. 3). Функція зворотного зв'язку визначається як функція вимірюваних параметрів. Отже, реакцію зворотного зв'язку можна виразити як функцію зазначених параметрів. Застосування системи вимірювання в процесі виробництва дозволить системі зворотного зв'язку оцінювати форму та розміри для визначення відповідності виробу стандартам.



Рис. 3. Схема вимірювання в процесі виробництва

Розумне виробництво Industry 4.0 характеризується автоматизованими, інтегрованими та взаємодійними системами. Воно реагує на зміни попиту в реальному часі за допомогою великих даних і пристосовує виробничі лінії під потреби клієнтів і управління колом постачання. Оскільки виробництво зазнає трансформації, вимірювання в Industry 4.0 мають бути надійними для отримання зворотного зв'язку. Інтегроване вимірювання вміщує технології контролю якості, які використовуються для прийняття рішень про якість продукції.

Система контролю якості ґрунтується на передових технологічних рішеннях, що використовують сучасні сенсорні та аналітичні системи. На початку процесу вбудовані у виробничу лінію сенсори зчитують дані про різні параметри якості продукції, такі, як розмір, форма, геометрія тощо. Ці дані потім передаються до центральної системи обробки даних, де вони проходять складний процес аналізу. У центральній системі дані перевіряються на відповідність встановленим стандартам якості за допомогою різноманітних алгоритмів, що базуються на штучному інтелекті, машинному навчанні та аналізі великих даних. Технології використовуються для виявлення навіть найменших аномалій або відхилень в якості продукції. Отримані результати аналізу відображаються у вигляді графіків, діаграм або спеціалізованих звітів, які можуть бути легко інтерпретовані операторами або інженерами. Це дає змогу оперативно реагувати на будь-які відхилення у якості продукції та приймати необхідні заходи для їхнього виправлення. За допомогою зворотного зв'язку, отриманого із системи виробництва, вимірювальні параметри відправляються на підсистему технології вимірювання для подальшого аналізу та вдосконалення процесів виробництва. Це створює ефективний зворотний зв'язок, який забезпечує надійний контроль якості та покращення ефективності виробництва (рис. 4).

Засоби вимірювання минулого базувалися на датчиках та виконавчих механізмах із фізичним контактом. Це передбачало контроль процесу в офлайн-режимі, який згодом було перенесено в режим неперервного вимірювання. Використання спеціалізованих процесів дозволило створити автоматизовану систему виявлення без втручання людини, що відповідає концепції Industry 4.0.

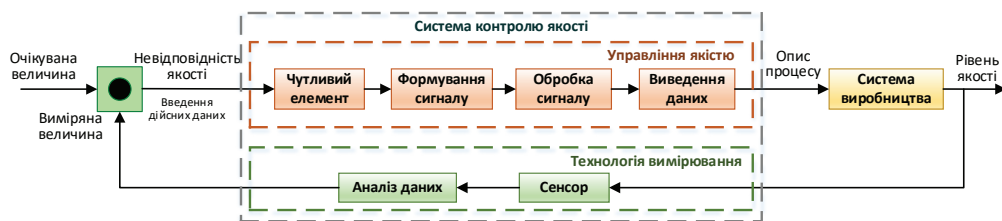


Рис. 4. Виробнича метрологія для контролю якості виробництва

Технологія інтегрованого вимірювання також використовує різноманітні типи датчиків (наприклад, адаптивні або наближення) та виконавчі механізми, переважно безконтактні. Контактні датчики, такі, як термічні датчики температури, оптичні датчики освітленості, механічні датчики тиску, п'єзоелектричні датчики зміщення, можуть бути надійними та довговічними, але із часом вони зношуються та не завжди підходять для інтегрованого використання через потрібний фізичний контакт з об'єктами. Натомість безконтактні датчики, такі, як інфрачервоні сенсори температури, ультразвукові сенсори відстані, радіочастотні ідентифікатори (RFID), магнітні датчики руху, камери відеоспостереження, є кращим рішенням через їхню здатність не впливати на роботу виробничої лінії. Однак вони можуть мати дещо тендітну конструкцію. Оскільки більшість виробників прагнуть автоматизувати процеси та метрологію контролю якості для більш ефективного та прибуткового виконання інспекційних завдань, датчики в «розумному виробництві» виконуватимуть запрограмовані завдання вимірювання.

Новітні технології також дають можливість вбудовувати в датчики штучний інтелект, який забезпечує їм здатність навчатися на основі отриманих даних та самостійно адаптуватися до змінних умов виробництва. Наприклад, датчики можуть виявляти аномальні показники, що можуть вказувати на несправність у виробничому процесі, та надсилати сповіщення адміністраторам або автоматично виконувати корективні дії. Однак для забезпечення автономного контролю та моніторингу в блок інтегрованого вимірювання необхідно завантажити великі обсяги даних, які містять інформацію про параметри виробництва, стан обладнання, та статистичні дані про виробничий процес. Такий підхід забезпечує постійний моніторинг ефективності та якості виробництва, що дає змогу вчасно виявляти та усувати потенційні проблеми.

Для забезпечення надійності процесів вимірювання системи контролю зворотного зв'язку з датчиками неперервного вимірювання автоматично компенсують будь-які відхилення розмірів та допусків. Ці відхилення можуть виникати внаслідок різних факторів, таких, як зношення обладнання, ексцентриситет швидкості обертання або коливання температури. У випадках, коли виникають такі ситуації, системи контролю проводять моніторинг виміряних значень у режимі реального часу. Вони постійно надсилають керуючі сигнали процесу вимірювання, щоб скоригувати виробничий процес до досягнення номінального розміру. Цей підхід допомагає мінімізувати кількість бракованих деталей та необхідне перероблення в

будь-якій галузі виробництва, що підкреслює важливість систем контролю в оптимізації виробничих процесів.

Метрологія 4.0 становить новий підхід до вимірювання та контролю якості у виробничих галузях. Використовуючи такі передові технології, як Інтернет речей (IoT), аналітика великих даних, штучний інтелект (AI), хмарні обчислення та автоматизація, вона підвищує точність, ефективність та надійність вимірювальних процесів.

Основні досягнення Metrology 4.0:

- Підключеність вимірювальних систем. Метрологія 4.0 наголошує на інтеграції вимірювальних пристроїв та систем із цифровими мережами. Це дає можливість збирати, аналізувати та обмінюватися даними в реальному часі для покращення моніторингу та контролю процесів вимірювання.
- Прийняття рішень на основі даних. Metrology 4.0 дозволяє збирати та обробляти великі обсяги вимірювальних даних з використанням удосконалених інструментів аналітики. Цей підхід дає змогу виробникам одержувати інформацію, виявляти закономірності та приймати обґрунтовані рішення для оптимізації процесів та підвищення якості продукції.
- Інтелектуальні метрологічні системи. Metrology 4.0 передбачає використання інтелектуальних вимірювальних систем, які можуть адаптуватися, калібруватися та виконувати автоматизовані вимірювання з використанням алгоритмів штучного інтелекту.
- Дистанційна та вбудована метрологія. Metrology 4.0 дозволяє проводити дистанційне та поточне вимірювання, коли вимірювальні пристрої інтегровані у виробничі лінії, що забезпечує безперервний моніторинг та зворотний зв'язок.
- Прогнозне технічне обслуговування. Metrology 4.0 полегшує прогнозування можливих збоїв або проблем калібрування за допомогою аналізу даних, що допомагає мінімізувати час простою та оптимізувати доступність вимірювальних систем.
- Відстеження та цифрові двійники. Metrology 4.0 забезпечує покращене відстеження даних вимірювань та може створювати віртуальні копії фізичних продуктів та процесів для моделювання та оптимізації.

Наприклад, у виробництві автомобілів компанія BMW використовує систему Metrology 4.0 для контролю якості кузовних деталей. За допомогою під'єднаних вимірювальних пристроїв і систем дані про розміри та якість кожної деталі збираються в реальному часі, що дозволяє негайно виявляти та усувати дефекти. У виробництві медичного обладнання компанія Siemens використовує інтелектуальні вимірювальні системи Metrology 4.0 для забезпечення точності та надійності вимірювань медичних пристроїв. Ці системи автоматично адаптуються та калібруються, забезпечуючи високу точність результатів. У виробництві електроніки компанія Intel використовує інтегровані системи для контролю якості та виявлення дефектів у мікрочіпах. За допомогою вбудованих метрологічних систем дані про якість та характеристики кожного мікрочіпа збираються під час виробництва, що дозволяє вчасно виявляти та усувати дефекти.

У сфері поліграфії такі фірми-виробники, як Heidelberg, Kodak, EFI, Canon, Xerox і Ricoh, використовують Metrology 4.0 для покращення точності та ефективності своїх виробничих процесів. Наприклад, Heidelberg та Kodak використовують інтегровані системи вимірювання для коригування параметрів друку в реальному часі на основі зібраних даних про якість та кольоровість друку. Такі компанії, як EFI, Canon, Xerox і Ricoh, також використовують Metrology 4.0 для моніторингу якості та кольоровості друку в реальному часі, щоб забезпечити високу якість продукції та ефективно керувати виробничими процесами.

Ці приклади засвідчують, як Metrology 4.0 сприяє покращенню вимірювальних процесів у різних галузях за допомогою передових технологій. Це призводить до збільшення продуктивності, зменшення кількості дефектів і забезпечення високої якості продукції завдяки передовим аналітичним інструментам. Впровадження інтелектуальних метрологічних систем у різних сферах промисловості сприяє досягненню високих стандартів якості, точності та ефективності виробництва. Metrology 4.0 також допомагає в постійному контролі якості, зменшенні кількості дефектів та підвищенні ефективності виробництва в різних галузях. Прогнозне технічне обслуговування, забезпечене аналізом даних і штучним інтелектом, сприяє уникненню простоїв, зменшенню витрат на технічне обслуговування та підвищенню загальної ефективності виробничих процесів у різних галузях промисловості.

Проте інтеграція новітніх метрологічних систем у Industry 4.0 для безперервного вимірювання та контролю якості виробництва стикається з рядом викликів і проблем:

1. Сумісність та інтеграція. Virізняється потреба в ефективній інтеграції сучасних метрологічних систем із наявними виробничими процесами та обладнанням. Системи мають бути сумісними з іншими пристроями та програмним забезпеченням, що використовується в Industry 4.0. Деякі метрологічні системи можуть мати складну архітектуру або вимагати високої експертизи для їхнього налагодження та інтеграції, що може стати викликом для підприємств.

2. Безпека даних і кіберзахист. Збільшення обсягу даних, які збираються та обробляються метрологічними системами, створює проблему забезпечення їхньої безпеки та захисту від кіберзагроз, несанкціонованого доступу та збереження конфіденційності.

3. Складність технологій. Деякі сучасні метрологічні системи можуть мати складну технологію, що вимагає високої кваліфікації персоналу для налагодження, експлуатації та обслуговування.

4. Стабільність та надійність. Вимога до безперервної роботи метрологічних систем для постійного вимірювання та контролю якості вимагає високої стабільності та надійності пристроїв.

5. Кваліфікація персоналу. Використання нових технологій вимагає відповідної кваліфікації персоналу, який здійснює моніторинг та управління інтелектуальними метрологічними системами.

6. Вартість та окупність інвестицій. Розглядаючи впровадження нових метрологічних систем, компанії також оцінюють їхню вартість і вигоди, а також час окупності інвестицій.

7. Стандартизація та взаємодія. Важливим є розроблення стандартів і протоколів для забезпечення сумісності та взаємодії між різними метрологічними системами та іншими пристроями виробничого середовища.

Для успішного вирішення цих проблем важливою є співпраця між виробниками, дослідниками, регуляторами та іншими зацікавленими сторонами, а це потребує нових досліджень та розроблень.

Висновки. Завдяки проведеним дослідженням стає зрозуміло, що метрологія 4.0 має численні переваги порівняно з традиційною метрологією, зокрема менше витрат на обслуговування, оскільки нова промислова модель вимагає більшої ефективності та розширення використання даних у реальному часі. Однак є деякі виклики, такі, як забезпечення безпеки зібраних даних, створення нових сенсорів та недостатня кількість компаній, які впроваджують концепції промислового 4.0 в Україні. Метрологія 4.0 змінює підходи до вимірювання та контролю та з часом стане все більшою реальністю для української промисловості, де великі та міжнародні компанії вже використовують ці технології для покращення своїх виробничих процесів. Це відкриває шлях до впровадження ефективних та економічних методів виробництва, що сприятиме розвитку української економіки та підвищенню її конкурентоспроможності на світовому ринку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Alonso V., Dacal-Nieto A. et al. Industry 4.0 implications in machine vision metrology: an overview. *Procedia Manufacturing*. 2019. 41. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.09.020.
2. Barbosa C. R. H., Sousa M. C., Almeida M. F. L., Calili R. F. Smart Manufacturing and Digitalization of Metrology: A Systematic Literature Review and a Research Agenda. *Sensors*. 2022. 22. 6114. URL: <https://doi.org/10.3390/s22166114>.
3. Catalucci S., Thompson A., Piano S. et al. Optical metrology for digital manufacturing: a review. *Int J Adv Manuf Technol*. 2022. 120. 4271–4290. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09084-5>.
4. Dong-Joon Lim, Sangjin Kim et al. Development of a virtual metrology system for smart manufacturing: A case study of spandex fiber production. *Computers in Industry*. 2023. 145. 03825. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103825>.
5. Dreyfus P. A., Psarommatis F., May G., Kiritsis D. Virtual metrology as an approach for product quality estimation in Industry 4.0: a systematic review and integrative conceptual framework. *International Journal of Production Research*. 2022. 60 (2). 742–765. URL: <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1976433>.
6. Industrial Metrology Trends 2024. Nordic metrology science. URL: <https://nordicmetrology.com/wp-content/uploads/2024/03/Industry-Metrology-Trends-2024-by-Nordic-Metrology-Science.pdf> (дата звернення 18.02.2024).
7. Majstorovic V. D., Durakbasa N., Takaya Y., Stojadinovic S. Advanced Manufacturing Metrology in Context of Industry 4.0 Model. 12th International Conference on Measurement and Quality Control- Cyber Physical Issue. 2019. 1-11. DOI:10.1007/978-3-030-18177-2_1.
8. Majstorovic V., Stojadinovic S. Cyber Physical Manufacturing Metrology. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 968. DOI:10.1088/1757-899X/968/1/012001.

9. Saif Y., Yusof Y. et al. Implementing circularity measurements in industry 4.0-based manufacturing metrology using MQTT protocol and Open CV: A case study. *PLoS One*. 2023. 18 (10): e0292814. doi: 10.1371/journal.pone.0292814.
10. Varshney A. et al. Challenges in Sensors Technology for Industry 4.0 for Futuristic Metrological Applications. *MAPAN*. 2021. 36. 215–226. DOI:10.1007/s12647-021-00453-1.
11. Wieczorowski M., Trojanowska J. Towards Metrology 4.0 in Dimensional Measurements. *Journal of Machine Engineering*. 2023. Vol. 23. No. 1. 100–113. DOI: <https://doi.org/10.36897/jme/161717>.

REFERENCES

1. Alonso, V., & Dacal-Nieto, A. et al. (2019). Industry 4.0 implications in machine vision metrology: an overview: *Procedia Manufacturing*, 41. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.09.020 (in English).
2. Barbosa, C. R. H., Sousa, M. C., Almeida, M. F. L., & Calili, R. F. (2022). Smart Manufacturing and Digitalization of Metrology: A Systematic Literature Review and a Research Agenda: *Sensors*, 22, 6114. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/s22166114> (in English).
3. Catalucci, S., Thompson, A., & Piano, S. et al. (2022). Optical metrology for digital manufacturing: a review: *Int J Adv Manuf Technol*, 120, 4271–4290. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09084-5> (in English).
4. Dong-Joon, Lim, & Sangjin, Kim et al. (2023). Development of a virtual metrology system for smart manufacturing: A case study of spandex fiber production: *Computers in Industry*, 145. 03825. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103825> (in English).
5. Dreyfus, P. A., Psarommatis, F., May, G., & Kiritsis, D. (2022). Virtual metrology as an approach for product quality estimation in Industry 4.0: a systematic review and integrative conceptual framework: *International Journal of Production Research*, 60 (2), 742–765. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1976433> (in English).
6. Industrial Metrology Trends 2024. Nordic metrology science. Retrieved from <https://nordicmetrology.com/wp-content/uploads/2024/03/Industry-Metrology-Trends-2024-by-Nordic-Metrology-Science.pdf> (дата звернення 18.02.2024) (in English).
7. Majstorovic, V. D., Durakbasa, N., Takaya, Y., & Stojadinovic, S. (2019). Advanced Manufacturing Metrology in Context of Industry 4.0 Model. 12th International Conference on Measurement and Quality Control- Cyber Physical Issue, 1-11. DOI: 10.1007/978-3-030-18177-2_1 (in English).
8. Majstorovic, V., & Stojadinovic, S. (2020). Cyber Physical Manufacturing Metrology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 968. DOI: 10.1088/1757-899X/968/1/012001 (in English).
9. Saif, Y., & Yusof, Y. et al. (2023). Implementing circularity measurements in industry 4.0-based manufacturing metrology using MQTT protocol and Open CV: A case study: *PLoS One*, 18 (10): e0292814. doi: 10.1371/journal.pone.0292814 (in English).
10. Varshney, A. et al. (2021). Challenges in Sensors Technology for Industry 4.0 for Futuristic Metrological Applications: *MAPAN*, 36, 215–226. DOI:10.1007/s12647-021-00453-1 (in English).

11. Wieczorowski, M., & Trojanowska, J. (2023). Towards Metrology 4.0 in Dimensional Measurements: Journal of Machine Engineering, 23, 1, 100–113. DOI: <https://doi.org/10.36897/jme/161717> (in English).

doi: 10.32403/1998-6912-2024-1-68-71-82

INTEGRATED METROLOGY SYSTEMS IN INDUSTRY 4.0

U. P. Panovyk, R. V. Hidei, O. O. Bohonis

*Ukrainian Academy of Printing,
19, Pid Holoskom St., Lviv, 79020, Ukraine
ulianapanovuk@gmail.com*

Industry 4.0 is a manufacturing concept that involves the hybridization of knowledge from all industry sectors to optimize and improve product quality. It replaces old models and production concepts, relying on new hypotheses, and is gradually being implemented in enterprises. Metrology standards, measurement methods, and equipment are also being updated in line with the intelligent concept of new production systems in Industry 4.0. Metrological methods and equipment are integrated with smart manufacturing production lines to increase production rates, reduce time, and ensure product quality from a metrological perspective.

As Industry 4.0 seeks to integrate big data into the production line for monitoring and controlling the production system, real-time continuous monitoring systems can help accelerate smart manufacturing. Measurement in the production process is a feedback control system for monitoring production data in real time using intelligent sensors and actuators. Since Industry 4.0 covers not only production but also various other aspects, the role of continuous measurement is often overlooked, although it is essential.

The article highlights the key aspects of integrated metrological systems, emphasizing the role of continuous measurement for smart manufacturing in Industry 4.0. Technologies are explored, and their advantages and potential impact on the efficiency of production processes are determined. Additionally, technical, economic, and organizational challenges that arise in the integration of metrological systems into future smart factories are outlined. This research helps better understand the importance of metrology in Industry 4.0 and provides practical advice for the successful implementation of advanced technologies in enterprises.

Keywords: *Industry 4.0, smart production, Metrology 4.0, integrated metrology systems, quality control system.*

Стаття надійшла до редакції 01.05.2024.

Received 01.05.2024.