

Highlights and challenges of the revolution in metrology

Blaski i cienie rewolucji w metrologii

MICHAŁ WIECZOROWSKI
BARTOSZ GAPIŃSKI
MICHAŁ JAKUBOWICZ*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2026.8-9.9>

The article presents the development of metrology from Metrology 4.0 to Metrology 5.0. Metrology 4.0 focuses on the digitalization and automation of measurement processes. It uses technologies such as laser scanning, computed tomography, robotics, and big data analysis. As a result, measurements are used not only for quality control but also for monitoring and improving production processes. However, the authors point out that some technologies, such as AR and VR, have developed more slowly than originally expected. Metrology 5.0 builds on these ideas but places greater emphasis on people, safety, and sustainability. Artificial intelligence, digital twins, and intelligent measurement systems are intended to support metrologists in data analysis and decision-making rather than replace them. The role of the metrologist is therefore also changing. In addition to measurement expertise, knowledge of data analysis, AI, programming, and cybersecurity is becoming increasingly important. The main development can be described as a transition from reliable measurements, through reliable data, to reliable decisions. Therefore, the authors consider Metrology 5.0 to be more of an evolution than a complete revolution.

KEYWORDS: Metrology 5.0, artificial intelligence, digital twins, measurement automation, data analysis.

Artykuł przedstawia rozwój metrologii od Metrologii 4.0 do 5.0. Metrologia 4.0 koncentruje się na cyfryzacji i automatyzacji pomiarów. Wykorzystuje m.in. skanowanie laserowe, tomografię komputerową, robotyzację oraz analizę dużych zbiorów danych. Dzięki temu pomiary służą już nie tylko kontroli jakości, ale również monitorowaniu i poprawianiu procesów produkcyjnych. Autorzy zaznaczają jednak, że nie wszystkie zapowiadane rozwiązania, np. szerokie wykorzystanie AR i VR, rozwinęły się tak szybko, jak przewidywano. Metrologia 5.0 jest rozwinięciem tej koncepcji, ale większą uwagę zwraca na człowieka, bezpieczeństwo i zrównoważony rozwój. Sztuczna inteligencja, cyfrowe bliźniaki i inteligentne systemy pomiarowe mają przede wszystkim wspierać metrologa w analizie danych i podejmowaniu decyzji, a nie całkowicie go zastępować. Zmieniają się więc także wymagania wobec metrologa, który oprócz wiedzy pomiarowej powinien znać analizę danych, AI, programowanie i cyberbezpieczeństwo. Najważniejszą zmianę można przedstawić jako przejście od wiarygodnych pomiarów, przez wiarygodne dane, do wiarygodnych

decyzji. Autorzy uznają więc Metrologię 5.0 bardziej za ewolucję niż całkowitą rewolucję.

SŁOWA KLUCZOWE: metrologia 5.0, sztuczna inteligencja, cyfrowe bliźniaki, automatyzacja pomiarów, analiza danych

Wprowadzenie

Metrologia należy do fundamentalnych dyscyplin nauk technicznych, stanowiąc podstawę rozwoju nauki, przemysłu i nowoczesnej gospodarki. Wiarygodne pomiary umożliwiają poznanie i opis zjawisk fizycznych, kontrolę procesów technologicznych oraz zapewnienie jakości i bezpieczeństwa wyrobów. Ich porównywalność na całym świecie gwarantuje rozwinięta infrastruktura metrologiczna oparta na zasadzie spójności pomiarowej. Wraz z rozwojem cyfryzacji, systemów cyberfizycznych i sztucznej inteligencji rola metrologii wykracza poza tradycyjne funkcje kontroli jakości. Staje się ona kluczowym elementem infrastruktury danych, zapewniając wiarygodne odwzorowanie świata rzeczywistego w systemach cyfrowych. Metrologia rozwija się w odpowiedzi na wyzwania gospodarki, tak było przy wszystkich poprzednich rewolucjach technologicznych aż do Przemysłu 4.0 [1], a obecnie dla Przemysłu 5.0 rozwija się koncepcja Metrologii 5.0, integrująca precyzyjne pomiary z inteligentnymi technologiami, ale cechująca się również podejściem zorientowanym na człowieka oraz zasadami zrównoważonego rozwoju. Współczesna metrologia jest nauką interdyscyplinarną, integrującą osiągnięcia nauk przyrodniczych, technicznych, informatyki, a także ekonomii, prawa, zarządzania i nauk społecznych. Wynika to z uniwersalnego charakteru pomiarów, które stanowią podstawę poznania, oceny i porównywania zjawisk w niemal każdej dziedzinie nauki i gospodarki. Rozwój technologii oraz analizy danych dodatkowo wzmacnia rolę metrologii jako spoiwa łączącego świat nauki, przemysłu i administracji. Jednocześnie jednolitość i wiarygodność pomiarów pozostają fundamentem bezpieczeństwa, uczciwego obrotu gospodarczego, ochrony zdrowia i środowiska oraz zaufania społecznego.

Koncepcja Przemysłu 4.0 na trwałe zmieniła sposób postrzegania produkcji, automatyzacji i wykorzysta-

* Prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski – michal.wieczorowski@put.poznan.pl, <https://orcid.org/0000-0001-7526-8368> – Wydział Inżynierii Mechanicznej, Politechnika Poznańska, Poznań, Polska
dr hab. inż. Bartosz Gapiński, prof. PP – bartosz.gapiński@put.poznan.pl, <https://orcid.org/0000-0003-0206-1942> – Wydział Inżynierii Mechanicznej, Politechnika Poznańska, Poznań, Polska
dr hab. inż. Michał Jakubowicz – michal.jakubowicz@put.poznan.pl, <https://orcid.org/0000-0002-6350-0411> – Wydział Inżynierii Mechanicznej, Politechnika Poznańska, Poznań, Polska

nia danych. Naturalną konsekwencją tych zmian było pojawienie się pojęcia Metrologii 4.0, czyli metrologii wykorzystującej technologie cyfrowe, komunikację sieciową oraz inteligentną analizę danych pomiarowych [2]. Pomiary przestały pełnić funkcję końcowej kontroli jakości – stały się jednym z podstawowych źródeł informacji o procesach produkcyjnych, umożliwiając ich bieżące monitorowanie, optymalizację i automatyczne podejmowanie decyzji. Szczególne znaczenie w tym procesie zyskała współrzędnościowa technika pomiarowa. W XXI wieku stała się ona podstawowym narzędziem oceny geometrii wyrobów praktycznie w każdej skali. W świecie mikro – i nanometrowym wykorzystywana jest do analizy struktury geometrycznej powierzchni [3], w skali makro służy do pomiarów wymiarów elementów [4], natomiast pomiędzy nimi znajduje się obszar mezoskali, obejmujący odchyłki kształtu oraz cechy przejściowe między wymiarami a nierównościami powierzchni [5]. Zarówno metody stykowe, jak i nowoczesne techniki optyczne pozwalają dziś w ciągu kilku sekund pozyskać miliony punktów pomiarowych. Tak ogromne zbiory danych znajdują zastosowanie nie tylko w kontroli jakości, ale także w inżynierii odwrotnej, cyfrowych bliźniakach, monitorowaniu procesów produkcyjnych i systemach wykorzystujących sztuczną inteligencję.

Rozwój tych technologii rodzi jednak nowe pytania. Czy dalszy postęp będzie polegał wyłącznie na zwiększaniu dokładności i szybkości pomiarów? Może równie ważne stanie się inteligentne wykorzystanie danych oraz lepsza współpraca człowieka z systemami pomiarowymi? To właśnie wokół tych zagadnień koncentruje się idea Metrologii 5.0, która rozwija założenia Metrologii 4.0, nadając im bardziej humanocentryczny i zrównoważony charakter.

Metrologia 4.0

Metrologia 4.0 rozwijała się i dalej rozwija jako pomiarowy odpowiednik Przemysłu 4.0. Jej podstawowym celem było włączenie systemów pomiarowych w cyfrowe i zautomatyzowane środowisko produkcyjne. Pomiar miał stać się integralną częścią procesu wytwarzania, dostarczającą informacji praktycznie w czasie rzeczywistym, co w wielu sytuacjach się udało (rys. 1). Jednym z najważniejszych kierunków rozwoju stały się bezstykowe techniki pomiarowe. Skanowanie światłem strukturalnym, wyparte przez dużo bardziej efektywne systemy laserowe, fotogrametria i wchodząca przebojem do działań inspekcyjnych i pomiarowych tomografia komputerowa umożliwiły szybkie pozyskiwanie przestrzennych danych o geometrii przedmiotów. Ta ostatnia technika umożliwia także obrazowanie powierzchni niedostępnych i struktur wewnętrznych. W skali mikro coraz większe znaczenie zyskują mikroskopia konfokalna, interferometria koherentna oraz mikroskopia różnicowania ogniskowego. Dzięki nim możliwe stało się tworzenie cyfrowych modeli powierzchni i obiektów obejmujących miliony punktów pomiarowych.

Równocześnie rozwijamy automatyzację i robotyzację pomiarów. Systemy pomiarowe coraz częściej po-

jawiają się bezpośrednio przy maszynach lub w liniach produkcyjnych, aby szybciej wykrywać niezgodności i korygować przebieg procesu. Roboty wyposażone w skanery i kamery mogą prowadzić kontrolę seryjną, automatycznie generować raporty oraz przekazywać wyniki do systemów zarządzania produkcją. Rozwijana jest też komputerowo wspomagana inspekcja, w której program pomiarowy tworzy się bezpośrednio na podstawie modelu CAD.

Ważną częścią Metrologii 4.0 stały się dane i ich pozyskiwanie. Coraz szybsze przyrządy generują ogromne zbiory informacji, których nie można już analizować wyłącznie tradycyjnymi metodami. Czujniki miały pojawić się prawie wszędzie, we wszystkich elementach maszyn i urządzeń, z których informacja w jakimkolwiek sposób może okazać się przydatna. To jednak dopiero się tworzy, pojawiają się na przykład rozwiązania z podzespołami komunikującymi się z systemem centralnym w głowicach zlokalizowanych w magazynie współrzędnościowej maszyny pomiarowej. Natomiast istniejące już duże zbiory danych, czyli Big Data, umożliwiają rozpoznawanie trendów, statystyczne sterowanie procesami, przewidywanie pogorszenia parametrów dokładnościowych systemów pomiarowych oraz planowanie ich konserwacji. Dane pomiarowe stają się więc nie tylko wynikiem kontroli, lecz także źródłem wiedzy o produkcie, procesie i stanie wyposażenia. Chociaż w tym zakresie mam wrażenie, że rozwój następuje wolniej, niż zakładano to kilkanaście lat temu. Planowano także szersze wykorzystanie rzeczywistości rozszerzonej i wirtualnej. AR miała prowadzić operatora podczas wykonywania pomiaru, wskazywać właściwe położenie przyrządu i prezentować wyniki bezpośrednio na obrazie rzeczywistego obiektu. To na razie przyszłość, a może nawet zaledwie ewentualność, w tym obszarze rozwój jest zdecydowanie wolniejszy niż zakładano. Podobnie zresztą jak w kwestii rzeczywistości wirtualnej. VR postrzegano jako narzędzie do szkolenia personelu, projektowania stanowisk i symulowania procedur pomiarowych. Ale jak się okazuje, coraz głębsze zanurzenie w środowisku wirtualnym może prowadzić do poczucia izolacji oraz ograniczenia bezpośrednich kontaktów międzyludzkich. Z tego względu wdrażanie takich rozwiązań postępuje obecnie wolniej, niż przewidywano jeszcze kilkanaście lat temu.

Najbardziej perspektywicznym kierunkiem rozwoju jest natomiast sztuczna inteligencja, chociaż i tu współpraca na linii człowiek–maszyna rozwija się wolniej. Zakładano, że będzie wspierała operatora w doborze metody, strategii i warunków pomiaru, w wyborze czujnika, parametrów skanowania, filtracji danych oraz sposobu oceny wyników. Miała również korzystać z modeli CAD, danych środowiskowych i baz wcześniejszych pomiarów, aby ograniczać ryzyko błędnych decyzji. To też jest jeszcze w sferze projektów, ale o rosnącym potencjale.

Jak widać z tego krótkiego podsumowania, nie wszystko w tej materii udało się wdrożyć, część z pomysłów aplikacyjnie rozwinęła się w bardzo małym stopniu. Na przykład w wielu miejscach spotykam się z przekonaniem, że indywidualizacja produkcji i moż-



Fig. 1. Operational principles of Metrology 4.0
Rys. 1. Założenia funkcjonowania Metrologii 4.0

liwość bardzo swobodnego wyboru przez odbiorcę końcowego kłóci się całkowicie z ideą produkcji masowej, powodując w efekcie wzrost kosztów, czyli coś, na czym poległaby każda rewolucja przemysłowa. Gdzieś ucichły szumne zapowiedzi, jak bardzo będzie można indywidualizować swój samochód i ile różnych dodatków (także estetycznych i wyróżniających) będzie można dołożyć. Wystarczy w tej materii przyjrzeć się ofertom pojazdów z Państwa Środka – prawie nie ma opcji interesujących pod względem ceny. Odsyłam też do lektury książki Schwaba [6], pisanej niecałe 10 lat temu i zachęcam do własnej analizy porównawczej tego, co przewidywał Autor, z tym, co faktycznie jest w obecnej rzeczywistości. Zaręczam Państwu, że jest to fascynująca i pouczająca analiza, ucząca pokory wobec dziejów. Niemniej jednak ten lekko pesymistyczny fragment nie powinien przysłonić całości bardzo rewolucyjnej zmiany, jaka wyraźnie następuje, dzięki rozwiązaniom IT, optyce i elektronice oraz postępującej robotyzacji zastępującej człowieka.

Metrologia 5.0

Poprzedni rozdział pokazuje, że spora część założeń jest jeszcze w fazie powstawania. A skoro tak, to czy dobrym pomysłem jest już ogłaszanie kolejnej, piątej rewolucji? Przyglądając się bliżej, można stwierdzić, że chociaż pojawia się 5.0, to nie jest to w pełni kolejny przełom, ale raczej rozwinięcie i uzupełnienie wcześniejszej koncepcji. Przemysł 5.0 pojawił się bowiem jako odpowiedź na ograniczenia Przemysłu 4.0 i jest jego uzupełnieniem. Tak jakby po pierwszych doświadczeniach z wprowadzania wersji czwartej zauważono, że czegoś w tym brakuje. Przemysł 5.0 narodził się bowiem z przekonania, że sama automatyzacja nie wystarczy – równie ważny stał się człowiek, odpo-

wiedzialne wykorzystanie technologii oraz zrównoważony rozwój.

Kolejne rewolucje przemysłowe stopniowo zmieniały rolę metrologii – od narzędzia kontroli jakości do elementu inteligentnych systemów produkcyjnych. W erze Przemysłu 4.0 systemy pomiarowe zostały zintegrowane z procesami wytwarzania, umożliwiając monitorowanie, analizę i korektę parametrów procesu w czasie rzeczywistym. Rozwój czujników, technik optycznych, tomografii komputerowej, współrzędnościowych systemów pomiarowych oraz technologii addytywnych sprawił, że pomiary stały się integralną częścią cyfrowego środowiska produkcyjnego [7]. Metrologia 5.0 rozwija tę koncepcję, zmieniając jednak jej główny cel – stawia człowieka w centrum systemu pomiarowego. Inteligentne technologie – sztuczna inteligencja, cyfrowe bliźniaki, Internet Rzeczy czy roboty współpracujące – mają wspierać operatora w podejmowaniu decyzji, a nie go zastępować [8]. Równocześnie coraz większego znaczenia nabierają transparentność algorytmów, odpowiedzialne wykorzystanie danych, bezpieczeństwo informacji oraz zrównoważony rozwój. Oznacza to zmianę paradygmatu: od metrologii dostarczającej dane do metrologii wspierającej decyzje. W ten sposób Metrologia 5.0 rozwija się równocześnie z koncepcją Przemysłu 5.0, adaptując jej główne założenia do świata pomiarów. Jeżeli więc Przemysł 5.0 redefiniuje sposób wytwarzania, to Metrologia 5.0 redefiniuje sposób pozyskiwania i wykorzystywania informacji pomiarowej. Metrologia 5.0 nie zmienia przy tym celu pomiaru – nadal jest nim wiarygodne poznanie rzeczywistości. Zmienia natomiast sposób wykorzystania wyników pomiarów, które stają się podstawą inteligentnych decyzji podejmowanych we współpracy człowieka i systemów cyfrowych (rys. 2).

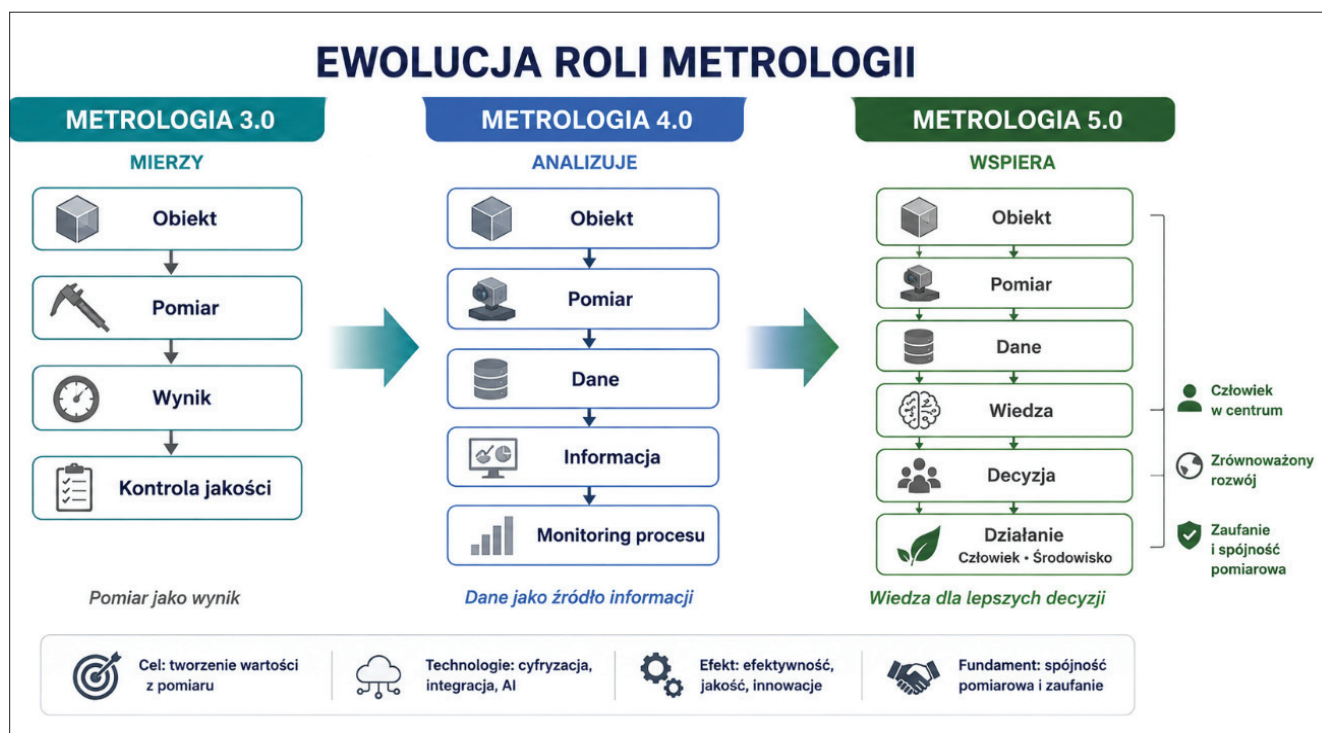


Fig. 2. Evolution of the role of metrology
Rys. 2. Ewolucja roli metrologii

Jak widać na rys. 2 Metrologia 3.0 (końcówka lat 60. XX w.) polegała na wiarygodnych pomiarach, Metrologia 4.0 skupiała się już bardziej na wiarygodnych danych, a Metrologia 5.0 to wiarygodne decyzje podejmowane na podstawie danych i zaufanie do tych decyzji. Właściwie to bardziej ewolucja niż rewolucja.

Metrologia 5.0 zmienia również profil kompetencyjny współczesnego metrologa. Samo wykonanie pomiaru coraz częściej przejmują zautomatyzowane systemy pomiarowe, jednak nie oznacza to marginalizacji roli człowieka. Wręcz przeciwnie – zgodnie z koncepcją human-in-the-loop to właśnie metrolog pozostaje odpowiedzialny za nadzór nad procesem, interpretację wyników oraz podejmowanie decyzji (rys. 3). Oprócz znajomości metod i technik pomiarowych musi on rozumieć sposób działania modeli matematycznych, algorytmów sztucznej inteligencji oraz systemów sterowania i wspomagania decyzji, które stają się integralnym elementem nowoczesnych systemów pomiarowych. Jego rola ewoluuje z operatora wykonującego pomiary w eksperta odpowiedzialnego za ocenę jakości danych, walidację modeli AI oraz weryfikację poprawności ich działania w rzeczywistych warunkach przemysłowych. Oznacza to konieczność zdobywania nowych kompetencji, obejmujących analizę danych, podstawy programowania, metody sztucznej inteligencji, nowoczesną statystykę oraz cyberbezpieczeństwo. To ostatnie nabiera szczególnego znaczenia, ponieważ manipulacja danymi pomiarowymi lub ich nieuprawniona modyfikacja mogą prowadzić do błędnych decyzji technologicznych, strat ekonomicznych, a w skrajnych przypadkach również do zagrożenia bezpieczeństwa ludzi i infrastruktury.

W gospodarce cyfrowej rola metrologii wykracza daleko poza sam proces pomiarowy. Jej zadaniem staje się zapewnienie wiarygodnych danych, które stanowią podstawę działania systemów automatyki, sztucznej inteligencji, modeli predykcyjnych oraz cyfrowych bliźniaków. Nawet najbardziej zaawansowane algorytmy nie są bowiem w stanie dostarczyć poprawnych wyników, jeśli wykorzystują dane pozbawione spójności metrologicznej lub obciążone nadmierną niepewnością. W tym sensie współczesna metrologia ewoluuje z nauki o dokładności pomiarów w naukę o zaufaniu do danych. Metrologia przyszłości nie będzie więc oceniana wyłącznie przez pryzmat dokładności pomiarów, lecz przede wszystkim przez zdolność dostarczania wiarygodnych danych wspierających autonomiczne systemy i świadome decyzje człowieka.

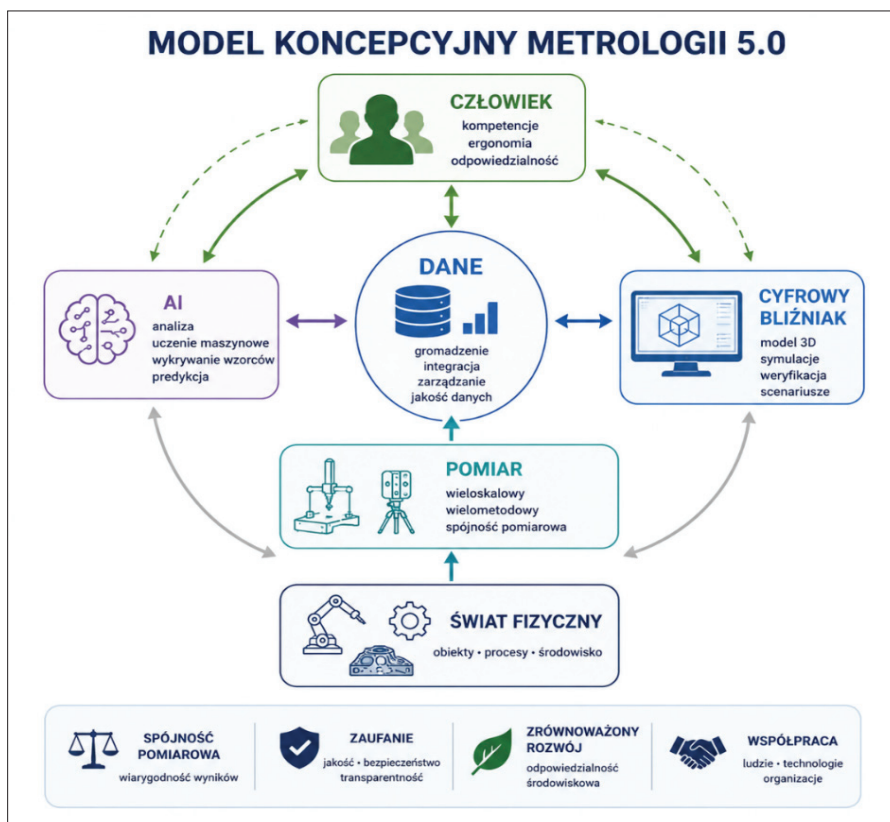


Fig. 3. Conceptual model of Metrology 5.0
Rys. 3. Model koncepcyjny Metrologii 5.0

Jeżeli wskazać jedną technologię, która w największym stopniu wpłynie na rozwój Metrologii 5.0, będzie nią sztuczna inteligencja. Szczególne znaczenie ma uczenie maszynowe, dzięki któremu systemy pomiarowe potrafią uczyć się na podstawie zgromadzonych danych, zamiast wykonywać wyłącznie wcześniej zaprogramowane instrukcje. Otwiera to drogę do automatycznego wykrywania anomalii, klasyfikacji błędów, przewidywania niepewności pomiarowej oraz inteligentnego doboru strategii pomiarowych. W przyszłości algorytmy AI będą nie tylko analizować wyniki, ale także na bieżąco dostosowywać przebieg pomiaru do zmieniających się warunków,

Coraz większą rolę w Metrologii 5.0 będą również odgrywać cyfrowe bliźniaki (*Digital Twins*) [9], (rys. 4). Są to wirtualne modele obiektów, urządzeń lub procesów pomiarowych, na bieżąco aktualizowane danymi pochodzącymi z czujników i systemów Internetu Rzeczy. Dzięki temu wiernie odzwierciedlają stan rzeczywistego systemu, umożliwiając jednocześnie jego analizę, symulację i optymalizację. W metrologii cyfrowe bliźniaki połączą pomiar, analizę danych i proces decyzyjny w jedną cyfrową pętlę jakości. Pozwolą przewidywać wpływ warunków środowiskowych i zużycia urządzeń na wyniki pomiarów, szacować niepewność, optymalizować strategie pomiarowe oraz testować je w środowisku wirtualnym jeszcze przed wykonaniem rzeczywistych pomiarów.

Wirtualna kalibracja i predykcja błędów pomiarowych pozwolą ograniczyć liczbę klasycznych kalibracji, skrócić przestoje oraz obniżyć koszty eksploatacji systemów pomiarowych. Integracja cyfrowych bliźniaków z systemami zarządzania produkcją umożliwi

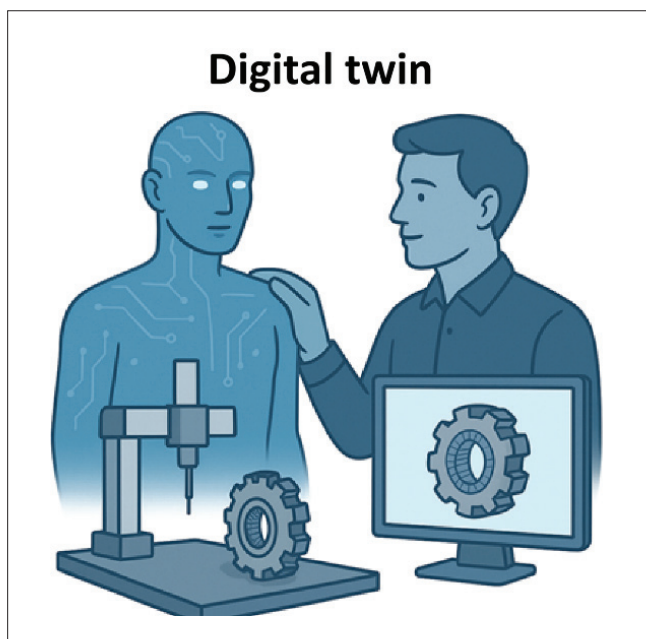


Fig. 4. Concept of the Digital Twin in Metrology 5.0
Rys. 4. Idea Cyfrowego Bliźniaka w Metrologii 5.0

natomiast ciągle monitorowanie jakości, analizę trendów oraz wspomaganie statystycznego sterowania procesami. Cyfrowy bliźniak staje się więc miejscem, w którym dane pomiarowe są przekształcane w wiedzę o stanie procesu i podstawę decyzji technologicznych.

Wyzwania stojące przed Metrologią 5.0 pokazują, że postęp technologiczny musi iść w parze z rozwojem metod pomiarowych, normalizacji oraz kompetencji przyszłych specjalistów. Jednym z naturalnych kierunków rozwoju będą laboratoria hybrydowe, łączące rzeczywiste pomiary z symulacjami prowadzonymi w środowisku cyfrowym, stopniowo przenoszone do środowiska przemysłowego. Równie istotna stanie się nowa generacja edukacji metrologicznej, łącząca klasyczną wiedzę inżynierską z analizą danych, sztuczną inteligencją, cyberbezpieczeństwem i zagadnieniami etycznymi. O powodzeniu Metrologii 5.0 zadecyduje zatem rozwój technologii, ale przede wszystkim zdolność do połączenia kompetencji metrologicznych, cyfrowych i etycznych w pracy przyszłych specjalistów, czyli przygotowanie ludzi, którzy będą potrafili świadomie i odpowiedzialnie wykorzystywać nowe technologie.

No dobrze, wyzwania wyzwaniami, a jak wygląda Metrologia 5.0 z punktu widzenia systemów pomiarowych? W samej metrologii można obecnie zauważyć więcej działań związanych z oprogramowaniem niż z samymi systemami. Na pewno w części jest to wynikiem stopniowego odchodzenia przemysłu motoryzacyjnego od silników spalinowych na rzecz dużo prostszych w konstrukcji i wytwarzaniu silników elektrycznych. Jeszcze kilka, kilkanaście lat temu przemysł motoryzacyjny napędzał wiele aspektów i obszarów metrologii – i nie tylko. Było to związane z silnikami spalinowymi, bardzo zaawansowanymi technologicznie. Z powodzeniem można stwierdzić, że rozwój znacznej części metrologii wymiarów geometrycznych spowodowany był właśnie wymogami

dokładnościowymi produkcji elementów pojazdów, zarówno związanych z napędem i jego przeniesieniem (choćby specyfika powierzchni po honowaniu plateau), jak i karoserią (rozwój technik skanowania optycznego). Natomiast pojazdy z napędem elektrycznym są o wiele prostsze i nie wymagają tak dużej liczby elementów o tak złożonym kształcie i wymaganiach dokładnościowych, co z kolei nie wymusza na producentach urządzeń pomiarowych poszukiwania nowych metod pomiarowych. Mniejsze wymagania przemysłu motoryzacyjnego powodują określone konsekwencje dla rozwoju systemów pomiarowych w tym zakresie. Nie do końca wiadomo, jak skończy się ta przemiana. Ciekawą opcją są też silniki wodorowe i to zwłaszcza ICE (internal combustion engines) oraz w ogólniejszym sensie szersze wykorzystanie wodoru w gospodarce. Poza tym postęp w elektronice i informatyce jest w ostatnich latach tak wyraźny, że grzechem byłoby nie skorzystać z tego w nauce o pomiarach, wszystko oczywiście z myślą o dobrostanie pracownika, który jednak musi mieć przełożenie także na efekt finansowy.

Przyjrzyjmy się teraz dwóm przykładom dobrze odzwierciedlającym dbanie o wygodę użytkownika. Pierwszy to skaner laserowy. Żeby nie trzeba było obserwować postępów skanowania na monitorze laptopa, w nowej wersji przyrządu – oprócz oczywiście lepszych parametrów i innych usprawnień – w samej konstrukcji wprowadzono wyświetlacz, na którym bez obracania głowy i odrywania wzroku od mierzonego przedmiotu można zobaczyć aktualny stan procesu (rys. 5).

W parze z większą wygodą i swobodą ruchów idzie szybkość zbierania danych związana właśnie z komfortem operatora, czyli klasyk w ujęciu Metrologii 5.0.

Jako drugi przykład można wskazać nową wersję optycznej współrzędnościowej maszyny pomiarowej Alicona μ CMM, czyli μ CMM NEO (rys. 6).

Jej konstruktorzy wyszli z założenia, że warto trochę zmienić tradycyjne podejście oparte na pojedynczych punktach (operator wybiera charakterystyczne miejsca i na tej podstawie ocenia zgodność z dokumentacją – wystarczające w przypadku prostych detali) na podejście pozwalające na łatwiejszą ocenę przedmiotów



Fig. 5. Creaform HandySCAN EVO laser scanner (left) and HandySCAN EVO MAX laser scanner (two images on the right), featuring a display integrated into the scanner head
Rys. 5. Skanery laserowe HandySCAN EVO (po lewej) i HandySCAN EVO MAX (dwa obrazy po prawej) firmy Creaform z wyświetlaczem w głowicy



Fig. 6. Alicona μ CMM NEO optical coordinate measuring machine
Rys. 6. Współrzędnościowa optyczna maszyna pomiarowa μ CMM NEO firmy Alicona

o złożonej geometrii, zawierających mikrootwory, powierzchnie swobodne czy strome przejścia. Dlatego zamiast pojedynczych punktów analizowana jest cała powierzchnia, umożliwiając przejście od surowych wartości współrzędnych do rzeczywistego zrozumienia funkcji komponentu. W jednym pomiarze możliwe jest określenie wymiaru, położenia, kształtu, a nawet chropowatości powierzchni, a do tego całość odbywa się w jednym układzie współrzędnych i bez konieczności repozycjonowania detalu. Nazywano to: surface-first metrology, odzwierciedlając fakt, że taka technologia pozwala nie tylko zobaczyć to, czy element mieści się w tolerancji, ale także wyciągnąć wnioski, dlaczego działa lub nie działa prawidłowo. To oznacza wsparcie decyzji metrologa i całego procesu produkcyjnego, które jest jednym z fundamentów Metrologii 5.0, i lepsze rozumienie jakości wyrobów.

Podsumowanie

Bez wiarygodnych pomiarów trudno mówić o nowoczesnym przemyśle. To dzięki nim można ocenić jakość gotowego wyrobu, ale również sterować produkcją, zapewniać bezpieczeństwo i rozwijać nowe technologie. Im bardziej procesy przemysłowe stają się zautomatyzowane i cyfrowe, tym większego znaczenia nabiera jakość informacji pochodzącej ze świata rzeczywistego. Metrologia staje się więc podstawą zaufania do danych przepływających przez cały łańcuch wartości – od badań i rozwoju po gotowy produkt.

Metrologia 5.0, będąca kolejnym etapem rozwoju nauki o pomiarach, wykracza poza dążenie do coraz

większej dokładności i automatyzacji. Jej istotą staje się dostarczanie wiarygodnej informacji pomiarowej, która pozwala człowiekowi podejmować trafne decyzje przy wsparciu inteligentnych systemów. Sztuczna inteligencja, cyfrowe bliźniaki czy Internet Rzeczy nie zastępują przy tym metrologa, lecz rozszerzają jego możliwości analityczne i wspomagają interpretację coraz większych zbiorów danych. Taka transformacja wymaga nie tylko rozwoju technologii, ale także nowych metod, standardów i kompetencji. Wiedza metrologiczna będzie coraz silniej łączyć się z analizą danych, sztuczną inteligencją i cyberbezpieczeństwem, a laboratoria pomiarowe będą stopniowo przekształcać się w centra wiedzy, analizy i wspomagania decyzji. W tych obszarach od kilku lat rozwijane są kompetencje metrologiczne w ramach NSMET – Narodowej Sieci Metrologii Współrzędnościowej, łączącej wiodące w metrologii polskie uczelnie tj. politechniki Krakowską, Poznańską, Świętokrzyską i Warszawską. Wpisanie NSMET na Polską Mapę Infrastruktury Badawczej pozwoliło utworzyć najnowocześniejsze w Europie laboratoria metrologiczne i stało się platformą do tworzenia nowych rozwiązań na potrzeby przemysłu oraz nauki wraz z zastosowaniem najnowszych technik cyfrowych [10].

Metrologia od zawsze budowała zaufanie do wyników pomiarów. W świecie cyfrowym zakres tego zaufania rozszerza się na dane, modele oraz podejmowane na ich podstawie decyzje. Metrologia 5.0 nie zmienia więc istoty pomiaru – zmienia jego miejsce i znaczenie w relacji między człowiekiem, technologią i otaczającym nas światem.

LITERATURA

- [1] Wieczorowski M., Pawlus P., Gapiński B.: *Perspektywy współczesnej metrologii*. Mechanik, 12, 2019, 767–773.
- [2] Eichstadt S., Keidel A., Tesch J.: *Metrology for the digital age*. Measurement: Sensors, 18, 2021, 100232, <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100232>
- [3] Pawlus P., Reizer R., Wieczorowski M., Krolczyk G.: *Material ratio curve as information on the state of surface topography – A review*. Precision Engineering, 65, 2020, 240–258.
- [4] Gapiński B., Wieczorowski M., Marciniak-Podsadna L., Dybala B., Ziolkowski G.: *Comparison of different method of measurement geometry using CMM, optical scanner and computed tomography 3D*. Procedia Engineering, 69, 2014, 255–262.
- [5] Gapiński B., Wieczorowski M.: *Measurement of diameter and roundness on incomplete outline of element with three-lobbing deviation*. Procedia Engineering, 69, 2014, 247–254.
- [6] Schwab K.: *Czwarta rewolucja przemysłowa*. Studio EMKA, 2018.
- [7] Grasso Toro F., Lehmann H.: *Brief overview of the future of metrology*. Measurement: Sensors, 18, 2021, 100306, <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100306>
- [8] Akundi A., Euresi D., Luna S., Ankobiah W., Lopes A., Edinbarough I.: *State of Industry 5.0 – analysis and identification of current research trends*. Applied System Innovation, 2022, 5, 27, <https://doi.org/10.3390/asi5010027>
- [9] Poniatowska M., Mazurkiewicz D., Sobecki P.: *Digital Twin in metrology: Opportunities, current implementations and research challenges*. Metrology & Hallmark, 6, 2024.
- [10] Wieczorowski M., Gapiński B., Gaska A., Śladek J., Woźniak A., Kowaluk T., Kujawińska M., Stępień K., Adamczak S.: *NSMET – Narodowa Sieć Metrologii Współrzędnościowej*. Stal Metale Nowe Technologie, 3–4, 2021, 52–61. ■