

Identyfikacja długofalowych potrzeb i kierunków działań strategicznych w zakresie polskiej metrologii oraz jej rozwoju

Redakcja

Magdalena Zawada-Michałowska

Jerzy Józwik



Identyfikacja długofalowych potrzeb i kierunków działań strategicznych w zakresie polskiej metrologii oraz jej rozwoju

Rada Naukowa Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej

Przewodnicząca:

Agnieszka RZEPKA

Dyrektor CINT:

Katarzyna WEINPER

Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej:

Magdalena CHOŁOJCZYK

Karolina FAMULSKA-CIESIELSKA

Jarosław GAJDA

Anna KOŁTUNOWSKA

Katarzyna PEŁKA-SMĘTEK

Anna STROJEK

Przedstawiciele Dyscyplin Naukowych Politechniki Lubelskiej:

Marzenna DUDZIŃSKA

Małgorzata FRANUS

Arkadiusz GOLA

Paweł KARCZMAREK

Beata KOWALSKA

Anna KUCZMASZEWSKA

Jarosław LATALSKI

Tomasz LIPECKI

Zbigniew ŁAGODOWSKI

Joanna PAWŁAT

Lucjan PAWŁOWSKI

Natalia PRZESMYCKA

Magdalena RZEMIENIAK

Mariusz ŚNIADKOWSKI

Przedstawiciele honorowi:

Zhihong CAO, Chiny

Miroslav GEJDOŠ, Słowacja

Karol HENSEL, Słowacja

Hrvoje KOZMAR, Chorwacja

Frantisek KRCMA, Czechy

Sergio Lujan MORA, Hiszpania

Dilbar MUKHAMEDOVA, Uzbekistan

Sirgii PAWŁOW, Ukraina

Natalia SAVINA, Ukraina

Natia SHENGELIA, Gruzja

Daniele ZULLI, Włochy

Identyfikacja długofalowych potrzeb i kierunków działań strategicznych w zakresie polskiej metrologii oraz jej rozwoju

Redakcja

Magdalena Zawada-Michałowska

Jerzy Józwik



WYDAWNICTWO
POLITECHNIKI
LUBELSKIEJ

Lublin 2024

RECENZENCI:

dr hab. inż. **Zbigniew Humienny**, prof. uczelni, Politechnika Warszawska

dr hab. inż. **Małgorzata Poniątkowska**, prof. PB, Politechnika Białostocka

REDAKTORZY:

dr inż. **Magdalena Zawada-Michałowska**, ORCID: 0000-0003-3330-6340

Politechnika Lubelska – ROR: <https://ror.org/024zjzd49>

dr hab. inż. **Jerzy Józwik**, prof. uczelni, ORCID: 0000-0002-8845-0764

Politechnika Lubelska – ROR: <https://ror.org/024zjzd49>

Konsultacje merytoryczne:

- w obszarze metrologii chemicznej – prof. dr hab. **Beata Godlewska-Żyłkiewicz**
(Uniwersytet w Białymstoku)
- w obszarze metrologii elektrycznej – dr hab. inż. **Wojciech Walendziuk**, prof. PB
(Politechnika Białostocka)



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Praca naukowa dofinansowana ze środków budżetu państwa w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą „Polska Metrologia”, nr projektu: PM/SP/0073/2021/1, kwota dofinansowania: 297 000,00 zł, całkowita wartość projektu: 297 000,00 zł. Tytuł projektu: Identyfikacja długofalowych potrzeb i kierunków działań strategicznych w zakresie polskiej metrologii oraz jej rozwoju.

Redaktor prowadzący: Karolina Famulska-Ciesielska

Korekta językowa: Małgorzata Stepuch

Skład i łamanie: Katarzyna Pelka-Smętek

Projekt graficzny serii: Łukasz Maj

Grafika na okładce i stronie przedtytułowej została opracowana przez M. Zawadę-Michałowską i E. Kosicką z wykorzystaniem AI i materiałów ze strony internetowej freepik.com

O ile nie wskazano inaczej, rysunki stanowią opracowanie własne autorów poszczególnych rozdziałów

Publikacja wydana za zgodą **Rrektora Politechniki Lubelskiej**

ISBN: 978-83-7947-616-9 (wersja drukowana)

ISBN: 978-83-7947-617-6 (wersja elektroniczna)

DOI: 10.35784/9788379476176

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
www.wpl.pollub.pl
ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin
tel. (81) 538-46-59



WYDAWNICTWO
POLITECHNIKI
LUBELSKIEJ

Książka udostępniona jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa – na tych samych warunkach 4.0 Międzynarodowe (CC BY-SA 4.0)

Nakład: 100 egz.

Spis treści

Wprowadzenie	11
Część pierwsza: Metrologia przemysłowa	
1. Określenie obszaru merytorycznego metrologii przemysłowej	23
2. Diagnoza stanu metrologii przemysłowej w Polsce	27
2.1. Funkcjonowanie klasycznego zakładu przemysłowego	27
2.2. Charakterystyka służb metrologicznych w zakładzie przemysłowym	31
2.3. Funkcjonowanie laboratoriów pomiarowych	42
2.4. Dział badawczo-rozwojowy	57
2.5. Usługi zewnętrzne o charakterze metrologicznym	61
2.6. Podstawowe problemy metrologii przemysłowej w Polsce	64
2.7. Podsumowanie diagnozy stanu metrologii przemysłowej w Polsce	68
3. Kierunki rozwoju metrologii przemysłowej	71
3.1. Wprowadzenie do przyszłości metrologii przemysłowej	71
3.2. Nowe systemy i rozwiązania pomiarowe	73
3.3. Automatyzacja i robotyzacja	75
3.4. Informatyzacja w metrologii	85
3.5. Zrównoważony rozwój	91
3.6. Człowiek w metrologii przyszłości	94
3.7. Podsumowanie kierunków rozwoju metrologii przemysłowej	96
4. Literatura	99
Część druga: Metrologia chemiczna	
1. Określenie obszaru merytorycznego metrologii chemicznej	107
1.1. Różnorodność w metrologii chemicznej	109
1.2. Definicja matrycy próbki	110
1.3. Charakterystyka pomiarów chemicznych	112
2. Diagnoza stanu metrologii chemicznej w Polsce	115
2.1. Podmioty zajmujące się metrologią chemiczną	115
2.2. Metodyka prowadzenia pomiarów wielkości chemicznych	119
2.3. Metody pomiarowe stosowane w pomiarach wielkości chemicznych	124
2.4. Kadra metrologiczna	126
2.5. Identyfikacja problemów i potrzeb	127
3. Kierunki rozwoju metrologii chemicznej	129
3.1. Wprowadzenie	129
3.2. Kierunki rozwoju metrologii chemicznej	130
3.2.1. Przemysł (zaawansowana produkcja)	131
3.2.2. Energia	133
3.2.3. Środowisko	134

3.2.4. Zdrowie	135
3.2.5. Bezpieczeństwo i dobrobyt	135
3.3. Podsumowanie kierunków rozwoju metrologii chemicznej	136
4. Literatura	137

Część trzecia: Metrologia elektryczna

1. Określenie obszaru merytorycznego metrologii elektrycznej	141
2. Diagnoza stanu metrologii elektrycznej w Polsce	143
2.1. Charakterystyka akademickich ośrodków metrologicznych	143
2.1.1. Opis materiału badawczego	143
2.1.2. Tematyka prac badawczych prowadzonych w obszarze metrologii w krajowych ośrodkach metrologicznych	146
2.1.3. Informacja dotycząca liczności zespołów badawczych oraz liczby doktorantów, w tym wdrożeniowych zaangażowanych w prowadzenie badań w obszarze metrologii elektrycznej	158
2.1.4. Najważniejsze osiągnięcia będące wynikiem badań prowadzonych w zakresie metrologii elektrycznej	159
2.1.5. Unikalna aparatura będąca na wyposażeniu zespołów badawczych	163
2.1.6. Plany/perspektywa naukowa badań w obszarze metrologii	170
2.1.7. Główne czynniki wskazane jako przeszkody ograniczające rozwój badań w obszarze metrologii	175
2.2. Charakterystyka przemysłowych ośrodków prowadzących badania i prace rozwojowe w zakresie metrologii elektrycznej	180
2.3. Podsumowanie diagnozy stanu metrologii elektrycznej w Polsce	182
3. Kierunki rozwoju metrologii elektrycznej	187
3.1. Wprowadzenie	187
3.2. Perspektywy rozwoju metrologii elektrycznej w powiązaniu ze strategicznymi kierunkami rozwoju społeczeństw: Europejski Zielony Ład, transformacja cyfrowa, opieka zdrowotna, bezpieczeństwo cyfrowe	189
3.3. Perspektywy rozwoju czujników pomiarowych	196
3.4. Transport i mobilność	202
3.4.1. Systemy dynamicznego ważenia pojazdów (WIM)	203
3.4.2. Zarządzanie ruchem drogowym	210
3.5. Elektroenergetyka	212
3.6. Opinie przedstawicieli ankietowanych ośrodków metrologicznych w Polsce	222
3.7. Podsumowanie kierunków rozwoju metrologii elektrycznej	227
4. Literatura	231

Część czwarta: Metrologia fizyczna

1. Określenie obszaru merytorycznego metrologii fizycznej	237
2. Diagnoza stanu metrologii fizycznej w Polsce	241
2.1. Podmioty zajmujące się metrologią fizyczną	241
2.2. Zasoby techniczno-aparaturowe	251

2.3. Kadra metrologiczna, kompetencje metrologiczne i struktura zatrudnienia w obszarze metrologii fizycznej	252
2.4. Identyfikacja problemów i potrzeb	254
3. Kierunki rozwoju metrologii fizycznej	255
3.1. Przemysł i zaawansowana produkcja	255
3.2. Robotyzacja i automatyzacja procesów pomiarowych	258
3.3. Energia	260
3.3.1. Przejście ze źródeł klasycznych na źródła odnawialne	260
3.3.2. Inteligentne sieci elektroenergetyczne	262
3.4. Środowisko	263
3.4.1. Obserwacja zmian klimatu	263
3.4.2. Monitorowanie zanieczyszczeń powietrza, wody i gleby	264
3.5. Zdrowie	266
3.5.1. Ochrona przed promieniowaniem, diagnostyka, radioterapia	266
3.5.2. Bezpieczna i zdrowa żywność	267
3.6. Transport i logistyka	268
3.6.1. Automatyzacja procesów transportowych i logistycznych	268
3.6.2. Nowe technologie i inteligentne systemy transportowe	270
3.7. Transformacja cyfrowa	272
3.7.1. Przetwarzanie danych w chmurze i <i>Big Data</i>	272
3.7.2. Sztuczna inteligencja (AI) i uczenie maszynowe (ML)	273
3.8. Podsumowanie kierunków rozwoju metrologii fizycznej	274
4. Literatura	277

Część piąta: Metrologia medyczna

1. Określenie obszaru merytorycznego metrologii medycznej	283
2. Diagnoza stanu metrologii medycznej w Polsce	287
2.1. Podmioty zajmujące się metrologią medyczną	287
2.1.1. Podmioty zajmujące się metrologią medyczną w zakresie wykorzystania promieniowania jonizującego w procedurach medycznych	287
2.1.2. Metrologia medyczna w metodach nieradiologicznych (wybrane zagadnienia)	292
2.2. Zasoby techniczno-aparaturowe	295
2.3. Identyfikacja problemów i potrzeb	296
3. Kierunki rozwoju metrologii medycznej	301
4. Literatura	307

Część szósta: Metrologia optyczna

1. Określenie obszaru merytorycznego metrologii optycznej	313
2. Diagnoza stanu metrologii optycznej w Polsce	321
2.1. Charakterystyka ośrodków akademickich i instytutów badawczych zajmujących się metrologią optyczną	321

2.1.1. Metrologia optyczna elementów i systemów optycznych	323
2.1.2. Metrologia optyczna obiektów o powierzchniach rozpraszająco-odbijających i rozpraszających, w tym klasyczne systemy widzenia maszynowego	325
2.1.3. Metrologia optyczna w mechanice eksperymentalnej i inżynierii materiałowej	327
2.1.4. Metrologia optyczna w mikro- i nanotechnologii oraz w mikroskopowych pomiarach biomedycznych	332
2.2. Charakterystyka wyposażenia w optyczne systemy pomiarowe przemysłowych laboratoriów metrologicznych, przemysłu i innych użytkowników	336
2.2.1. Optyczne systemy pomiarowe elementów i systemów optycznych	337
2.2.2. Optyczne systemy pomiarowe obiektów o powierzchniach rozpraszająco-odbijających i rozpraszających	337
2.2.3. Optyczne systemy pomiarowe w mechanice eksperymentalnej i inżynierii materiałowej	339
2.2.4. Wyposażenie w optyczne systemy pomiarowe dla mikro- i nanotechnologii	340
2.2.5. Ogólnopolskie i międzynarodowe inicjatywy aparaturowe i organizacyjne z zakresu metrologii optycznej	342
2.3. Podsumowanie diagnozy stanu metrologii optycznej	345
3. Kierunki rozwoju metrologii optycznej	347
3.1. Wprowadzenie	347
3.2. Współczesne światowe trendy rozwojowe metrologii optycznej	349
3.3. Kierunki rozwoju metrologii optycznej w Polsce	352
3.3.1. Przemysł (zaawansowana produkcja)	353
3.3.2. Energia: przejście ze źródeł klasycznych na źródła odnawialne	359
3.3.3. Zdrowie i rolnictwo	362
3.3.4. Bezpieczeństwo, obronność i technologie kosmiczne	365
3.3.5. Transformacja cyfrowa	367
3.4. Podsumowanie kierunków rozwoju metrologii optycznej	369
4. Literatura	371

Część siódma: Metrologia wielkości geometrycznych

1. Określenie obszaru merytorycznego metrologii wielkości geometrycznych	381
2. Diagnoza stanu metrologii wielkości geometrycznych w Polsce	383
2.1. Wzorce państwowe w metrologii wielkości geometrycznych	383
2.2. Charakterystyka stanu metrologii wielkości geometrycznych w zależności od rodzaju i skali wielkości mierzonej	384
2.2.1. Pomiary długości (wymiarów)	386
2.2.2. Pomiary kąta	387
2.2.3. Pomiary odchyłek kształtu	388
2.2.4. Pomiary tekstury i chropowatości powierzchni	389
2.2.5. Pomiary wad struktury geometrycznej materiału	391

2.2.6. Pomiary w skali makro	392
2.2.7. Nanometrologia	395
2.3. Integracja pomiarów wielkości geometrycznych z procesem wytwórczym	396
2.4. Podmioty zajmujące się naukowo metrologią wielkości geometrycznych	397
2.4.1. Główne obszary prowadzonych prac naukowych	397
2.4.2. Syntetyczna informacja o infrastrukturze badawczej	400
2.4.3. Syntetyczna informacja o realizowanych projektach	402
3. Kierunki rozwoju metrologii wielkości geometrycznych	403
3.1. Przemysł (zaawansowana produkcja)	404
3.1.1. Metrologia dużych objętości	404
3.1.2. Nanometrologia	406
3.1.3. Tomografia do zastosowań inżynierskich	408
3.1.4. Robotyka i automatyzacja procesów pomiarowych	409
3.2. Energetyka i ochrona środowiska	412
3.3. Zdrowie	413
3.4. Transformacja cyfrowa	415
3.4.1. Sztuczna inteligencja (AI) i uczenie maszynowe (ML)	415
3.4.2. <i>Big Data</i>	416
3.5. Bezpieczeństwo i dobrobyt	418
3.5.1. Krajowe, europejskie i światowe regulacje prawne	418
3.5.2. Kontrola i ocena zgodności podlegających regulacjom prawnym wytworów i czynności	419
3.6. Podsumowanie kierunków rozwoju metrologii wielkości geometrycznych	420
4. Literatura	423

Część ósma: Metrologia współrzędnościowa

1. Określenie obszaru merytorycznego metrologii współrzędnościowej	427
1.1. Obszar naukowy, badawczy oraz techniczny metrologii współrzędnościowej	429
1.2. Dokładność systemów i pomiarów współrzędnościowych	430
2. Diagnoza stanu metrologii współrzędnościowej w Polsce	437
2.1. Krajowe ośrodki badawcze – ich dorobek naukowy i wyposażenie techniczne	437
2.1.1. Tematy prac naukowych, w tym doktorskich i habilitacyjnych, książki naukowe	439
2.1.2. Projekty naukowo-badawcze (krajowe/międzynarodowe)	446
2.1.3. Charakterystyka wyposażenia w systemy współrzędnościowe w kluczowych ośrodkach naukowych i badawczych	453
2.2. Laboratoria badawcze i wzorcujące	456
2.3. Normalizacja – polska aktywność w ramach ISO TC 213/WG 10	458
2.3.1. Kierunek rozwoju norm serii ISO 10360: <i>Geometrical product specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS)</i>	458
2.3.2. Udział polskich przedstawicieli w obradach ISO/TC 213/WG 10	462

2.4. Identyfikacja kluczowych zadań badawczych i potrzeb infrastrukturalnych	463
3. Kierunki rozwoju metrologii współrzędnościowej	465
3.1. Proponowane kierunki badawcze i rozwojowe	
3.2. Integracja naukowa ośrodków badawczych – Narodowa Sieć Metrologii Współrzędnościowej (NSMET)	468
3.3. Podsumowanie kierunków rozwoju metrologii współrzędnościowej w Polsce	471
4. Literatura	475
Część dziewiąta: Metrologia prawna	
1. Określenie obszaru merytorycznego metrologii prawnej	481
2. Infrastruktura jakości a metrologia prawna	483
3. Diagnostyka stanu metrologii prawnej w Polsce	485
3.1. Elementy metrologii prawnej	485
3.1.1. Legalne jednostki miar	486
3.1.2. Prawna kontrola metrologiczna	487
3.1.3. Systemy prawnej kontroli metrologicznej	489
3.1.4. Nadzór	518
3.3. Kontekst międzynarodowy	527
3.3.1. OIML	528
3.3.2. WELMEC	530
3.3.3. NoBoMet	531
3.3.4. Komisja Europejska	532
3.4. Identyfikacja problemów i potrzeb	532
4. Kierunki rozwoju metrologii prawnej	537
4.1. Zakres przedmiotowy i strategiczne kierunki rozwoju metrologii prawnej	537
4.2. Narzędzia metrologii prawnej i strategiczne kierunki rozwoju w obszarze systemowym	539
4.3. Inne czynniki i uwarunkowania wyznaczające strategiczne kierunki rozwoju metrologii prawnej	543
4.3.1. Nakierowanie na cel	543
4.3.2. Nowoczesne narzędzia w nadzorze i współdziałanie z innymi organami nadzoru rynku	544
4.3.3. Otwarcie metrologii prawnej na przyrządy rozproszone zawierające bloki wirtualne	546
4.3.4. Działanie we wspólnej przestrzeni	548
4.4. Podsumowanie kierunków rozwoju metrologii prawnej	550
5. Literatura	553
Podsumowanie	559

Wprowadzenie



Dr inż. Magdalena Zawada-Michałowska

ORCID: 0000-0003-3330-6340

Politechnika Lubelska

ROR: <https://ror.org/024zjzd49>

Adiunkt w Katedrze Podstaw Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej (PL). W 2020 r. decyzją Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna PL uzyskała stopień doktora z wyróżnieniem w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Praca doktorska dotyczyła odkształceń elementów cienkościennych po frezowaniu zarówno w aspekcie technologicznym, jak i metrologicznym. Członek Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich oraz Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją.

Współautorka kilkudziesięciu publikacji naukowych w renomowanych czasopismach naukowych indeksowanych w wiodących bazach danych, takich jak Web of Science i Scopus. Współautorka czterech patentów (nagrodzonych na międzynarodowych wystawach wynalazków), a także monografii naukowej. Wykonawca w projektach realizowanych przy współpracy z Polskimi Zakładami Lotniczymi w Mielcu w ramach programu INNOLOT „Badania i rozwój nowych, innowacyjnych metod projektowania i wytwarzania kompozytowych lotniczych struktur pierwszorzędowych” oraz „Opracowanie innowacyjnych połączeń mechanicznych celem zastąpienia konwencjonalnych połączeń w strukturach lotniczych”.

Obecnie pełni funkcję kierownika projektów: „Identyfikacja długofalowych potrzeb i kierunków działań strategicznych w zakresie polskiej metrologii oraz jej rozwoju” („Polska Metrologia”, MEiN) oraz „Opracowanie technologii frezowania cienkościennych elementów integralnych wykonywanych z lotniczych stopów metali lekkich w kontekście minimalizacji odkształceń poobrobkowych” (LIDER XIV, NCBR). Dodatkowo, wspólnie z Politechniką Rzeszowską, realizuje projekt „Multisensoryczny system pomiarów oddziaływań termo-mechanicznych wraz z kompleksową analizą stanu warstwy wierzchniej stopów lotniczych wspomagany algorytmami uczenia maszynowego” („Polska Metrologia II”, MEiN), którego jest kierownikiem ze strony PL. Wielokrotnie nagradzana przez JM Rektora PL za pracę naukową i organizacyjną.



Dr hab. inż. Jerzy Jóźwik, prof. uczelni

ORCID: 0000-0002-8845-0764

Politechnika Lubelska

ROR: <https://ror.org/024zjzd49>

Dyrektor Biura Polskiej Unii Metrologicznej (PUM) powołanej przez Ministra Nauki w 2021 r. Były kierownik Katedry Podstaw Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej (PL). Pracownik Państwowej Akademii Nauk Stosowanych (PANS) w Chełmie, gdzie do 2024 r. pełnił funkcję zastępcy dyrektora Instytutu Nauk Technicznych i Lotnictwa, kierując Centrum Studiów Inżynierskich PANS w Chełmie. Członek Komitetu Budowy Maszyn Polskiej Akademii Nauk, a od 2024 r. sekretarz prezydium. Członek Akademii Inżynierskiej w Polsce, Lubelskiego Towarzystwa Naukowego, Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich, a także Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją oraz Polskiego Towarzystwa Spawalniczego – Oddział Lublin.

W 2024 r. uhonorowany tytułem „Ambasador Lubelskiego Klubu Biznesu”. Członek zespołu doradczego Ministra Nauki w programie „Polska Metrologia”. Członek Polskiego Stowarzyszenia Pomiarów Automatyki i Robotyki. Autor ponad 250 publikacji i anglojęzycznej monografii. Współautor pięciu innych monografii, dwóch skryptów dydaktycznych, a także wielu patentów i zgłoszeń patentowych. Promotor trzech przewodów doktorskich i promotor pomocniczy obronionej pracy doktorskiej. Kierownik projektów naukowych i dydaktycznych oraz ich wykonawca. Aktywnie współpracuje z otoczeniem społeczno-biznesowym.

Pomysłodawca i przewodniczący komitetu organizacyjnego konferencji, takich jak: „Synergia Nauki i Przemysłu”, „New Trends in Metrology” oraz „MetroAeroSpace 2024”. Organizator Pikniku Metrologicznego i Warsztatów Metrologicznych dla doktorantów, studentów i młodych pracowników nauki. Promuje Lubelszczyznę na forach krajowych i zagranicznych, podczas wystąpień konferencyjnych oraz targów wystawienniczych. Wielokrotnie nagradzany przez JM Rektora PL i Rektora PANS w Chełmie. Odznaczony brązowym i srebrnym Krzyżem Zasługi Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej (2011 r., 2018 r.) oraz medalem Komisji Edukacji Narodowej (2015 r.).

Metrologia, jako nauka o pomiarach, odgrywa kluczową rolę w rozwoju społeczeństwa i gospodarki. Jej znaczenie przejawia się nie tylko w precyzyjnym określaniu wartości wielkości, ale także w zapewnianiu wiarygodności i powtarzalności pomiarów, które stanowią fundament innowacji technologicznych, handlu międzynarodowego, ochrony zdrowia oraz monitorowania środowiska. Wyzwania współczesnego świata, takie jak: zmiany klimatyczne, dynamiczny rozwój technologii informacyjnych czy rosnąca globalizacja, stawiają przed polską metrologią nowe zadania.

Celem niniejszej monografii naukowej jest identyfikacja długofalowych potrzeb i kierunków działań strategicznych w zakresie polskiej metrologii oraz jej rozwoju. W obliczu globalnych trendów, konieczne jest wypracowanie spójnej strategii, która pozwoli Polsce na utrzymanie konkurencyjności i wiarygodności w międzynarodowej przestrzeni metrologicznej. Przedstawione w pracy rozważania będą stanowiły podstawę do formułowania rekomendacji dla decydentów oraz podmiotów odpowiedzialnych za rozwój krajowej polityki metrologicznej.

W ostatnich latach w dziedzinie metrologii zachodzą w sposób ciągły rewolucyjne zmiany. Należy zdawać sobie sprawę, jak ważne w tym obszarze jest dotrzymywanie kroku postępowi technologicznemu. Dodatkowo nowe trendy w nauce o pomiarach nie mogą pozostawać w tyle za kolejnymi rewolucjami przemysłowymi. W tak szybko zmieniającym się świecie innowacje w metrologii nie polegają tylko na osiągnięciu większej precyzji, ale mają na celu głównie sprostanie rosnącym wyzwaniom konkretnych branż. Można do nich zaliczyć np.: przemysł chemiczny, maszynowy, lotniczy, kosmiczny, samochodowy, wojskowy oraz wszystkie inne, dla których dokładność pomiaru ma kluczowe znaczenie w zakresie zapewnienia bezpieczeństwa i jak

najlepszej jakości wytwarzanych wyrobów. Ponadto warto przyjrzeć się pojawiającym się trendom i przełomowym rozwiązaniom technologicznym kształtującym przyszłość metrologii. Obecnie w centrum uwagi znajdują się automatyzacja i robotyzacja procesów pomiarowych oraz zaawansowana analiza danych. Mimo że automatyzacja i robotyzacja w procesach pomiarowych nie są niczym nowym, to w świetle rozwoju sztucznej inteligencji, cyfrowych bliźniaków i Internetu rzeczy nabierają one zupełnie innego znaczenia. Usprawniają złożone zadania pomiarowe, zmniejszają ryzyko wystąpienia błędu ludzkiego i istotnie zwiększają wydajność procesu pomiaru. Jednocześnie konieczne jest wspomnienie o dynamicznym postępie w obszarze analizy i przetwarzania danych. Należy w tym miejscu wymienić ponownie sztuczną inteligencję i uczenie maszynowe, analizę dużych zbiorów danych pomiarowych, Internet rzeczy, modelowanie i symulacje komputerowe oraz zarządzanie jakością danych. Umożliwiają one „głębszy” wgląd w dane pomiarowe, poprawiając w ten sposób rozumienie procesów produkcyjnych i przekładając się na poprawę jakości produktów. Dostrzegając istotę wyzwań wynikających z przedstawionych priorytetów badawczych w przestrzeni europejskiej i światowej, można wskazać, że wiele działań zmierza do opracowania innowacyjnych technik pomiarowych ze wsparciem inteligentnych algorytmów przetwarzania, wnioskowania oraz generowania działań wykonawczych na rzecz ulepszonych procesów i produktów. Podejmowane działania powinny bazować na komplementarności zasobów i kompetencji naukowców w celu opracowania nowatorskich metod pomiarowych ukierunkowanych na wykorzystanie nowości w obszarze technologii metrologicznych. Dodatkowo realizacja krajowych i unijnych priorytetów w zakresie transformacji cyfrowej oraz zrównoważonego rozwoju oznacza potrzebę inicjowania, a także długofalowego prowadzenia interdyscyplinarnych prac badawczych i rozwojowych (B+R) w dziedzinie metrologii. Globalne wyzwania i konkurencyjność przemysłowa, zgodnie z rekomendacjami oraz oczekiwaniami implementacyjnymi Komisji Europejskiej, oznaczają konieczność intensyfikacji prac w wymienionych obszarach oraz podejmowania nowych partnerstw w Europie. Dotychczasowe efekty realizacji programów badawczych European Association of National Metrology Institutes (EURAMET), takich jak: European Metrology Research Programme (EMRP) i European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR), wskazują na

potrzebę intensyfikacji prac B+R ukierunkowanych na opracowanie nowatorskich rozwiązań lub technologii pomiarowych dla potrzeb przemysłu. Jako że wyniki pomiarów niosą ze sobą konsekwencje dla nauki, przemysłu, zdrowia publicznego czy życia codziennego, wspomnieć należy także o konieczności zapewniania ich wiarygodności. Biorąc pod uwagę interdyscyplinarność metrologii, zaznaczenia wymaga również fakt, że w zależności od obszaru, stojące przed nią wyzwania mogą się nieco różnić.

Ciągły rozwój i integracja zaawansowanych technik obrazowania (np.: obrazowanie 3D o wysokiej rozdzielczości i obrazowanie wielospektralne) pozwalają na ulepszanie diagnostyki i wizualizacji części medycznych. Wykorzystanie metrologii wewnątrzprocesowej do monitorowania i kontroli procesów produkcyjnych w czasie rzeczywistym zapewnia zaś wysoką jakość produktów końcowych i umożliwia wykrywanie ewentualnych niezgodności na wczesnym etapie produkcji. Nanometrologia w precyzyjnych pomiarach w skali nano ułatwia wytwarzanie bardzo czułych narzędzi diagnostycznych i miniaturowych wyrobów medycznych. Bardzo dynamicznie rozwijającą się techniką jest chociażby optyczna tomografia koherentna stosowana do nieinwazyjnego obrazowania i pomiaru tkanek biologicznych, szczególnie w okulistyce oraz kardiologii. Intensywny postęp widoczny jest również w obszarze współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Jest to związane z rosnącym zapotrzebowaniem na precyzyjne procesy produkcyjne i wysokojakościowe części samochodowe czy też lotnicze. W świetle zmian klimatycznych niezwykle ważne są badania środowiskowe oraz obserwacje klimatu i oceanów. Pomiary w obszarach, takich jak: badania czystości powietrza i wody, identyfikacja metali ciężkich w żywności, utylizacja produktów procesów zużycia, w tym płynów eksploatacyjnych i obróbkowych w przemyśle maszynowym, to ogromne wyzwanie dla metrologów. Ponadto integracja algorytmów uczenia maszynowego i sztucznej inteligencji z systemami metrologicznymi w celu usprawnienia analizy danych, rozpoznawania wzorców i podejmowania decyzji, to nieunikniony kierunek rozwoju metrologii na świecie. Należy również zwrócić uwagę na tak popularną technologię cyfrowego bliźniaka. Jej zastosowanie umożliwia tworzenie wirtualnych replik fizycznych maszyn pomiarowych (i nie tylko), ułatwiając monitorowanie, analizę i optymalizację działania w czasie rzeczywistym. Coraz więcej procesów pomiarowych jest również

wspomaganych rzeczywistością rozszerzoną, co umożliwia nakładanie informacji cyfrowych na obiekty fizyczne podczas pomiaru i poprawia jego dokładność oraz wydajność. Nie sposób nie wspomnieć także o łączności bezprzewodowej i Internecie rzeczy w zastosowaniach metrologicznych, m.in. do: skutecznego, wydajnego i bezproblemowego udostępniania danych czy zdalnego monitorowania. Wszystkie te dość skrótowo przytoczone aspekty mają kluczowe znaczenie dla „R(ewolucji)” polskiej, europejskiej i światowej metrologii. Innowacje w metrologii umożliwiają nie tylko rozwój tej dziedziny, ale nade wszystko przyczyniają się do rozwoju gospodarki. Zmieniają one tradycyjne praktyki metrologiczne i otwierają nowe możliwości, będące do tej pory jedynie w sferze marzeń.

Obecnie brakuje długofalowego i uniwersalnego (ogólnopolskiego) modelu prognozującego kierunki rozwoju polskiej metrologii. Istnieją jedynie lokalne i rozproszone strategie cząstkowe formułowane m.in.: w krótkookresowych planach działania wybranych instytucji, wybiórczo w strategiach pojedynczych i lokalnych jednostek naukowych. Ukierunkowanie rozwoju metrologii w skali całego kraju i powiązanie go z trendami ogólnoswiatowymi jest aktualnie kluczowym zadaniem.

W ręce czytelników oddajemy opracowanie poświęcone identyfikacji długofalowych potrzeb i kierunków działań strategicznych w zakresie polskiej metrologii oraz jej rozwoju, które przygotowano w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego (wtedy Ministra Edukacji i Nauki) pod nazwą „Polska Metrologia” (nr projektu: PM/SP/0073/2021/1). Główne cele pracy koncentrują się na:

- analizie obecnego stanu metrologii w Polsce,
- określeniu kierunków dalszych badań naukowych dotyczących metrologii,
- porównaniu stanu krajowej metrologii z aktualnie obowiązującymi trendami światowymi,
- analizie posiadanych zasobów techniczno-aparaturowych,
- ocenie kadrowych kompetencji metrologicznych,
- identyfikacji kierunków rozwoju metrologii w Polsce.

W ramach realizacji projektu nawiązano współpracę z Ekspertami (naukowcami), znanymi w Polsce i na świecie, których autorytet jest niepodważalny, a wiedza odnosząca się do danego obszaru metrologii – niekwestionowana. Pracę podzielono na 9 głównych części, obejmujących następujące działy metrologii:

- metrologia przemysłowa – prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski, Politechnika Poznańska,
- metrologia chemiczna – prof. dr hab. Ewa Bulska, Uniwersytet Warszawski,
- metrologia elektryczna – prof. dr hab. inż. Janusz Gajda, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie,
- metrologia fizyczna – prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik, Politechnika Rzeszowska,
- metrologia medyczna – prof. dr hab. inż. Gerard Cybulski, Politechnika Warszawska,
- metrologia optyczna – prof. dr hab. inż. Małgorzata Kujawińska, Politechnika Warszawska,
- metrologia wielkości geometrycznych – prof. dr hab. inż. Adam Woźniak, Politechnika Warszawska,
- metrologia współrzędnościowa – prof. dr hab. inż. Jerzy A. Sładek, Politechnika Krakowska,
- metrologia prawna – Paulina Olszewska, Główny Urząd Miar.

Istotny udział w przygotowaniu niniejszej pracy miała jednostka kreująca w dużej mierze polską politykę metrologiczną, czyli Główny Urząd Miar (GUM).

Należy również podkreślić ważną rolę Polskiej Unii Metrologicznej (PUM), którą reprezentował dr hab. inż. Jerzy Józwik, prof. uczelni (Dyrektor Biura Polskiej Unii Metrologicznej).

Głównymi przesłankami do opracowania niniejszej monografii naukowej, stanowiącej kompendium wiedzy z zakresu stanu polskiej metrologii, były stwierdzone przez Główny Urząd Miar i Najwyższą Izbę Kontroli następujące problemy:

- słaba kondycja krajowych organizacji metrologicznych,
- niedostateczna koordynacja instytucji metrologicznych o charakterze szkoleniowym i dydaktycznym,
- brak wystarczających środków na rozwijanie infrastruktury metrologicznej,
- niedostateczne finansowanie badań naukowych w obszarze metrologii,
- niedostateczna edukacja i szkolenia w dziedzinie metrologii,
- brak skoordynowanych działań strategicznych z przedsiębiorcami.

Podjęcie skoordynowanych działań było więc kluczowe dla efektywnej modernizacji i rozwoju polskiej metrologii, a wdrożenie

odpowiednich reform i inwestycji przyczyniło się do podniesienia standardów, zwiększenia konkurencyjności oraz lepszego dostosowania się do dynamicznie zmieniającego się otoczenia gospodarczego. W ostatnich latach podjęto wiele aktywności sprzyjających rozwojowi polskiej metrologii, wśród których można wymienić:

- utworzenie Rady Metrologii przy prezesie Głównego Urzędu Miar,
- nadanie Głównemu Urzędowi Miar statusu jednostki prowadzącej działalność naukowo-badawczą,
- utworzenie Polskiej Unii Metrologicznej,
- utworzenie bazy infrastruktury metrologicznej (BIM),
- powołanie Klastra Metrologicznego,
- utworzenie modułu metrologia w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy”,
- ustanowienie w 2021 r. przez Ministra Edukacji i Nauki (obecnie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego) programu grantowego „Polska Metrologia”,
- budowa Świętokrzyskiego Kampusu Laboratoryjnego GUM w Kielcach.

Warto podkreślić, że jest to pierwsza taka próba przeprowadzenia diagnozy stanu metrologii w Polsce i nie obejmuje ona wszystkich kluczowych obszarów. W przyszłości należałoby wykonać podobne analizy w zakresie chociażby metrologii kwantowej, która również bardzo intensywnie się rozwija w ostatnim czasie.

Podjęte działania pozwolą wzmocnić metrologię w kontekście ukierunkowania dalszych badań naukowych oraz będą wsparciem dla krajowej polityki metrologicznej. Brak takiego podejścia może spowodować jej marginalizację i niedoinwestowanie, przekładające się na niebezpieczeństwo powiększania dystansu do krajów wysoce rozwiniętych.

dr inż. Magdalena Zawada-Michałowska
dr hab. inż. Jerzy Józwik, prof. uczelni

CZĘŚĆ PIERWSZA

Metrologia przemysłowa



Prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski

ORCID: 0000-0001-7526-8368

Politechnika Poznańska

ROR: <https://ror.org/00p7p3302>

Kierownik Zakładu Metrologii i Systemów Pomiarowych w Instytucie Technologii Mechanicznej na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej (PP). Doktor od 1996 r., doktor habilitowany od 2009 r., profesor od 2015 r. W latach 2020–2024 prorektor ds. rozwoju i współpracy z gospodarką PP oraz członek Prezydium Kolegium Prorektorów ds. Ogólnych, Organizacji i Kontaktów z Otoczeniem Społeczno-Gospodarczym Publicznych Wyższych Szkół Technicznych.

Członek Rady ds. innowacji w szkolnictwie wyższym i nauce, Rady Metrologii przy Prezesie Głównego Urzędu Miar (GUM) i Rady Normalizacyjnej przy Polskim Komitecie Normalizacyjnym. Przewodniczący Zespołu Doradczego do opracowania innowacyjnych kierunków w zakresie rozwoju usług metrologicznych GUM, członek Zespołu doradczego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego ds. programu „Doktorat wdrożeniowy” i Zespołu doradczego do spraw programu „Polska Metrologia”. Wiceprzewodniczący Komitetu Budowy Maszyn Polskiej Akademii Nauk (PAN). Członek Akademii Inżynierskiej w Polsce. Członek Komisji Inżynierii Powierzchni przy O/PAN w Poznaniu. Członek Prezydium Wielkopolskiej Rady Regionalnej Przemysłu Przyszłości oraz Rady Rozwoju Obszaru Gospodarczego Kostrzyńsko-Słubickiej Specjalnej Strefy Ekonomicznej. Członek Komitetu Technicznego ISO TC 213 jako delegat Polski oraz Komitetów Technicznych 48 i 207 Polskiego Komitetu Normalizacyjnego. Członek Zarządu Polskiego Stowarzyszenia Stypendystów Fulbrighta.

Associate Editor w czasopismach: „Measurement”, „Measurement: Sensors”, „Measurement: Food, Metrology and Measurement Systems” oraz „Metrology & Hallmark”. Członek Rady Programowej czasopisma „Mechanik”.

Stypendysta fundacji Fulbrighta w Northwestern University w Evanston w USA. Visiting Professor w Université Polytechnique Hauts-de-France, Valenciennes (Francja).

Współzałożyciel ITA sp. z o.o. – jednej z największych firm metrologicznych w Polsce.

Określenie obszaru merytorycznego metrologii przemysłowej

Pomiar jest integralną częścią naszego życia i towarzyszy nam od wieków, ewoluując wraz z postępem ludzkości [1]. Podobnie jest obecnie, w czasach Przemysłu 4.0 [2], który niesie za sobą zupełnie inne spojrzenie szczególnie pod względem informatycznym. Metrologia jest także obecna od początku istnienia koncepcji Przemysł 4.0. Co więcej, można śmiało powiedzieć, że wymusiła niektóre z aspektów nieodzownych dla tej strategii, które w pomiarach pojawiły się już nieco wcześniej [3]. Powstała zatem strategia Metrologia 4.0, nazywana czasem także metrologią przyszłości, obejmująca – przynajmniej naukowo – systemy cyber-fizyczne, Internet rzeczy, sieci i duże zbiory danych w chmurach, sztuczna inteligencja i robotyzacja [4]. Do tego niezbędny jest rozwój sensoryki, zdolnej do detekcji wielu bardzo różnorodnych czynników oraz do pozyskiwania informacji o stanie procesów i ich elementów składowych [5]. To z kolei umożliwi wielokryterialną optymalizację procesów i bardziej efektywne wykorzystanie zasobów [6, 7]. Takie spojrzenie na metrologię jest uwarunkowane rozwojem przemysłu oraz współistnieniem wytwarzania i pomiarów. Podstawowym celem tego działania jest naturalnie stworzenie tzw. *smart factory* (inteligentnej fabryki), o wysokim stopniu automatyzacji i robotyzacji, z procesami realizowanymi optymalnie (wielokryterialnie), szybkimi i elastycznymi zmianami wyrobu i – co bardzo istotne – orientacją na klienta. Każda nowa technologia w założeniu będzie dawać początek nowszej i jeszcze sprawniejszej, co jest jedyną skuteczną odpowiedzią na problemy współczesnego przemysłu, wśród których na czoło wysuwają się: brak rąk do pracy (mały przyrost naturalny w krajach rozwiniętych), niedobór wykwalifikowanej kadry i rosnące wymagania ekologiczne. To sprawia, że czwarta rewolucja jest zupełnie inna niż trzy poprzednie, ponieważ

zmienia nie tylko to, co i jak robimy, ale także to, kim jesteśmy. Zmienia podejście inżynierskie, zależności biznesowe, ekonomiczne i społeczne, przez co dotyczy nie tylko maszyn i systemów, ale wszystkich aspektów funkcjonowania człowieka XXI w. Aby temu sprostać, metrolog będzie musiał dysponować wiedzą multidyscyplinarną, obejmującą, oprócz samych technik pomiarowych, także mechatronikę, automatykę i informatykę [8].

Przemysł, ogólnie rzecz ujmując, to dział gospodarki narodowej zajmujący się produkcją dóbr materialnych i usług. Produkcja przemysłowa może mieć różnorodny charakter z punktu widzenia wytwarzania jednakowych elementów według tej samej technologii, od jednostkowej począwszy poprzez seryjną aż do masowej. Metrologia przemysłowa związana jest z obszarem funkcjonowania przedsiębiorstw, w przeważającej większości o profilu wytwórczym. Dotyczy zatem zakładów przemysłowych traktowanych jako firmy produkcyjne, których w naszym kraju jest ponad 300 000. W tym gronie ok. 1 % stanowią firmy duże, ok. 20 % średnie, a pozostałe należą do grona firm małych i mikroprzedsiębiorstw. W przypadku dużych podmiotów, metrologia przemysłowa jest ważnym elementem działania firm będących w rękach polskich, jak i znajdujących się kapitałowo u partnerów spoza naszego kraju. Wyznacza to strategię inwestycyjną tych przedsiębiorstw, w której znajdują się również nakłady na sprzęt pomiarowy i usługi z nim związane. Wśród firm średnich i małych zdecydowanie przeważają podmioty, posiadające polski kapitał, będące wynikiem rozwoju, nadzorowanym przez osoby, które dany podmiot zakładały. To również wyznacza inne podejście do działań pomiarowych. Zakłady przemysłowe w naszym kraju funkcjonują w różnych branżach, a ponieważ metrologia przemysłowa jest z branżą bardzo ściśle związana, konieczne jest przedstawienie klasyfikacji gałęzi przemysłu. Według najprostszej z nich przemysł dzielimy na wydobywczy i przetwórczy, wśród którego wyróżnia się m.in. energetyczny, elektromaszynowy, chemiczny, metalurgiczny, rolno-spożywczy, włókienniczy i odzieżowy, drzewno-papierniczy, IT oraz pozostałe. Klasyfikacja bardziej rozbudowana wyróżnia przemysł: paliwowo-energetyczny (węglowy, paliwowy i energetyczny), metalurgiczny (wydobycie i hutnictwo żelaza, przemysł metali nieżelaznych), elektromaszynowy (metalowy, maszynowy, precyzyjny, środków transportu, elektroniczny, elektrotechniczny),

technologii internetowych, chemiczny (farmaceutyczny, perfumeryjno-kosmetyczny, nawozów sztucznych, włókien sztucznych), mineralny (materiałów budowlanych, ceramiczny, szklarski), drzewno-papierniczy (drzewny, celulozowo-papierniczy), lekki (włókienniczy, odzieżowy, skórzaný, obuwniczy, rolno-spożywczy) i pozostałe (poligraficzny, paszowy, utylizacyjny, turystyczny itp.). Już ta krótka kategoryzacja branż pokazuje, jak różne problemy musi rozwiązać metrologia przemysłowa i z jak różnymi zadaniami się mierzy. Celem tej części opracowania nie jest zatem dopasowanie i opisanie systemów pomiarowych do każdej konkretnej gałęzi, ale pewne uogólnienie pokazujące cechy wspólne dla wszystkich lub chociażby wielu z nich.

2.1. Funkcjonowanie klasycznego zakładu przemysłowego

Klasyczny zakład przemysłowy jest miejscem, gdzie odbywa się produkcja różnych towarów na dużą skalę. Funkcjonowanie takiego zakładu, z punktu widzenia działań produkcyjnych związanych z wyrobem, może być podzielone na kilka głównych etapów, wśród których wyróżnia się: planowanie produkcji, zaopatrzenie, produkcję, kontrolę jakości, pakowanie i magazynowanie, dystrybucję i logistykę oraz konserwację i utrzymanie ruchu. Planowanie produkcji, od którego zakład przemysłowy rozpoczyna swoje funkcjonowanie, polega na opracowaniu planu produkcji. Na tym etapie określa się rodzaje towarów, które będą wytwarzane, oraz ilości, jakie mają zostać wyprodukowane w określonym czasie. Planowanie obejmuje także określenie wymagań dotyczących surowców i zasobów potrzebnych do produkcji. Następny krok to zaopatrzenie, ponieważ po opracowaniu planu produkcji konieczne jest określenie, jakie surowce i materiały będą potrzebne do produkcji oraz znalezienie ich dostawców. Obejmuje to zamawianie surowców od podmiotów zewnętrznych, przechowywanie ich w magazynach oraz zarządzanie zapasami. Naturalnie głównym celem zakładu przemysłowego jest produkcja towarów. W tym celu zakład wykorzystuje maszyny, urządzenia i linie produkcyjne wraz z niezbędnym osprzętem i oprzyrządowaniem. Pracownicy odpowiedzialni za produkcję wykonują określone czynności zgodnie z ustalonymi procedurami i normami jakości, a surowce są przetwarzane w gotowe produkty. Aby zweryfikować poprawność ich wykonania i zapewnić odpowiednio wysoką jakość, w przedsiębiorstwie funkcjonuje kontrola jakości. Obejmuje ona różne etapy produkcji. Generalizując, można przyjąć, że jej procedury przewidują pobieranie próbek, które następnie

poddawane są stosownym testom sprawdzającym, czy spełniają one określone wymagania jakościowe. Jeśli wykryte zostaną jakiekolwiek niezgodności, podejmuje się odpowiednie działania korygujące. Im szybciej problem zostanie zauważony i zdiagnozowany, tym mniejsze koszty zostaną poniesione na jego usunięcie i wyeliminowanie przyczyny mogącej skutkować jego powtórным pojawieniem się. Po zakończeniu produkcji, produkty odpowiednio pakuje się i przygotowuje do wysyłki. W zakładzie przemysłowym z reguły istnieje również system magazynowy, który umożliwia przechowywanie gotowych produktów przed ich dystrybucją. Tak przygotowane produkty są dostarczane klientom lub dystrybutorom za pomocą różnych form transportu, tj.: drogowego (samochody ciężarowe), kolejowego (pociągi), wodnego (statki) lub powietrznego (samoloty). Rodzaj transportu wymusza naturalnie odpowiednie opakowanie. W przypadku dużych zakładów przemysłowych mogą istnieć oddzielne działania logistyczne, które zarządzają transportem i koordynują dostawy. W przemyśle funkcjonuje także konserwacja i utrzymanie ruchu. Zakład wymaga bowiem regularnego serwisowania maszyn i urządzeń (w tym również pomiarowych), aby zapewnić ich prawidłowe funkcjonowanie. Konserwacje, naprawy i przeglądy przeprowadza się w celu minimalizacji niespodziewanych i niepożądanych awarii oraz przestojów w produkcji, zmniejszających wydajność i produktywność konkretnego podmiotu. Można przyjąć, że wspomniane powyżej etapy opisują ogólne aspekty funkcjonowania klasycznego zakładu przemysłowego. Będą się one różnić w zależności od gałęzi przemysłu i produktów wytwarzanych w konkretnym zakładzie oraz jego wielkości.

Z etapami pracy w zakładzie związane są konkretne działy, których istnienie, funkcjonowanie i podział również zależą od specyfiki podmiotu produkcyjnego. Analizując, jak funkcjonują konkretne działy, można wywnioskować, że wszystkie one w pewnym zakresie mają związek z działaniami pomiarowymi lub wywierają wpływ na ich przebieg. Przedstawiono to krótko poniżej, prezentując zadania podstawowych działów zazwyczaj występujących w zakładach przemysłowych. W strukturze wyróżniamy zatem zarząd oraz działy: konstrukcji, technologii, produkcji, jakości, badań i rozwoju, zakupów i zaopatrzenia, logistyki, sprzedaży i marketingu, finansowo-księgowy, personalny, a także bezpieczeństwa i ochrony środowiska. Zarząd firmy jest najwyższym organem decyzyjnym w zakładzie przemysłowym. W jego

skład wchodzi najczęściej prezes, dyrektor generalny oraz ich zastępcy, którzy nadzorują i zarządzają działalnością zakładu. Zarząd, podejmując decyzje związane z funkcjonowaniem firmy, określa miejsce działań pomiarowych w całej strukturze, a także zatwierdza inwestycje związane z metrologią. Dział konstrukcji odpowiada za projektowanie, opracowywanie i doskonalenie produktu. Tworzą go projektanci i konstruktorzy przygotowujący dokumentację konstrukcyjną. W swoich pracach muszą oni mieć świadomość wyposażenia pomiarowego zakładu i – jeśli jest taka potrzeba – wnioskować o jego rozszerzenie ilościowe lub jakościowe. Dział technologii skupia specjalistów, którzy zajmują się projektowaniem, opracowywaniem, analizą i doskonaleniem technologii i całych procesów produkcyjnych. Powinni oni tak opracować technologię wytwarzania, aby istniejące w zakładzie urządzenia pomiarowe były w stanie zweryfikować wartości uzyskanych cech przy zachowaniu odpowiednich parametrów dokładnościowych. Do nowo opracowanych technologii dobierane jest wyposażenie pomiarowe, a jeśli ono nie występuje, określa się konieczność zakupu. Dział produkcji jest odpowiedzialny za bezpośrednie prowadzenie procesów produkcyjnych. Może być podzielony na sekcje lub linie produkcyjne, w zależności od rodzaju produkcji. Dział produkcji nadzoruje efektywność, jakość i terminowość produkcji. Współczesna produkcja jest również odpowiedzialna za bieżącą weryfikację jakości uzyskiwanych wyrobów *on-line*, przez co często posiada zaawansowane systemy pomiarowe. W nowoczesnych zakładach produkcyjnych jest to jeden z najważniejszych działów realizujących zadania pomiarowe, współpracujący z działem jakości lub nawet zlecający mu kontrolę w trakcie produkcji. Dział jakości jest odpowiedzialny za kontrolę jakości (weryfikację, czy produkowane towary spełniają ustalone wymagania jakościowe) i zapewnienie jakości, czyli całość procedur działania w zakładzie z jakościowego punktu widzenia. Sekcja lub służby kontroli jakości są częścią tego działu. Dział jakości monitoruje jakość produktów, prowadzi testy i inspekcje, analizuje dane jakościowe, wprowadza działania zapobiegawcze i doskonalące, a także monitoruje zgodność z normami i regulacjami branżowymi. Ma też w swoich strukturach laboratoria pomiarowe odpowiedzialne za weryfikację pierwszej sztuki, nadzór nad środkami pomiarowymi, weryfikację metrologiczną przy sporach z dostawcami i odbiorcami itp. Jest to, obok produkcji, jeden z najważniejszych działów prowadzących działania

pomiarowe, na którym ciąży ponadto odpowiedzialność za poprawność działań i procedur metrologicznych. Dział badań i rozwoju funkcjonuje w zakładzie przemysłowym, który prowadzi działalność badawczo-rozwojową, co jest coraz częstszym zjawiskiem. Dział ten zajmuje się opracowywaniem koncepcji i testowaniem nowych produktów, innowacjami technologicznymi, a także badaniami nad doskonaleniem istniejących produktów i procesów. Posiada również wyposażenie pomiarowe niezbędne do prowadzenia prac o charakterze badawczym i rozwojowym. Dział zakupów i zaopatrzenia odpowiada za zarządzanie łańcuchem dostaw oraz zaopatrzenie zakładu w surowce, materiały, komponenty i inne potrzebne zasoby. Dział ten negocjuje umowy z dostawcami, zarządza relacjami handlowymi i kontroluje koszty zakupów. W tych działaniach mieszczą się również wszystkie czynności związane z prowadzeniem zakupów produktów i usług dla potrzeb czynności metrologicznych. Dział logistyki jest odpowiedzialny za planowanie i zarządzanie logistyką w zakładzie przemysłowym. Obejmuje to zarządzanie magazynem, transportem, dystrybucją i koordynację działań związanych z przepływem towarów od dostawców do klientów. Dział ten ma mniejszy związek z metrologią, w zasadzie ograniczający się do współpracy z innymi działami przy reklamacjach z uwagi na niezgodności wymiarowe oraz – w niektórych przypadkach – prowadzenia lub koordynowania czynności zmierzających do dostarczenia zakupionego sprzętu pomiarowego do odbiorcy wewnątrz zakładu. Dział sprzedaży i marketingu zajmuje się promocją, sprzedażą i dystrybucją produktów zakładu przemysłowego. Odpowiada za analizę rynku, opracowywanie strategii sprzedaży i marketingu, budowanie relacji z klientami i ich obsługę, a także rozwijanie rynków zbytu, czyli generowanie popytu na produkty zakładu przemysłowego. Dział ten, w celu przekonania potencjalnego odbiorcy, może i powinien w promocji produktów informować o wyposażeniu pomiarowym jako czynniku mającym wpływ na wytwarzanie produktów o odpowiedniej jakości. Dział finansowo-księgowy zajmuje się zarządzaniem finansami, rachunkowością, budżetowaniem, rozliczeniami, kontrolą kosztów oraz przygotowywaniem raportów finansowych i zarządzaniem płynnością finansową. Odpowiada również za zapewnienie zgodności z przepisami prawnymi i regulacjami finansowymi. Wspiera zakupy urządzeń i usług pomiarowych pod względem finansowym. Dział personalny zajmuje się kwestiami związanymi z personelem zakładu przemysłowego,

takimi jak: rekrutacja, szkolenia, rozwój pracowników, ocena pracy, polityka kadrowa, zarządzanie wynagrodzeniem oraz obsługa spraw socjalnych i administracyjnych, a także utrzymaniem dobrych relacji między pracownikami a zarządem. Związek tego działu z metrologią polega na zatrudnianiu odpowiednich specjalistów oraz poszukiwaniu szkoleń i podmiotów szkolących, czyli dbaniu, we współpracy z innymi zainteresowanymi działami, o odpowiedni poziom kadry realizującej działania metrologiczne. Dział bezpieczeństwa i ochrony środowiska odpowiada za zapewnienie bezpiecznych warunków pracy, przestrzeganie przepisów dotyczących bezpieczeństwa i higieny pracy, zarządzanie ryzykiem zawodowym oraz ochronę środowiska naturalnego, a także za monitorowanie i ograniczanie wpływu działalności zakładu na środowisko naturalne. Dział ten powinien posiadać odpowiednie wyposażenie pomiarowe do prowadzenia swoich prac, aby móc realizować swoje zadania. Tak pomyślana struktura zakładu przemysłowego może różnić się w zależności od rodzaju działalności przemysłowej, skali zakładu oraz schematu organizacyjnego danej firmy. Niektóre działania mogą być łączone lub mogą istnieć dodatkowe specjalistyczne działy w zależności od potrzeb i wymagań, co ma miejsce zwłaszcza w większych zakładach przemysłowych. Ważne jest przy tym, aby struktura zakładu przemysłowego była dobrze zorganizowana, umożliwiała efektywne zarządzanie i współpracę między różnymi działami prowadzące do osiągnięcia celów operacyjnych i strategicznych zakładu.

Już z tego krótkiego opisu wynika, jak ważna we współczesnych zakładach produkcyjnych jest metrologia. Jest ona obecna praktycznie we wszystkich istotnych aspektach funkcjonowania przedsiębiorstwa, dając możliwość weryfikacji założeń konstrukcyjnych.

2.2. Charakterystyka służb metrologicznych w zakładzie przemysłowym

Podstawowe zadania metrologiczne, związane nie tylko z pomiarami, ale także utrzymaniem sprzętu pomiarowego, to zadania działu jakości, a w szczególności służb kontroli jakości. Nie wdając się w szczegóły wynikające z różnic indywidualnych, czy zadania pomiarowe w trakcie produkcji wykonuje personel działu produkcji, czy są one zlecone do kontroli jakości (podejście całościowe), to właśnie na barkach tego

działu spoczywa odpowiedzialność za zakładową metrologię. Kontrola jakości w zakładzie produkcyjnym ma na celu zapewnienie, że produkowane towary spełniają określone wymagania jakościowe, są bezpieczne i zgodne z oczekiwaniami klientów. Jest to kluczowy proces, który wpływa na reputację firmy i zadowolenie klientów. Przyjmując przedstawione powyżej podejście całościowe, można stwierdzić, że na proces kontrolowania jakości składają się: kontrola dostaw, kontrola procesu produkcyjnego, kontrola produktu finalnego, zarządzanie reklamami i certyfikacja systemu zarządzania jakością. Kontrola dostaw obejmuje z jednej strony kontrolę jakości surowców i materiałów, które będą wykorzystywane w procesie produkcyjnym, a z drugiej półwyrobów dostarczanych przez kooperantów. Pracownicy kontroli weryfikują, czy dostawy są zgodne ze specyfikacjami i umowami, czy spełniają pozostałe określone wymagania jakościowe i czy są zgodne z obowiązującymi normami. Pierwszym elementem kontroli dostawy, po złożeniu zamówienia na podstawie planu produkcji i przysłaniu towaru, jest jego odbiór i weryfikacja dokumentów. Sprawdzeniu podlegają dane ilościowe i zgodność z zamówieniem. Następnie standardowo pracownicy przystępują do oceny wizualnej, polegającej na sprawdzeniu, czy nie ma widocznych uszkodzeń, zanieczyszczeń, zmian w kolorze czy innych nieprawidłowości, które mogłyby wpływać na jakość i przydatność do produkcji. Jeśli w zamówieniu określono wymagania jakościowe (a tak zdarza się prawie zawsze), przeprowadzane są badania laboratoryjne weryfikujące wartości wyspecyfikowanych cech. Mogą one obejmować np.: analizę składu chemicznego, pomiar parametrów mechanicznych, materiałowych czy też elektrycznych, sprawdzanie odporności na działanie czynników zewnętrznych itp. W takich sytuacjach pobiera się do badań próbki dostarczonych surowców, materiałów i produktów. Próbki po badaniach powinny być przechowywane na wypadek, gdyby konieczne było późniejsze przeprowadzenie dodatkowych badań, analiz lub procedury arbitrażowej. Może się również zdarzyć konieczność wykonania próbek w laboratorium zewnętrznym, które będzie wtedy pełnić rolę rozjemczą. Laboratorium takie powinno być przy tym wybrane z zastosowaniem odpowiednich procedur.

Kontrola dostaw z reguły jest przeprowadzana przez laboratorium kontroli dostaw funkcjonujące w strukturach służb zapewnienia jakości w przedsiębiorstwie. Jednym z jego zadań jest też weryfikacja

poddostawców jako istotny element w realiach przemysłowych, ponieważ jakość i niezawodność dostarczanych przez nich komponentów lub surowców mają bezpośredni wpływ na jakość i wydajność produktów końcowych. Pierwszym elementem tego procesu jest określenie kryteriów weryfikacji, które będą służyć do oceny potencjalnych poddostawców. Kryteria te obejmują jakość, niezawodność, zdolność produkcyjną, certyfikaty, terminowość dostaw, koszty itp. Następnie przeprowadza się analizę rynku poddostawców, oceniając ich zdolność do spełnienia określonych kryteriów. Na jej podstawie dokonuje się selekcji poddostawców, którzy mogą potencjalnie spełnić wymagania jakościowe i logistyczne. Bardzo często ocena poddostawców obejmuje audyt, który polega na wizytacji i weryfikacji działań przedsiębiorstwa pod względem zgodności z wymaganiami jakościowymi, zdolnością produkcyjną, zarządzaniem jakością, infrastrukturą itp. Wyniki audytu pozwalają na porównanie różnych poddostawców. Wybór nie jest opcją daną na zawsze, konieczne jest bieżące monitorowanie wydajności i jakości poddostawców. Odbywa się to na drodze regularnych ocen jakościowych, monitorowania terminowości dostaw itp. W przypadku stwierdzenia nieprawidłowości, podejmowane są działania korygujące w celu poprawy sytuacji lub, jeśli działania te nie przyniosą efektów, następuje dyskwalifikacja i zmiana poddostawcy. Z punktu widzenia odbiorcy ważne jest przy tym nawiązanie długoterminowej współpracy, w której obie strony będą dążyć do doskonalenia jakości i efektywności. W zależności od wzajemnych relacji mogą one np. wspólnie rozwijać procedury, realizować szkolenia techniczne, a także wymianę wiedzy i doświadczeń. Weryfikacja poddostawców w realiach przemysłowych wymaga podejścia systematycznego, aby wybrać i utrzymać najlepszych poddostawców, którzy spełnią oczekiwania jakościowe i logistyczne zakładu przemysłowego.

Wszystkie wyniki kontroli dostaw muszą być rejestrowane i odpowiednio dokumentowane. W przypadku stwierdzenia jakichkolwiek niezgodności lub problemów jakościowych, do dostawcy zgłaszane są reklamacje, a także wdrażane są stosowne procedury związane z takimi sytuacjami. Jak widać, kontrola dostaw odgrywa kluczową rolę w zapobieganiu wadliwym produktom i minimalizowaniu ryzyka zakłóceń w procesie produkcyjnym. Sam proces także wymaga prowadzenia działań z zakresu kontroli, które realizowane są w trakcie produkcji. Kontrola taka obejmuje monitorowanie i sprawdzanie

poprawność wyrobów, co warunkuje poprawność przebiegu procesu produkcyjnego. W tym celu pracownicy działu kontroli jakości (lub działu produkcji) przeprowadzają inspekcje, pobierają próbki, mierzą cechy i wykonują inne działania zapewniające, że proces produkcji jest zgodny z ustaleniami. Po wykonaniu produktu następuje kontrola finalna. W zależności od specyfiki produktu pracownicy sprawdzają, czy spełnia on wymagania jakościowe, jest zgodny ze specyfikacjami, pozbawiony wad i gotowy do wprowadzenia na rynek. Kontrola ta może mieć charakter wyrywkowy lub stuprocentowy, co jest uzależnione od konkretnych potrzeb, procesu i umów. Jeśli w trakcie kontroli jakości lub użytkowania produktu zostaną wykryte jakiejkolwiek wady, niedoskonałości lub niezgodności, zakład przemysłowy musi podjąć odpowiednie działania korygujące, co jest określane jako zarządzanie reklamacjami na różnych etapach życia produktu. Obejmuje to segregację produktów wadliwych, naprawę, ponowną produkcję lub zgłoszenie reklamacji do swoich dostawców. Ważne jest przy tym również, aby rejestrować i monitorować wszelkie reklamacje, identyfikować potencjalne problemy i wprowadzać działania zapobiegawcze, które mają eliminować powtarzanie takich sytuacji. Spora liczba zakładów przemysłowych decyduje się na uzyskanie certyfikatów systemu zarządzania jakością, w szczególności na zgodność z normą PN-EN ISO 9001 – Systemy zarządzania jakością, określającą wymagania, które potwierdzają, że procesy produkcyjne są zgodne z normami jakościowymi. Certyfikacja wymaga przeprowadzania audytów zewnętrznych w odniesieniu do swoich procesów i poddostawców, co wiąże się również często z przygotowaniem dokumentacji do weryfikacji dla audytorów zewnętrznych.

Aby zrealizować opisane zadania, konieczne jest określenie odpowiedniego funkcjonowania działu jakości. Organizacja kontroli i zapewnienia jakości w zakładzie produkcyjnym obejmuje szereg działań i struktur mających na celu zapewnienie skutecznego monitorowania oraz utrzymania odpowiedniej jakości produkowanych towarów, a także minimalizację wadliwych produktów i zwiększenie satysfakcji klientów. Wśród istotnych aspektów organizacji działu jakości znajdują się m.in.: polityka jakości, system zarządzania jakością, odpowiedni zespół pracowników kontroli jakości, procedury i normy dotyczące kontroli jakości na różnych etapach produkcji, infrastruktura i wyposażenie do prac związanych z kontrolą jakości, szkolenia i rozwój

pracowników dotyczące działań kontrolnych i jakościowych oraz monitorowanie wydajności procesów produkcyjnych i skuteczności kontroli jakości. Polityka jakości, którą powinien posiadać i realizować zakład przemysłowy, stanowi wytyczne i cele dotyczące jakości w całej firmie. Powinna być ona spójna z misją i wartościami zakładu, wizją i celami zarządu oraz uwzględniać wymagania klientów i regulacje normatywne. System zarządzania jakością pozwala na zapewnienie funkcjonowania przedsiębiorstwa w aspektach zapewnienia jakości. Taki system definiuje procesy oraz działa w zgodzie z procedurami i instrukcjami. Pozwala gromadzić dokumentację związaną z kontrolą i zapewnieniem jakości, a także określa strukturę do zarządzania jakością na wszystkich poziomach organizacji. System ten jest często wymagany przez odbiorców jako warunek konieczny do współpracy. Zespół pracowników kontroli jakości prowadzi działania bieżące i planowane związane z metrologią i zapewnieniem jakości. Zespół ten jest odpowiedzialny za nadzór nad procesem produkcji i zapewnienie zgodności z wymaganiami jakościowymi i normatywnymi. Składa się z wykwalifikowanych specjalistów, inspektorów jakości i innych pracowników z odpowiednimi kompetencjami do realizacji powierzonych zadań. Kolejny element to procedury i normy dotyczące kontroli jakości na różnych etapach produkcji. Procedury powinny obejmować m.in.: sposób pobierania próbek, metody testowania, kryteria akceptacji oraz postępowanie w przypadku wykrycia wad. Wykonawczym elementem tej części działań jest wyposażenie do prac związanych z kontrolą jakości. Zakład przemysłowy musi posiadać odpowiednią infrastrukturę, systemy, urządzenia i narzędzia pomiarowe, a także inne potrzebne do przeprowadzania procedur kontroli jakości. W tej części mieszczą się także całe laboratoria związane z procesami i działaniami. Poprawne wykonywanie zadań przez personel jest uwarunkowane szkoleniami i rozwojem pracowników związanych z działaniami kontrolnymi i jakościowymi. Jest więc niezwykle ważne, aby pracownicy odpowiedzialni za kontrolę jakości byli odpowiednio przeszkoleni i posiadali stosowne umiejętności techniczne. Regularne szkolenia i programy rozwoju powinny być organizowane w celu zapewnienia, że pracownicy są świadomi najnowszych metod kontroli jakości i technologii oraz obowiązujących norm. Zakład powinien realizować także monitorowanie wydajności procesów produkcyjnych i skuteczności kontroli jakości. Dział kontroli jakości jest zobligowany do bieżącego

weryfikowania wskaźników wydajności, wśród których znajdują się: wskaźnik wadliwości, wskaźnik reklamacji klientów, wskaźnik zgodności z wymaganiami itp. Wskaźniki te są stosowane do oceny i doskonalenia działania systemu kontroli jakości.

Podstawowe zadania służb metrologicznych w zakładzie przemysłowym związane są, oprócz realizacji zadań pomiarowych, z utrzymaniem wzorców, wzorcowaniem przyrządów i systemów pomiarowych, zarządzaniem dokumentacją metrologiczną oraz audytami i szkoleniami. To na ich barkach spoczywa zatem przeprowadzanie wzorcowań i weryfikacji przyrządów pomiarowych używanych w zakładzie. Wszelkiego rodzaju przyrządy do pomiaru długości, wagi, termometry, mierniki ciśnienia itp. są regularnie poddawane wzorcowaniu w celu zapewnienia ich dokładności i zgodności z ustaleniami podanymi w normach, często przy pomocy laboratoriów pomiarowych lub usług zewnętrznych. To z kolei łączy się z utrzymywaniem i regularnym sprawdzaniem wzorców pomiarowych (o znanych i sprawdzonych wartościach cech) używanych do kalibracji przyrządów. Służby metrologiczne dbają o odpowiednie przechowywanie, kontrolę terminów ważności i wzorcowanie wzorców. Aby sprawdzić, czy system pomiarowy jest prawidłowo skonfigurowany i zarządzany, personel metrologiczny przeprowadza audyty pomiarowe. Obejmują one ocenę procedur pomiarowych, dokumentacji, świadectw wzorcowania, identyfikację przyrządów itp. W wyniku przeprowadzonych audytów zlecane są m.in. szkolenia dla pracowników zakładu w zakresie metrologii, które mają na celu zapewnienie odpowiedniej wiedzy i umiejętności związanych z dokładnym i wiarygodnym przeprowadzaniem pomiarów oraz korzystaniem z przyrządów pomiarowych. Audyty i szkolenia wraz z raportami z ich przeprowadzenia są elementem dokumentacji metrologicznej, a zarządzanie tą dokumentacją również leży w gestii służb metrologicznych. Pozostałe części dokumentacji to świadectwa wzorcowania, procedury pomiarowe, instrukcje obsługi przyrządów itp. Nadzór nad dokumentacją ma zapewnić, że wszystkie działy w przedsiębiorstwie posiadają aktualne dokumenty i pracują, opierając się na najnowszych ich wersjach. Konieczne jest przy tym również weryfikowanie, czy poza dokumentami opracowanymi przez dział, zakład spełnia przepisy prawne i branżowe dotyczące pomiarów i jakości.

Ważnym zadaniem służb kontroli jakości w zakładzie produkcyjnym jest kontrola wyrywkowa. Określa się ją jako proces przeprowadzania

okresowych, losowych inspekcji lub pomiarów w celu sprawdzenia zgodności produktów, procesów lub procedur z określonymi standardami jakości, wymaganiami lub normami. Jest ona traktowana jako część ogólnego systemu kontroli jakości. Próbkowanie w kontroli wyrywkowej polega na losowym wyborze próbek z produkcji lub procesu, które będą poddane badaniom lub inspekcji. Ich wybór powinien być reprezentatywny dla całej partii lub procesu produkcyjnego. Kontrola taka może być prowadzona na stanowiskach przy linii wytwórczej, w specjalnych pomieszczeniach pomiarowych utworzonych pomiędzy stanowiskami produkcyjnymi zapewniających dużo lepsze warunki otoczenia lub w laboratoriach pomiarowych zakładu przemysłowego. Przed przeprowadzeniem kontroli wyrywkowej określa się kryteria akceptacji, czyli parametry, które muszą być spełnione przez badane próbki. W zależności od produktu i procesu mogą to być wymagania dotyczące wymiarów, wytrzymałości, wyglądu, funkcjonalności, trwałości, składu chemicznego, jakości materiałów lub innych aspektów. Cechy te są następnie mierzone lub sprawdzane za pomocą odpowiednich przyrządów pomiarowych lub inspekcyjnych. Wyniki tych pomiarów lub inspekcji są dokumentowane w celu ewidencji i analizy. Rejestruje się wyniki, daty, numery partii, identyfikatory próbek i inne informacje uznane za istotne przez służby zapewnienia jakości. Dokumentacja jest również ważna z punktu widzenia śledzenia jakości, identyfikowania problemów i podejmowania działań korygujących. Wyniki kontroli wyrywkowej są analizowane w celu wykrycia ewentualnych odchylenia od założeń konstrukcyjnych i technologicznych. Jeśli takie odchylenia wystąpią, raportuje się je odpowiednim działom, aby podjąć stosowne działania korygujące w celu naprawy problemów i zapobieżenia ich wystąpieniu w przyszłości. Działania te obejmują zmiany w procesach produkcyjnych, szkolenia personelu, poprawki w dokumentacji itp. Jak widać z tego opisu, kontrola wyrywkowa jest istotnym narzędziem w zarządzaniu jakością w zakładzie produkcyjnym, ponieważ pozwala na monitorowanie i ocenę jakości produktów w sposób reprezentatywny i losowy.

Bardzo istotne są działania metrologiczne realizowane w powiązaniu z bieżącym procesem produkcji. Obejmują one szeroki zakres działań mających na celu zapewnienie parametrów dokładności i wiarygodności pomiarów w trakcie produkcji, tak aby jak najwcześniej wykryć występujące nieprawidłowości. Procesy pomiarowe mogą być

realizowane bezpośrednio w linii produkcyjnej (urządzenia zainstalowane na taśmie lub bezpośrednio po systemie wytwórczym bądź też jako jego integralna część) albo poza nią. Kontrola wymiarowa blisko produkcji, a więc najlepiej w linii produkcyjnej to także przemysł przyszłości, czyli określenie trochę lepiej oddające rzeczywistość niż Przemysł 4.0 [9]. Pomiary w linii obejmują wykorzystanie systemów pomiarowych często zintegrowanych z samym procesem produkcyjnym. Systemy pomiarowe w linii produkcyjnej mogą być wykorzystywane zarówno do monitorowania charakterystyk wymiarowych części i produktów, jak i do dwustanowej inspekcji jakościowej (ocena dobry – zły). Pomiary w trakcie produkcji wiążą się z automatyzacją i robotyzacją procesów pomiarowych, opierając się zarówno na klasycznych urządzeniach pomiarowych, jak i liniijkach laserowych [10], a także kamerach przeznaczonych bardziej do inspekcji. Przykładowy optyczny czujnik powierzchniowy pozwalający na jednoczesne przeprowadzenie szybkiej kontroli jakości wielu cech geometrycznych skomplikowanych elementów, funkcjonujący w linii produkcyjnej przedstawiono na rysunku 1. Czujnik ten wykorzystuje technologię światła strukturalnego z niebieskimi diodami LED. Kontrola może się odbywać w sposób stu-procentowy, co jest stosowane dla tzw. cech krytycznych, których niespełnienie jest niedopuszczalne, ale może także być realizowana jako pomiary sprawdzające (co określony czas lub liczbę sztuk). Również w tym zakresie ważne jest, aby sprzęt pomiarowy był odpowiednio kontrolowany i monitorowany. Wzorcowaniem tych urządzeń zajmuje się z reguły akredytowane laboratorium wzorcujące. Postrzegając szerzej zagadnienia metrologiczne w trakcie produkcji, można dodać, że procesy pomiarowe są weryfikowane pod kątem ich parametrów dokładnościowych i zgodności z wymaganymi specyfikacjami. Ma to na celu minimalizację błędów pomiarowych i zapewnienie wiarygodności wyników. Należy także określić niepewność pomiaru i czynniki na nią wpływające, np.: parametry stosowanych przyrządów i systemów pomiarowych, metody pomiarowe, warunki środowiskowe, wpływ operatora. Niepewność pomiaru jest niezwykle istotną częścią wyniku pomiaru i należy ją uwzględnić przy ocenie analizowanych cech. Weryfikacja procesów pomiarowych związana jest z opracowaniem i wdrożeniem stosownych procedur pomiarowych dla różnych operacji w procesie wytwarzania. Procedury te określają kroki i wytyczne dotyczące wykonania pomiarów, włącznie z odpowiednimi

narzędziami i metodami. Ich częścią składową są z reguły instrukcje stanowiskowe do przeprowadzenia konkretnych czynności pomiarowych. Naturalnie służby metrologiczne powinny także prowadzić odpowiednie szkolenia pracowników działów produkcyjnych, aby ich świadomość metrologiczna zapewniała wiarygodność wytwarzania półwyrobów i produktów.



Ryc. 1. Optyczny czujnik powierzchniowy [11]

Realizacją opisanych powyżej zadań zajmuje się zespół pracowników (specjalistów), określany ogólnie jako służby kontroli i zapewnienia jakości. Można wśród nich wyróżnić inspektorów jakości, analityków jakości, pracowników laboratoriów (laborantów), audytorów jakości i inżynierów jakości. Inspektorzy jakości są pracownikami odpowiedzialnymi za przeprowadzanie inspekcji wizualnych, pomiarowych i funkcjonalnych w celu oceny jakości produktów. Wykonują kontrolę surowców, komponentów, półproduktów i gotowych wyrobów, sprawdzając zgodność z ustalonymi wymaganiami jakościowymi. Analitycy jakości są specjalistami, którzy zajmują się analizą procesów produkcyjnych i opracowywaniem procedur kontroli jakości. Monitorują i oceniają skuteczność tych procedur poprzez jakość produktów, opracowują wymagania jakościowe i działają jako konsultanci dla innych działów w zakresie jakości i doskonalenia procesów. Pracownicy laboratoriów, jak sama nazwa wskazuje, pracują w laboratoriach związanych z procesami i działaniami kontrolnymi, gdzie przeprowadzają

badania i analizy laboratoryjne w celu oceny jakości surowców, produktów na etapach pośrednich i końcowych, wzorców itp. Wykorzystują często zaawansowane metody, systemy, narzędzia i urządzenia laboratoryjne do oceny parametrów mechanicznych, materiałowych, chemicznych, fizycznych, mikrobiologicznych i innych. Audytorzy jakości są odpowiedzialni za przeprowadzanie audytów wewnętrznych i zewnętrznych w zakresie jakości, związanych z całą firmą lub poszczególnymi jej obszarami i procesami. Oceniają zgodność z procedurami i normami jakościowymi, identyfikują potencjalne miejsca zagrożeń i niezgodności oraz sposoby ich mitygowania oraz zapewniają przestrzeganie wymogów regulacyjnych i certyfikacyjnych. Inżynierowie jakości są z kolei zaangażowani w projektowanie i wdrażanie systemów jakości, zarządzanie procesami doskonalenia jakości oraz analizę i rozwiązywanie problemów jakościowych. Opracowują narzędzia jakościowe, takie jak np.: karty kontrolne, diagramy przyczynowo-skutkowe, stosują odpowiednie metody statystyczne itp. w celu monitorowania i poprawiania jakości w całym zakładzie. Gromadzą również informacje zwrotne od klientów, zarządzają reklamacjami oraz monitorują satysfakcję klientów, pomagając identyfikować obszary wymagające poprawy. Wszystkie te służby muszą działać we współpracy z innymi działami zakładu przemysłowego, aby zapewnić skuteczną kontrolę jakości i doskonalenie procesów produkcyjnych.

W przemyśle odpowiednie służby zajmujące się zagadnieniami metrologicznymi mogą funkcjonować w różnych strukturach organizacyjnych w zależności od konkretnego zakładu czy całej korporacji i jej organizacji. W zakładach małych i średnich personel pomiarowy jest na ogół bezpośrednio zintegrowany z całością i podlega bezpośrednio zarządowi lub działowi produkcji. W większych organizacjach i korporacjach możliwe jest utworzenie centralnych służb metrologicznych, które obsługują różne zakłady i oddziały w ramach jednej organizacji. Takie centralne służby metrologiczne mogą działać jako niezależny dział w strukturze korporacyjnej i zapewniać metrologiczne wsparcie wszystkim zakładom. Trzecia opcja, stosowana przy niektórych małych podmiotach lub bardzo specyficznym profilu produkcji, to korzystanie z zewnętrznych jednostek metrologicznych, które świadczą usługi pomiarowe i wzorcujące na zlecenie zakładu macierzystego. Takie jednostki są z reguły od niego niezależne i często działają jako

samodzielne podmioty, a czasem jako laboratoria akredytowane. W naszym kraju takie zjawisko jest sporadyczne.

W każdym przypadku ważne jest, aby służby metrologiczne w przemyśle działały zgodnie z obowiązującymi normami i przepisami metrologicznymi oraz spełniały wymagania jakościowe i niezawodnościowe. W zależności od specyfiki branży i rodzaju wykonywanych pomiarów, służby metrologiczne mogą mieć różne zadania, takie jak: wzorcowanie przyrządów, ocena zgodności, prowadzenie badań i rozwoju metrologicznego oraz udzielanie wsparcia technicznego i konsultacyjnego w zakresie metrologii.

W praktyce przemysłowej pojawia się pytanie, czy dział zapewnienia jakości powinien podlegać działowi produkcji, czy powinien być niezależny i podległy bezpośrednio zarządowi? Struktury systemów zapewnienia jakości tworzone jeszcze pod koniec XX w. bardzo wyraźnie wyjmowały zapewnienie i kontrolę jakości spod produkcji. Podejście to miało pokazać, jak istotnym problemem jest jakość dla współczesnych przedsiębiorstw i jak bezkompromisowe powinno być jej postrzeganie. Niemniej w zakładach przemysłowych istnieje różne podejście do organizacji działu zapewnienia jakości i jego podległości. Istnieją argumenty zarówno za podporządkowaniem działu zapewnienia jakości działowi produkcji, jak i za utrzymaniem go jako oddzielnego działu niezależnego od produkcji. Ostateczna decyzja jest wypadkową specyficznych potrzeb i uwarunkowań. Za uniezależnieniem działu zapewnienia jakości od działu produkcji przemawia obiektywność, niezależność celów i audytów. Jego oddzielenie od produkcji może zapewnić większą obiektywność w ocenie jakości produktów. Dział nie będzie wtedy podlegać presji produkcyjnej i będzie mógł skoncentrować się na niezależnej ocenie jakości, bez zwracania uwagi na plany i realizację celów ilościowych, trochę jakby bardziej bronił interesów klienta niż własnej produkcji. Oddzielony dział zapewnienia jakości może ponadto wносить unikalne i niezależne cele i perspektywy działalności oraz wiedzę na temat jakości, niezależnie od produkcji. Może dzięki temu skoncentrować się na rozwijaniu i wdrażaniu strategii i procesów zapewnienia jakości na szczeblu organizacyjnym. Działając w taki sposób, jednostka ta będzie także przeprowadzać niezależne audyty i inspekcje jakościowe, identyfikować problemy jakościowe i rekomendować działania korekcyjne bez presji produkcyjnej. Argumenty, które przemawiają za podległością działu zapewnienia jakości pod dział

produkcji to przede wszystkim korzyści płynące z integracji i wiedzy procesowej. Z pewnością umieszczenie tego działu w strukturze działu produkcji będzie sprzyjać bliższej współpracy i integracji między tymi dwoma działami. Jakość skupi się na wsparciu dla produkcji, monitorując produkty i zapewniając, że procesy produkcyjne będą zgodne z wymaganiami. Poza tym dział zapewnienia jakości podlegający produkcji może lepiej zrozumieć procesy produkcyjne, specyfikę wyrobu i wyzwania związane z jakością, co w efekcie powinno się przyczynić do lepszego zarządzania jakością i identyfikowania obszarów wymagających ulepszeń. Nie da się również ukryć, że z punktu widzenia produkcji i sprzedaży wytwarzanych produktów cele ilościowe są bardzo istotne (z tego w końcu zakład żyje), więc dział zapewnienia jakości włączony w strukturę działu produkcji będzie bardziej starał się znaleźć pozytywne aspekty potencjalnych braków, podchodząc do tego tematu kompromisowo. Ostateczny wybór zależy więc od różnych czynników, wśród których można wymienić: wielkość przedsiębiorstwa, branżę, rodzaj oferowanych produktów, kulturę organizacyjną i preferencje zarządu. Niezależnie jednak od decyzji i strukturalnego usytuowania, jednostki (tj. zarówno dział produkcji, jak i dział zapewnienia jakości) muszą mieć jasno zdefiniowane role, cele i odpowiednie mechanizmy współpracy.

2.3. Funkcjonowanie laboratoriów pomiarowych

Istotnym elementem struktury zakładu przemysłowego szczególnie w branżach, gdzie precyzyjne pomiary są ważne dla jakości produktów, jest laboratorium pomiarowe. Ma ono kluczowe znaczenie dla zapewnienia wiarygodnych wyników pomiarów, które są niezbędne do oceny i kontroli jakości produktów w zakładzie przemysłowym. Laboratorium wykonuje badania, testy, analizy i pomiary mające na celu sprawdzenie zgodności produktów z ustalonymi wymaganiami jakościowymi oraz ocenę parametrów materiałowych, chemicznych, mechanicznych czy elektrycznych. Istotne jest, aby laboratoria w zakładzie przemysłowym działały zgodnie z odpowiednimi normami dotyczącymi jakości, przepisami branżowymi i były wyposażone w odpowiednią infrastrukturę i wysoko wykwalifikowany personel.

Laboratorium pomiarowe, w zależności od uwarunkowań, jest wyposażone w różnorodne przyrządy pomiarowe, wśród których można wymienić: mierniki, wagi, spektrometry, mikroskopy, termometry, próbniki, analizatory chemiczne i wiele innych. Te przyrządy umożliwiają odpowiednio dokładne pomiary różnych analizowanych cech i parametrów. Laboratorium pomiarowe musi zapewniać odpowiednie warunki środowiskowe, takie jak np.: temperatura (stabilność, odpowiednie gradienty na godzinę, dobę i metr) [12], wilgotność, oświetlenie, odporność na drgania pochodzące z zewnątrz itp., ponieważ wpływają one na wyniki pomiarów. Ponadto muszą być przestrzegane procedury dotyczące czystości, kontaktu osób z wzorcami i mierzonymi przedmiotami oraz bezpieczeństwa pracy. W każdym laboratorium pomiarowym powinni pracować wykwalifikowani technicy, inżynierowie lub specjaliści w obszarze pomiarów z odpowiedniej dziedziny. Odpowiadają oni za realizację zadań pomiarowych, obsługę przyrządów i systemów pomiarowych, interpretację wyników, szacowanie niepewności pomiarowej oraz przygotowywanie raportów. Laboratorium powinno poza tym działać na podstawie ustalonych procedur pomiarowych, które określają sposób wykonania pomiarów, wzorcowania przyrządów, walidację metod, zasady bezpieczeństwa oraz dokumentację i raportowanie wyników. Procedury te muszą być zgodne z wymaganiami norm i uzgodnień jakościowych. W laboratorium pomiarowym może być zatrudniony personel do kontroli jakości laboratoryjnej, który nadzoruje i zapewnia wiarygodność i poprawność wyników pomiarów. W swoich działaniach przeprowadza on audyty wewnętrzne, uczestniczy w programach porównawczych oraz sprawdza świadectwa wzorcowania przyrządów. W laboratoriach powinni zatem pracować wykwalifikowani specjaliści z dziedziny metrologii w obszarze, którego dotyczy specyfika konkretnego laboratorium oraz technicy laboratoryjni. Utrzymują oni bazę danych pomiarowych z rejestrem wyników i historią pomiarów laboratoryjnych, świadectw wzorcowania oraz innymi informacjami związanymi z przyrządami i systemami pomiarowymi. Zarządzają szkoleniami z zakresu pomiarów, prawidłowych technik pomiarowych, obsługi przyrządów pomiarowych i interpretacji wyników pomiarów, organizując je z wykorzystaniem swoich zasobów lub podmiotów zewnętrznych dla pracowników zakładu przemysłowego. Ważne jest także, aby laboratorium pomiarowe

w zakładzie przemysłowym działało zgodnie z aktualnymi normami międzynarodowymi (ISO).

Jednym z najważniejszych zadań laboratoriów pomiarowych w zakładach przemysłowych jest kontrola wzorców. Odgrywa ona istotną rolę w zapewnieniu parametrów dokładnościowych i wiarygodności pomiarów oraz zgodności z normami i przepisami, co ma kluczowe znaczenie dla jakości i zgodności produktów oraz procesów produkcyjnych. Wzorce pomiarowe są używane do wzorcowania i weryfikacji przyrządów pomiarowych w całym zakładzie, dlatego ich odpowiednia kontrola, przeprowadzana w regularnych odstępach czasowych, zgodnie ze stosownymi procedurami jest niezwykle istotna. Przede wszystkim, w każdym przedsiębiorstwie konieczne jest wybranie odpowiednich wzorców, które są dostosowane do rodzaju i zakresu pomiarów wykonywanych w danym zakładzie. Powinny one spełniać wymagania stosownej klasy (w zależności od wymagań produkcyjnych), spełniać określone normy lub zalecenia i posiadać właściwe świadectwa wzorcowania. Przykładowy zestaw płytek wzorcowych przedstawiono na rycinie 2. Wzorce pomiarowe powinny być dokładnie oznaczone, zidentyfikowane i zarejestrowane w rejestrze wzorców. Rejestracja powinna obejmować numer identyfikacyjny, charakterystyki techniczne, datę wzorcowania i wszystkie inne dane istotne z punktu widzenia funkcjonowania wzorca w przedsiębiorstwie. Wzorce muszą być ponadto przechowywane w odpowiednich warunkach, zapewniających ochronę przed uszkodzeniami, utratą lub degradacją. Stosuje się tu specjalne walizeczki, opakowania, szafki lub pomieszczenia, w których panują kontrolowane warunki w zakresie temperatury, wilgotności czy ochrony przed promieniowaniem. Niezbędne jest regularne wzorcowanie wzorców, aby upewnić się, że ich stan nie ulega zmianie lub zmienia się nieznacznie w sposób kontrolowany. Wzorcowanie jest działaniem, które w określonych warunkach w pierwszym kroku ustala zależność pomiędzy odwzorowywanymi przez wzorzec pomiarowy wartościami wielkości wraz z ich niepewnościami pomiaru, a odpowiadającymi im wskazaniami wraz z ich niepewnościami, a w drugim kroku wykorzystuje tę informację do ustalenia zależności pozwalającej uzyskać wynik pomiaru na podstawie wskazania (PKN-ISO/IEC Guide 99 – Międzynarodowy słownik metrologii. Pojęcia podstawowe i ogólne oraz terminy z nimi związane (VIM)). Wzorcowanie wzorców najwyższej klasy dla danego zakładu powinno się wykonywać w akredytowanych

laboratoriach wzorcujących, natomiast wzorcowanie wzorców niższych klas zakładowe laboratorium pomiarowe dokonuje we własnym zakresie. Po przeprowadzeniu wzorcowania wzorca, należy wygenerować odpowiednie świadectwo wzorcowania, które potwierdza parametry dokładnościowe wzorca. Świadectwo powinno zawierać informacje o wynikach wzorcowania, stosowanej metodzie, zastosowanych wzorcach wyższego rzędu, normach bądź procedurach i ewentualnie innych przepisach. Bieżąca kontrola i świadomość terminów wzorcowania pozwala mieć pewność, że wszystkie wzorce posiadają aktualne świadectwa wzorcowania i są regularnie wzorcowane. Służby zapewnienia jakości w zakładach powinny przeprowadzać audyty i inspekcje w celu sprawdzenia zgodności kontroli wzorców z wymaganiami wewnętrznymi i zewnętrznymi. Kontrola ta powinna obejmować ocenę rejestrów wzorców, dokumentacji wzorcowania, warunków przechowywania i innych istotnych aspektów związanych z kontrolą wzorców.



Ryc. 2. Zestaw płytek wzorcowych [13]

Laboratorium pomiarowe w zakładzie przemysłowym ma również za zadanie tzw. kontrolę pierwszej sztuki (ang. *first article inspection* – FAI). Proces ten określa się jako realizację szczegółowej kontroli jakości pierwszego egzemplarza produktu nowego lub zmodyfikowanego albo po jakichkolwiek zmianach, które mogły wpłynąć na inne funkcjonowanie linii produkcyjnej (weryfikacja linii). Mowa tu zatem

nie tylko o zmianach dotyczących cech produktu, ale także np. przebrojeniach maszyn i ciągów wytwórczych obejmujących nowe narzędzia, uchwyty czy operacje. FAI jest stosowany w celu potwierdzenia, że produkt spełnia wszystkie wymagania klienta, specyfikacje techniczne, normy, przepisy i zalecenia oraz identyfikacji potencjalnych problemów jakościowych na wczesnym etapie produkcji. Laboratoria przemysłowe odgrywają bardzo istotną rolę w procesie sprawdzania pierwszej sztuki. Ich pracownicy są odpowiedzialni w pierwszym kroku za sprawdzenie wszystkich wymagań dotyczących produktu, co polega na dokonaniu przeglądu dokumentacji technicznej – rysunków technicznych, specyfikacji produktu, wymagań jakościowych, instrukcji itp. Kolejny etap to pomiar i ocena cech, w którym laboratorium przeprowadza określone badania. Realizuje pomiary wymiarów kluczowych elementów z uwzględnieniem tolerancji wymaganych przez specyfikacje techniczne. Jeśli wymaga tego specyfikacja produktu, laboratorium przeprowadza badania związane z materiałem, np. testy wytrzymałościowe, pomiary twardości, analizę składu chemicznego oraz analizę mikrostruktury. Badania te mają na celu potwierdzenie właściwości materiałowych części. Jeśli produkt ma natomiast określone funkcje lub wydajność, pracownicy laboratorium wykonują testy funkcjonalne, aby sprawdzić, czy produkt działa zgodnie z oczekiwaniami (np. testy obciążeniowe, szczelności, zmęczeniowe). Innymi słowy weryfikowane są te wszystkie cechy, które warunkują pierwsze lub ponowne uruchomienie produkcji seryjnej. Po przeprowadzeniu inspekcji pierwszej sztuki laboratorium sporządza szczegółowy raport, który zawiera wyniki pomiarów, analizę zgodności z wymaganiami oraz ewentualne odstępstwa i rekomendacje. Raport ten może być wymagany przez klienta końcowego jako potwierdzenie poprawności produkcji. Klient może również wymagać przechowywania próbki pierwszej sztuki dla celów weryfikacji i archiwizacji. Próbkę tę mogą być także używane jako porównanie do kolejnych partii produktów lub w przypadku dochodzenia w sprawach jakościowych.

Personel laboratorium pomiarowego jest również często zaangażowany w reklamacje pochodzące od odbiorcy końcowego, czyli sytuacje, gdy klient zgłasza niezadowolenie z zakupionego produktu lub usługi. Mogą one wynikać z różnych problemów, takich jak: wady produktu, niezgodność z zamówieniem, problemy z dostawą lub obsługą klienta itp. W przypadku reklamacji, istotne jest odpowiednie zarządzanie

nimi, aby zminimalizować negatywne skutki dla klienta oraz zapewnić jego satysfakcję i utrzymanie dobrej reputacji firmy. Naturalnie wszelkie reklamacje muszą być dokładnie rejestrowane, co umożliwia śledzenie ich rodzaju, częstotliwości i powodów. Powinna być także prowadzona wnikliwa analiza reklamacji (bardzo przydatna w długoterminowym zapobieganiu reklamacjom) w celu zidentyfikowania ich przyczyn, obszarów problemowych i potencjalnych ulepszeń. Osoba prowadząca reklamację z ramienia firmy lub laboratorium musi też szybko i rzeczowo na nią odpowiedzieć, wyjaśniając procedury postępowania i ustalając oczekiwany harmonogram rozwiązania problemu. Podstawowym zadaniem laboratorium w tej materii jest przeprowadzenie dogłębnych badań, aby zrozumieć przyczyny problemu. Badania mogą obejmować analizę cech geometrycznych, materiałowych, chemicznych, elektrycznych, funkcjonalnych lub innych, w zależności od treści reklamacji. Po uzyskaniu wyników należy podjąć i wdrożyć odpowiednie działania korygujące, które mają na celu rozwiązanie problemu lub naprawę wadliwych produktów i uniknięcie podobnych problemów w przyszłości. Reklamacje powinny być rozwiązywane zgodnie z polityką firmy oraz w sposób sprawiedliwy i taki, który zadowolili klienta (wymiana wadliwego produktu, zwrot pieniędzy, naprawa lub inna forma rekompensaty). Istotne jest również monitorowanie reklamacji w celu identyfikacji trendów i powtarzających się problemów. Jeśli taki wystąpi, należy podjąć działania zaradcze, np.: poprawić procesy produkcyjne, przeprowadzić szkolenie personelu lub dostosować specyfikację produktu. Jest to także okazja do ciągłego doskonalenia produktów, usług i procesów.

W zakładach przemysłowych można spotkać różne rodzaje laboratoriów, w zależności od branży, rodzaju produktów i potrzeb zakładu. Wśród laboratoriów, które często funkcjonują w zakładach przemysłowych, znajdujemy np.: metrologiczne, długości i kąta, mechaniczne, materiałowe, metalograficzne, chemiczne, mikrobiologiczne, elektrotechniczne i inne. Poszczególne określenia nie zawsze mają taki sam zakres działania, niektóre badania np. w jednej firmie są realizowane przez wyspecjalizowane laboratorium metalograficzne, a w drugiej przez materiałowe. Ponadto w jednym zakładzie może istnieć (i z reguły istnieje) kilka różnych laboratoriów spośród wymienionych powyżej.

Klasyczne laboratorium metrologiczne zajmuje się wzorcowaniem i weryfikacją różnych przyrządów pomiarowych wykorzystywanych w zakładzie przemysłowym. Z reguły laboratorium z tak ogólnymi zadaniami funkcjonują w małych i średnich firmach, prowadząc badania nie w całym zakresie, ale w specyficznych, newralgicznych dla nich obszarach. Dzięki swoim działaniom laboratorium metrologiczne zapewnia kontrolę jakości przyrządów oraz spójność i wiarygodność pomiarów realizowanych w całym przedsiębiorstwie, na podstawie ścisłych procedur wzorcowania. Personel tego laboratorium (wykwalifikowani metrologi, technicy laboratoryjni oraz specjaliści od pomiarów) wzorcuje i weryfikuje przyrządy pomiarowe używane w zakładzie przemysłowym (np.: mikrometry, termometry, manometry, analizatory chemiczne, mierniki napięcia itp.) zgodnie z odpowiednimi normami i regulacjami. W laboratorium metrologicznym gromadzona i przechowywana jest dokumentacja, w tym baza danych, związana z wynikami pomiarów wzorcujących w zakładzie przemysłowym i na zlecenie w firmach zewnętrznych. Tworzone są świadectwa wzorcowań wewnętrznych, a także monitorowane są terminy kolejnych wzorcowań. Przeprowadzana jest analiza niepewności pomiaru, aby ocenić wiarygodność uzyskiwanych wyników i zapewnić ich prawidłową interpretację. Pracownicy tego laboratorium opracowują procedury pomiarowe, które określają kolejne kroki i metody realizacji pomiarów w przedsiębiorstwie. Procedury te powinny naturalnie uwzględniać odpowiednie normy i przepisy dotyczące pomiarów oraz być dostosowane do specyfiki branży i wytwarzanych produktów. Ich konsekwencją jest możliwość ubiegania się o certyfikaty i akredytacje, takie jak np. akredytacja laboratorium badawczego zgodnie z normą PN-EN ISO/IEC 17025 – Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących, które potwierdzają spełnianie wysokich wymagań dotyczących jakości w dziedzinie metrologii [14]. Dużo rzadziej spotykaną sytuacją jest wystąpienie o status laboratorium wzorcującego. Z pewnością każda certyfikacja i akredytacja zwiększa wiarygodność laboratorium nie tylko w samej firmie, ale także na zewnątrz i potwierdza jego zdolność do wykonywania wiarygodnych pomiarów. Przykładowy certyfikat Polskiego Centrum Akredytacji pokazano na rycinie 3.



Ryc. 3. Certyfikat laboratorium wzorcującego [15]

Kolejne zadanie laboratorium metrologicznego to organizacja szkoleń z zakresu metrologii dla pracowników zakładu przemysłowego. Szkolenia te mają na celu m.in. podniesienie świadomości dotyczącej prawidłowego korzystania z przyrządów pomiarowych, technik pomiarowych oraz zasad wzorcowania i weryfikacji.

Następne opisywane laboratoria prowadzą badania już bardziej specyficzne. Laboratorium długości i kąta w zakładzie przemysłowym zajmuje się dokładnymi pomiarami cech geometrycznych (tj.: długości, kątów, odległości, odchyłek kształtu, kierunku i położenia, bicia, parametrów nierówności powierzchni itp.) w różnych skalach oraz wzorcowaniem wzorców, przyrządów i systemów pomiarowych służących do

mierzenia długości i kąta. Znajdują się tu m.in. suwmiarki, mikrometry, czujniki, płytki wzorcowe i wiele innych elementów wyposażenia zakładowego. Wzorcowanie części wzorców i systemów pomiarowych zlecane jest firmom zewnętrznym. Laboratorium dokonuje ponadto pomiarów cech geometrycznych produktów na różnych etapach wytwarzania i procesu produkcji. Wykorzystuje w tym celu zaawansowane systemy pomiarowe, np.: współrzędnościowe maszyny pomiarowe, przyrządy do analizy nierówności powierzchni, mikroskopy, przyrządy do pomiaru odchyłek kształtu itp. Dzięki temu możliwa jest bieżąca weryfikacja elementów z produkcji pozwalająca ocenić i monitorować zgodność wyników pomiarów z założeniami konstrukcyjnymi i technologicznymi. Przykładowy mikroskop różnicowania ogniskowego służący do pomiaru nierówności powierzchni i kształtów (w tym również narzędzi skrawających) w skali mikro i mezo przedstawiono na rycinie 4.



Ryc. 4. Mikroskop różnicowania ogniskowego [16]

Laboratorium mechaniczne przeprowadza różnego rodzaju badania w celu oceny właściwości mechanicznych przedmiotów. Badania wytrzymałościowe dotyczą np.: prób rozciągania, ściskania, zginania, skręcania i innych oraz mają za zadanie ocenić wytrzymałość i elastyczność komponentów. Wykonywane są także testy dotyczące m.in.: odporności na ścieranie, pękanie i zmęczenie materiałów w różnych warunkach. Badania twardości prowadzone są w skali Brinella, Rockwella, Vickersa, uzupełniają je badania mikrotwardości, a czasem

także nanotwardości. Laboratorium może ponadto realizować badania tribologiczne, związane m.in. z tarcieniem, zużyciem i smarowaniem. W ten sposób ocenia się właściwości smarne, opory tarcia, odporność na zużycie produkowanych części, podzespołów i całych systemów. Laboratorium mechaniczne wyposażone jest w maszyny wytrzymałościowe, twardościomierze, przyrządy do badania momentu obrotowego, tribometry oraz inne przyrządy specjalistyczne, jak np. do badań na ścieranie metodą Martindale'a (ryc. 5).



Ryc. 5. Urządzenie do badania ścieralności i mechacenia metodą Martindale'a [17]

Laboratorium materiałowe bada właściwości materiałów stosowanych w zakładzie przemysłowym. Jego funkcjonalność często zazębia się z obszarem prac prowadzonych w laboratorium mechanicznym. Podstawowe działania dotyczą analizy składu materiałów, jako że ocena zawartości konkretnych pierwiastków chemicznych warunkuje zapewnienie zgodności z wymaganiami i specyfikacjami dotyczącymi jakości oraz wytrzymałości, a także wpływa na prowadzony proces technologiczny (jeśli materiał różni się składem od wyspecyfikowanego, to inaczej przebiega np. proces obróbki skrawaniem). W tych pracach laboratorium wykorzystuje spektrometry pracujące w różnych technikach. Przykładowy spektrometr emisji optycznej ze wzbudzeniem iskrowym do analizy stopów metali zaprezentowano na rycinie 6. Opisywane laboratorium może także przeprowadzać badania termiczne, aby ocenić właściwości termiczne materiałów, takie jak: temperatura topnienia, rozszerzalność termiczna itp. Tutaj wykorzystywane są

termometry, pirometry czy komory klimatyczne. Kolejny obszar badań laboratorium materiałowego to testy odporności na warunki środowiskowe, wśród których można wymienić: testy korozji, starzenia, wilgotności, promieniowania UV itp. Takie badania pozwalają ocenić trwałość i odporność materiałów oraz produktów na działanie ekstremalnych warunków środowiskowych. Prowadzi się je przede wszystkim w specjalnych komorach, np. solnych. Dalszym rozszerzeniem tych prac są najróżniejsze testy użytkowe i wydajnościowe produktów, takie jak: testy ciśnieniowe, testy szczelności, testy wydajności mechanicznej czy elektrycznej. Ocena tych parametrów ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa, jakości i efektywności produktów. Do ich realizacji służą np. urządzenia ciśnieniowe, przyrządy do badania szczelności, a czasem specjalizowane stanowiska pod potrzeby konkretnego przedsiębiorstwa.



Ryc. 6. Spektrometr iskrowy [18]

Laboratorium metalograficzne może być częścią laboratorium materiałowego, ale zdarza się, że występuje samodzielnie, szczególnie w zakładach, dla których np. zawartość konkretnych faz w stopach jest decydująca o przydatności materiału do dalszego przetwarzania. Laboratorium to prowadzi zatem w szczególności analizę mikrostruktury materiałów metalowych, aby ocenić strukturę, obecność wtrąceń, uszkodzenia i mikrouszkodzenia wpływające na jakość materiałów. Wykorzystuje w tym celu techniki metalograficzne, które obejmują przygotowanie próbek, mikroskopię, analizę mikrostruktury, ocenę właściwości mechanicznych i chemicznych materiałów metalowych. Personel laboratorium przygotowuje próbki na drodze cięcia, szlifowania, polerowania i ewentualnego trawienia chemicznego. Proces ten ma na celu uzyskanie ich odpowiedniej powierzchni, dzięki czemu

możliwe jest dokładne badanie mikrostruktury. Mikroskopia metalograficzna (optyczna lub elektronowa) pozwala na identyfikację faz, analizę ziarnistości, porowatości, wtrąceń oraz innych cech strukturalnych. Stosuje się tu mikroskopy optyczne o dużych powiększeniach (tzw. mikroskopy metalograficzne) oraz elektronowe i transmisyjne mikroskopy skaningowe (SEM i TEM). Jako wynik swoich działań laboratorium metalograficzne przygotowuje raporty, w których przedstawia się obserwacje, analizę mikrostruktury oraz ocenę właściwości badanych materiałów. Odpowiednia interpretacja wyników jest istotna nie tylko dla oceny jakości materiałów i realizacji procesów produkcyjnych, ale również dla wdrażania odpowiednich działań korygujących.

Laboratorium chemiczne zajmuje się badaniami związanymi z procesami chemicznymi, dotyczącymi substancji wykorzystywanych szczególnie w przemyśle chemicznym. Ma ono bardzo ważne znaczenie dla zapewnienia jakości produktów i monitorowania procesów chemicznych. Przeprowadzane są w nim analizy składu chemicznego surowców, półproduktów i wyrobów gotowych. Za pomocą różnych metod analitycznych, takich jak: spektroskopia, chromatografia, analiza termiczna itp., wykwalifikowana kadra o profilu technicznym i jakościowym (inżynierowie i technicy chemicy, analitycy oraz specjaliści w dziedzinie chemii nieposiadający wykształcenia inżynierskiego) identyfikuje i ocenia liczbowo obecność i proporcje ilościowe konkretnych substancji chemicznych. Przeprowadzane są zarówno analizy jakościowe (ocena obecności określonych substancji chemicznych – związków organicznych, metali, zanieczyszczeń itp.), jak i ilościowe (pomiar proporcji tych substancji – stężenie, czystość procentowa, zawartość itp.). Laboratorium chemiczne sprawdza czystość chemiczną produktów poprzez wykrywanie obecności zanieczyszczeń, związków lotnych, metali ciężkich, substancji toksycznych itp. Prowadzi w tym celu testy polegające na analizie pierwiastkowej, badaniu zanieczyszczeń organicznych itp., wykorzystując laboratoryjny sprzęt badawczy i pomiarowy zapewniający dokładność i wiarygodność wyników pomiarowych (spektrometry, chromatografy, urządzenia do analiz termicznych, pH metry, czujniki itp.). Kolejnym zadaniem laboratorium jest monitorowanie i kontrola procesów chemicznych w przedsiębiorstwie. Weryfikacji podlegają parametry procesowe, takie jak: pH, temperatura, stężenie substancji chemicznych, czas reakcji itp. Uzyskane wyniki są konfrontowane z ustalonymi parametrami kontrolnymi i wartościami granicznymi,

a także normami i specyfikacjami branżowymi, regulacjami dotyczącymi bezpieczeństwa, środowiska itp. Przykładowy spektrometr fluorescencji rentgenowskiej pozwalający na analizę składu chemicznego, w tym również badania m.in. zgodnie z dyrektywą RoHS (*Restriction of Hazardous Substances* – unijna dyrektywa mająca na celu ograniczenie ilości niebezpiecznych substancji przenikających do środowiska) pokazano na rycinie 7.



Ryc. 7. Spektrometr fluorescencji rentgenowskiej [19]

Bezpieczeństwo i zgodność z przepisami są tu szczególnie istotne, zwłaszcza przy substancjach niebezpiecznych, a więc laboratorium chemiczne dba o przestrzeganie procedur bezpieczeństwa w pracy z wszelkimi substancjami chemicznymi i odpowiada za zgodność z przepisami dotyczącymi m.in.: bezpieczeństwa i higieny pracy, przechowywania i transportu substancji niebezpiecznych, zarządzania odpadami chemicznymi itp. Ostatnim zadaniem, jakie prowadzi laboratorium chemiczne, szczególnie w sytuacjach, kiedy zakład przemysłowy nie posiada odrębnego działu badawczo-rozwojowego, są badania nad doskonaleniem produktów i opracowywanie nowych procesów chemicznych.

Laboratorium mikrobiologiczne przeprowadza testy mikrobiologiczne w celu oceny czystości i bezpieczeństwa produktów. Jest nastawione na monitorowanie i kontrolowanie obecności mikroorganizmów, takich jak: bakterie, grzyby czy drobnoustroje, które mogą wpływać na jakość i trwałość produktów. Jest to naturalnie związane z zapewnieniem bezpieczeństwa i jakości produktów. Prowadzone są zatem testy higieniczne, aby ocenić czystość i higienę powierzchni, urządzeń, narzędzi, surowców, półproduktów i produktów gotowych

w zakładzie przemysłowym. Ich zadaniem jest w szczególności wykrywanie obecności mikroorganizmów patogennych i wskaźnikowych. W obszarze związanym z surowcami, półproduktami i wyrobami gotowymi laboratorium to przeprowadza badania mikrobiologiczne surowców w celu oceny czystości mikrobiologicznej i zgodności z normami jakościowymi. Wykrywa i liczy mikroorganizmy oraz sprawdza obecność toksyn, patogenów czy drobnoustrojów powodujących ewentualne zepsucie produktów. Szczególnie w odniesieniu do półwyrobów i wyrobów gotowych laboratorium mikrobiologiczne sprawdza, czy są zarówno one, jak i procesy w zakładzie przemysłowym prowadzące do ich uzyskania, zgodne z przepisami i normami dotyczącymi mikrobiologii żywności, kosmetyków, farmaceutyków czy innych branżowych wymagań. Kolejnym zadaniem tego laboratorium jest monitorowanie środowiska w zakładzie przemysłowym, czyli stanu powietrza, wody, gleby, ścieków itp., pod kątem obecności mikroorganizmów. Badania te pomagają w zapobieganiu zanieczyszczeniom mikrobiologicznym i kontrolowaniu jakości nie tylko środowiska pracy w zakładzie przemysłowym, ale również tego, co wydostaje się na zewnątrz. Z tym zagadnieniem związana jest ocena skuteczności procesów dezynfekcji i konserwacji, czyli weryfikacja skuteczności metod stosowanych w przedsiębiorstwie. Testy mikrobiologiczne potwierdzają, czy procesy te eliminują lub redukują mikroorganizmy w odpowiednim stopniu. Wreszcie, podobnie jak inne laboratoria, zastępując lub wspierając elementy badawczo-rozwojowe, laboratorium mikrobiologiczne może prowadzić badania w zakresie nowych metod wykrywania, kontroli i eliminacji mikroorganizmów oraz pracować nad opracowaniem innowacyjnych technologii, substancji konserwujących, probiotyków, metod pasteryzacji itp. w celu poprawy jakości i bezpieczeństwa produktów. Aby właściwie realizować swoje zadania laboratorium mikrobiologiczne powinno być wyposażone w odpowiedni sprzęt laboratoryjny, np.: mikroskopy, inkubatory, laminarne stoły przepływowe, spektrofotometry czy analizatory mikrobiologiczne. Przykładowy stereoskopowy mikroskop inspekcyjny z rozszerzonym okulem obserwacyjnym zaprezentowano na rycinie 8.



Ryc. 8. Stereoskopowy mikroskop inspekcyjny z rozszerzonym okulem obserwacyjnym [20]

Niezbędne jest również zapewnienie wysoko wykwalifikowanego personelu, takiego jak: mikrobiolodzy, technicy laboratoryjni oraz specjaliści w dziedzinie mikrobiologii przemysłowej, który ma realizować w laboratorium bardzo odpowiedzialne zadania. Istotną częścią wiedzy tego zespołu jest również świadomość zagrożeń, metod ich mitygowania i ewentualnych działań korygująco-zapobiegawczych.

Laboratorium elektrotechniczne zajmuje się badaniem, testowaniem i oceną różnych elementów, systemów komponentów, urządzeń elektrycznych i elektronicznych, wytwarzanych oraz używanych w produkcji. Przeprowadza testy elektryczne, sprawdzanie zgodności z normami bezpieczeństwa, testy kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) i inne. Działalność tego laboratorium obejmuje szeroki zakres dziedzin elektrotechniki, takich jak: energetyka, automatyka, elektronika czy telekomunikacja. Badając urządzenia elektryczne, laboratorium elektrotechniczne przeprowadza testy i pomiary na silnikach elektrycznych, przekładnikach, transformatorach, aparaturze rozdzielczej, regulatorach, falownikach, panelach sterowania itp. Testy te obejmują badanie wydajności, sprawności, parametrów elektrycznych, izolacji, bezpieczeństwa elektrycznego, a także zgodności z normami

i przepisami. Laboratorium analizuje jakość zasilania elektrycznego w zakładzie przemysłowym, sprawdzając m.in. takie parametry jak: napięcie, częstotliwość, skoki napięcia, zaniki, harmoniczne, migotanie lub asymetria. Prace te przeprowadzają pracownicy laboratorium elektrotechnicznego, czyli inżynierowie elektrycy, elektrotechnicy, elektronicy, technicy laboratoryjni, specjaliści ds. bezpieczeństwa elektrycznego i specjaliści w dziedzinie elektrotechniki, za pomocą odpowiednich narzędzi i urządzeń inspekcyjnych, diagnostycznych i pomiarowych, np. analizatorów mocy i rejestratorów zasilania oraz specjalistycznego oprogramowania do analizy danych. Kolejne zadanie laboratorium elektrotechnicznego to ocena zgodności z normami i przepisami. Personel sprawdza, czy urządzenia elektryczne spełniają obowiązujące normy, przepisy i wytyczne, np. normy bezpieczeństwa elektrycznego, normy kompatybilności elektromagnetycznej czy normy dotyczące efektywności energetycznej. Ocenia się zgodność i ewentualnie przeprowadza testy dodatkowe lub dostosowujące. Aby rozszerzyć wiedzę pracowników całego przedsiębiorstwa, laboratorium elektrotechniczne może organizować dla nich szkolenia dotyczące prawidłowego użytkowania urządzeń elektrycznych, zasad bezpieczeństwa elektrycznego, interpretacji wyników pomiarów oraz wszelkich innych zagadnień związanych z elektrotechniką. Może również pełnić rolę doradczą w zakresie doboru odpowiednich urządzeń i rozwiązań elektrotechnicznych. Wśród zadań laboratorium może się także znajdować diagnostyka i naprawa uszkodzonych urządzeń elektrycznych. W tym celu wykorzystuje się narzędzia diagnostyczne, takie jak: termowizja, analizatory składu gazowego, oscyloskopy itp., aby zlokalizować i zidentyfikować problemy oraz zaplanować i przeprowadzić odpowiednie naprawy.

2.4. Dział badawczo-rozwojowy

Coraz więcej firm w naszym kraju decyduje się na utworzenie działu lub chociaż komórki zajmującej się badaniami i rozwojem swoich produktów. Dotyczy to nie tylko dużych firm, gdzie, zwłaszcza w przypadku zagranicznych korporacji, zdarza się, że tego typu działy zlokalizowane są koncernowo, poza naszym krajem. Szczególnie istotne jest tu tworzenie tego typu struktur przez firmy średnie i małe, posiadające

polski kapitał. Z jednej strony zaczynają one postrzegać rozwój własnych produktów jako istotny element funkcjonowania, ale widzą również konieczność wydzielenia go z bieżących działań produkcyjnych. Z drugiej strony, chcąc funkcjonować na bardzo konkurencyjnym rynku, są czasami zmuszone do takich działań przez odbiorców, którzy posiadają działy badawczo-rozwojowe i chcą, aby ich produkt finalny był nie tylko odpowiednio wysokiej jakości, ale posiadał również cechy innowacyjne. Każdy dział badawczo-rozwojowy, weryfikując swoje działania, stosuje narzędzia, przyrządy i systemy metrologiczne jako integralną część wyposażenia, choć może naturalnie pewne usługi w tym zakresie zlecać podmiotom zewnętrznym. A zatem niejako definiując zakres działań, dział badań i rozwoju (R&D, czasem określany jako laboratorium badań i rozwoju albo centrum badawczo-rozwojowe) jest wyspecjalizowaną jednostką, która prowadzi badania (nierazkdo o charakterze naukowym) nad nowymi produktami, technologiami, procesami i materiałami, a także odpowiada za innowacje, doskonalenie produktów, poprawę jakości i funkcjonalności, opracowywanie prototypów, analizę wydajności i wdrażanie nowych rozwiązań w zakładzie. Ma to zapewnić firmie technologiczną przewagę konkurencyjną oraz obniżenie kosztów produkcji. Centrum wykorzystuje zaawansowane oprogramowanie CAD (ang. *computer-aided design*) i narzędzia do modelowania 3D, aby opracować wstępne projekty i przeprowadzić symulacje. Bada różne metody i technologie produkcyjne, opracowuje nowe narzędzia czy systemy. Pełni więc kluczową rolę w opracowywaniu i doskonaleniu nowych produktów, procesów oraz technologii jako miejsce, w którym przeprowadza się prace badawcze i rozwojowe, testy, analizy i eksperymenty mające na celu rozwój przedsiębiorstwa i innowacje w dziedzinie przemysłu, która go dotyczy.

Dział badań i rozwoju w zakładzie przemysłowym może zatrudniać specjalistów od konstrukcji, technologii i metrologii. Jego pracownicy to zazwyczaj inżynierowie, naukowcy (nierazkdo ze stopniem doktora), technicy laboratoryjni i specjaliści w dziedzinach naukowych związanych z daną branżą. Pod względem infrastruktury jest wyposażony w specjalistyczny sprzęt badawczy, narzędzia, oprogramowanie do przetwarzania i analizy danych oraz zaplecze laboratoryjne niezbędne do prowadzenia badań i eksperymentów. Koncentrując się na części związanej z pomiarami, dział badawczo-rozwojowy prowadzi badania często o bardzo zbliżonym charakterze do prac laboratoriów

przemysłowych, ale nie robi tego seryjnie, tylko w odniesieniu do konkretnego produktu lub fazy badawczej. Z dziedziny długości i kąta najbardziej powszechne są tu optyczne skanery pomiarowe, które są wykorzystywane do odwzorowywania kształtów opracowanych w wyniku pomysłów konstruktorskich i techniczne tomografy komputerowe, umożliwiające analizę elementów niewidocznych. Przykładowy skaner do takich zastosowań wykorzystujący światło laserowe pokazano na rycinie 9, a tomograf komputerowy na rycinie 10.



Ryc. 9. Przykładowy optyczny skaner pomiarowy wykorzystujący światło laserowe [21]



Ryc. 10. Techniczny tomograf komputerowy [22]

Bardzo często w badaniach i rozwoju zachodzi konieczność badań mechanicznych i materiałowych. Dział przeprowadza zatem badania związane z wytrzymałością, twardością i mikrotwardością oraz

cechami tribologicznymi. Przykładową maszynę wytrzymałościową zaprezentowano na rycinie 11.



Ryc. 11. Maszyna wytrzymałościowa o zakresie pomiarowym 10 kN [23]

W badaniach materiałowych istotne są analiza składu chemicznego, testy trwałości, analizy mikrostruktury i inne. Celem jednych i drugich jest najczęściej znalezienie optymalnych materiałów, które docelowo zapewnią lepszą wydajność i jakość produktów. Centrum może także prowadzić badania z zakresu procesów realizowanych w przedsiębiorstwie, w których analizuje i optymalizuje procesy produkcyjne, takie jak: technologie obróbki, formowania, spawania czy pokrywania powłokami. Przeprowadzane testy i eksperymenty mają na celu zwiększenie efektywności, poprawę jakości i redukcję kosztów produkcji. Związane są z tym również testy wydajności i niezawodności produktów. W stosunku do nowo opracowanych wyrobów badana jest odporność na ekstremalne warunki otoczenia, trwałość, stabilność, odporność na wibracje, temperaturę, wilgoć czy inne czynniki środowiskowe. Oprócz samych pomiarów, dział prowadzi także analizę danych zebranych podczas badań i testów. W tym celu wykorzystuje narzędzia statystyczne i oprogramowanie do analizy danych umożliwiające interpretowanie wyników, wyciąganie wniosków

i proponowanie dalszych kierunków rozwoju. Aby poprawnie realizować postawione przed nim zadania musi współpracować z innymi działami zakładu przemysłowego, takimi jak: konstrukcje, technologia, produkcja, kontrola i zapewnienie jakości, marketing czy dział sprzedaży. Wymienione tu działy powinny także uczestniczyć w opracowaniu nowych rozwiązań, ich wdrażaniu i doskonaleniu procesów.

Aby dobrze realizować powierzone zadania, dział badawczo-rozwojowy zajmuje się także analizą trendów rynkowych i konkurencyjnych w celu dostosowania się do zmieniających się preferencji klientów i zachowań rynkowych. Bada również poczynania konkurencji i opracowuje odpowiednie strategie działania. Bardzo często dział ten dba również o ochronę wyników swojej działalności badawczo-rozwojowej poprzez zgłaszanie patentów, rejestrację wzorów użytkowych czy utajnianie informacji handlowych.

Jako że dział badawczo-rozwojowy powinien współpracować z podmiotami zewnętrznymi, dlatego też z przyczyn ekonomicznych wyposażanie go w urządzenia, których wykorzystanie jest tylko okazjonalne, jest nieuzasadnione. Centra badawczo-rozwojowe często nawiązują więc współpracę z partnerami, takimi jak: uniwersytety, instytuty badawcze, dostawcy technologii czy inni eksperci branżowi. Współpraca ta umożliwia dostęp do dodatkowej wiedzy, zasobów i nowych perspektyw. Personel działu często uczestniczy przy tym we wspólnych projektach z placówkami badawczymi, rozwijając z jednej strony produkty zakładu, a z drugiej umiejętności własnych pracowników.

2.5. Usługi zewnętrzne o charakterze metrologicznym

Opisując dział zapewnienia jakości i działalność centrów badawczo-rozwojowych, wspomniano o ich współpracy z podmiotami zewnętrznymi. Współpraca ta jest bardzo ważna, szczególnie w obszarach, w których zakład nie posiada wystarczających kompetencji do w pełni wiarygodnej realizacji zadań. Najczęściej wynika to albo z braku kadry, albo z przyczyn ekonomicznych. Pewne prace są bowiem na tyle rzadkie, że kupowanie specjalistycznego sprzętu pomiarowego i zatrudnianie fachowców do jego obsługi po prostu się nie opłaca. Korzystniejsze jest zlecenie tych zadań wyspecjalizowanym podmiotom zewnętrznym, które usługę wykonają mniejszym kosztem, a ponadto ich personel,

zajmując się tylko zadaniami tego typu, posiada zdecydowanie większe doświadczenie i wiedzę ekspercką. A zatem w takich sytuacjach warto oprzeć się na usługach zewnętrznych. Oferują je, a w zasadzie powinny ją oferować, specjalistyczne firmy metrologiczne lub laboratoria akredytowane, które działają niezależnie od zakładów przemysłowych. Powinny one posiadać nie tylko specjalistyczną wiedzę i doświadczenie, ale także stosowne wyposażenie w zakresie pomiarów, wzorcowania i oceny zgodności wzorców lub produktów ze specyfikacjami.

Najczęściej zlecaną na zewnątrz usługą metrologiczną jest wzorcowanie przyrządów i systemów pomiarowych. Podmioty zewnętrzne realizują to dla różnych elementów wyposażenia, niektóre specjalizują się w prostych przyrządach typu suwmiarka, mikrometr czy czujnik, inne skupiają się wyłącznie na urządzeniach zaawansowanych, jak: spektrometry lub mikroskopy elektronowe. Często firmy oferujące wzorcowanie są jednocześnie dostawcami tych urządzeń na rynek, dzięki czemu budują specjalistyczną wiedzę swojego personelu w określonym (czasem dość wąskim) obszarze metrologii. Jako że wzorcowanie wymaga porównania z referencją, na wyposażeniu tych podmiotów muszą znajdować się odpowiednie wzorce z ważnymi świadectwami ich wzorcowania. Weryfikacja dostawcy powinna naturalnie zostać przeprowadzona bardzo skrupulatnie, a dobrym wskaźnikiem przy wyborze partnera jest posiadanie przez niego akredytacji laboratorium wzorcującego zgodnie z normą PN-EN ISO/IEC 17025 – Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących, której w naszym kraju udziela Polskie Centrum Akredytacji (PCA). Korzystanie z usług takiego laboratorium akredytowanego daje pełną gwarancję, że wyniki są wiarygodne i bezstronne, a akredytowany podmiot posiada personel z odpowiednią wiedzą i kompetencjami, właściwe wyposażenie oraz stosuje wiarygodne i poprawne metody badawcze. Nie bez znaczenia jest także fakt, że to po stronie wykonującego pomiary leży również obowiązek wzorcowania przyrządów pomiarowych.

Oprócz wzorcowań zakłady przemysłowe mogą zlecać także zadania pomiarowe, aby zewnętrzna wyspecjalizowana jednostka przeprowadziła ocenę zgodności produktów lub procesów z wymaganiami norm, przepisów lub specyfikacji. Firma taka musi zapewnić stosowanie odpowiednich metod pomiarowych, pozwalających na uzyskanie żądanych wartości parametrów dokładnościowych. Powinna ponadto

mieć certyfikat akredytowanego laboratorium badawczego (można go również uzyskać od PCA). Zdarzają się podmioty oferujące pomiary, w których zlecniodawca może być obserwatorem zdalnym, uczestnicząc w procesie pomiarowym, ale nie ruszając się ze swojego stanowiska pracy, co okazało się szczególnie ważne w okresie pandemii [24]. Odpowiednio zamontowane kamery pozwalają na śledzenie całego procesu, a licencja oprogramowania nawet na czynne w nim uczestnictwo.

Najczęściej zlecane pomiary dotyczą zadań metrologicznych nieopłacalnych z punktu widzenia przedsiębiorstwa, testów i badań związanych z działalnością badawczo-rozwojową lub związanych z reklamacjami czy sporami z innym podmiotem. W ostatnim przypadku zewnętrzne laboratorium funkcjonuje wtedy na zasadzie rozjemcy, a jego wyniki pozwalają ocenić sytuację bardziej obiektywnie. Pokłosiem działań weryfikacyjnych mogą być również wystawiane certyfikaty potwierdzające, że produkt spełnia określone normy i wymagania, które w pewnych branżach są nieodzowne i wymagane przy sprzedaży i handlu międzynarodowym. Ich uzyskanie, oprócz samych działań pomiarowych, często wymaga przeprowadzenia audytu, co jest kolejnym działaniem jakościowym zlecanym podmiotom zewnętrznym. Taki audyt przeprowadza się w celu oceny systemu zarządzania jakością lub różnych działań procesowych, zależnie od wymagań i oczekiwań klientów. Ostatnim ze zlecanych zadań związanych z metrologią są szkolenia metrologiczne i doradztwo z zakresu metrologii, aby zapewnić odpowiednie kwalifikacje i wiedzę personelu w zakładzie przemysłowym. Szkolenia z reguły obejmują zarówno teoretyczne aspekty metrologii, jak i praktyczne umiejętności pomiarowe oraz mogą być realizowane na zewnątrz w ośrodkach szkoleniowych lub na terenie zlecającego zakładu. Podsumowując, usługi zewnętrzne o charakterze metrologicznym mają wiele zalet, ponieważ dają zakładom przemysłowym możliwość skorzystania z wyspecjalizowanej wiedzy i doświadczenia ekspertów w dziedzinie metrologii, zapewniając niezależne i wiarygodne wyniki pomiarów, wzorcowań i ocen zgodności, a także mniejszy koszt prowadzonych działań. Taki rozwój idei outsourcingu rodzi pytanie, czy na pewno konkretny system pomiarowy jest w danej firmie niezbędny, czy nie lepiej zlecić pomiary na zewnątrz? Jest to oczywiście związane z liczbą zadań pomiarowych, ale jeśli jest ich mało, to opcja taka jest godna rozważenia. Do jej zalet, oprócz tego, że nie trzeba inwestować w urządzenie pomiarowe, należy również to, że

nie ma konieczności zatrudniania specjalistów i można wykorzystać wysoko wykwalifikowaną kadrę u zleceniobiorcy.

2.6. Podstawowe problemy metrologii przemysłowej w Polsce

Powyższy opis działalności służb metrologicznych w zakładzie przemysłowym przedstawia sytuację zbliżoną do idealnej, taką w której uwarunkowania zewnętrzne i wewnętrzne pozwalają przedsiębiorstwu na poprawne funkcjonowanie i rozwój. Rzeczywistość pomiarowa nie jest niestety taka idylliczna.

Zacznijmy od wyposażenia pomiarowego, które znajduje się w podmiotach działających w naszym kraju. Na szczęście w większości minął już okres, kiedy światowe korporacje, budując fabryki w Polsce, przynosiły m.in. urządzenia pomiarowe stare i wysłużone. Powodowało to problemy nie tylko z bieżącymi działaniami (kłopoty z instrukcjami obsługi, klawiaturą itp.), ale także z serwisem. Nowe fabryki planują wyposażenie w urządzenia nowe, przy czym bardzo często są one wybierane przez centrale. Duże firmy, a zwłaszcza korporacje są dobrze wyposażone pod względem pomiarowym. Świadomość przestoju linii z uwagi na brak akceptacji danej cechy powoduje, że nakłady na inwestycje produkcyjne obejmują także sprzęt pomiarowy. Słabością jest czasem długi proces inwestycyjny obejmujący ustalenia techniczne zbliżone do specyfikacji przetargowych. To z kolei nie pozwala działom technicznym na swobodny wybór urządzeń pomiarowych i może skutkować zakupem kolejnego urządzenia z tego samego obszaru pomiarowego, które będzie miało inne oprogramowanie i filozofię działania od tych, które są już zainstalowane i z powodzeniem wykonują swoje zadania. Działy inwestycyjne korporacji wymagają bowiem większej liczby oferentów i rezerwują sobie prawo wyboru oferty najtańszej, niezależnie od późniejszej wygody użytkowania. Mniejsze firmy, w których decyzję podejmuje dyrekcja bądź właściciel, nie mają tego typu problemów. Dla nich z kolei sama inwestycja jest wydatkiem, który musi być ze wszech miar uzasadniony – albo przez konieczność realizacji zadań pomiarowych dla własnego bezpieczeństwa, albo przez odbiorcę końcowego. W tym ostatnim duży udział mają korporacje jako klienci, ponieważ ich służby zapewnienia jakości wymuszają pewne inwestycje, aby zapewnić odpowiednią jakość dostaw. Służby

te, uzgadniając sposób pomiarów, częstotliwość kontroli, cechy krytyczne itp., w pewien sposób krzewią również wiedzę metrologiczną, co należy uznać za zjawisko cenne i pozytywne. Niemniej zdarza się, że sprzęt pomiarowy w mniejszych firmach jest starszy i wymieniany dopiero na skutek całkowitego zużycia lub awarii uniemożliwiającej jego przywrócenie do pracy, zgodnie z zasadą, że na metrologii teoretycznie najłatwiej się oszczędza (nie jest to prawda, brak wystarczającej kontroli może spowodować wysłanie wadliwych przedmiotów do odbiorcy i, w konsekwencji, bardzo kosztowną reklamację). Sytuację mocno poprawiły projekty z regionalnych programów operacyjnych lub działań krajowych (np. projekty badawczo-rozwojowe lub na tworzenie centrów badawczo-rozwojowych), dzięki którym firmy uzyskują dofinansowanie na zakup m.in. urządzeń pomiarowych. Tu jednak konieczna jest bardzo istotna uwaga: projekty badawczo-rozwojowe prowadzone przez podmioty gospodarcze muszą być realizowane wspólnie z podmiotami naukowymi (np. uczelniami), ponieważ tylko wtedy całość przedsięwzięcia ma odpowiednio mocny komponent badawczy. Praktyka prowadzenia projektów tego typu wyłącznie przez firmy pokazuje, że ich część badawcza pozostawia bardzo wiele do życzenia.

W poprzednich rozdziałach sporo miejsca poświęcono personelowi służb kontroli jakości. W tym zakresie podejście w XXI w. bardzo się zmieniło i należy podkreślić, że w dużej mierze z uwagi na intensywny rozwój sprzętu pomiarowego. Praca na współczesnych systemach pomiarowych wymaga wiedzy i świadomości metrologicznej. Niestety zapotrzebowanie przemysłu jest dużo większe niż podaż, czyli możliwości wykształcenia kadry posiadającej średnie i wyższe wykształcenie metrologiczne. Szkoły średnie ogólnokształcące nie poświęcają uwagi metrologii. Jej zagadnienia omawiane są w technikach, niemniej trudno znaleźć tam klasy o profilu pomiarowym, których zadaniem byłoby kształcenie specjalistów w tej dziedzinie. Tylko część technicznych uczelni wyższych zajmuje się badaniami z dziedziny metrologii, dla pozostałych jest to jeden z wielu przedmiotów nauczania. Coraz mniej pojawia się również specjalności lub chętnych, którzy chcieliby związać swoją przyszłość z zagadnieniami metrologii. Jest to obecnie poważny problem, skutkujący tym, że pracownicy, a nawet kierownicy w laboratoriach nie są dyplomowanymi metrologami, posiadają często tylko skończone kursy i szkolenia. Mała liczba fachowców powoduje także ich dużą fluktuację i tendencję do szukania korzystniejszych

miejsc zatrudnienia, co nierzadko jest poważnym problemem dla zakładu zatrudniającego takiego pracownika. Inną ważną konsekwencją tego stanu rzeczy jest obserwowalna w niektórych firmach niechęć zarządów do inwestowania w zaawansowane systemy pomiarowe, ponieważ wiąże się to z koniecznością poszukiwania wysoko wykwalifikowanych operatorów i ryzykiem przestoju w badaniach, jeśli z jakichś przyczyn nie będą mogli realizować powierzonych im zadań. Lekarstwem na to są firmy pomiarowe, co jest możliwe przy pewnych elementach kontroli, ale nie zapewni bieżących działań, realizowanych np. w trakcie produkcji. Poza tym firmy te również borykają się z brakami kadrowymi, choć (z reguły są to podmioty małe i średnie, specjalizujące się w określonej dziedzinie) działają bardziej elastycznie niż duże koncerny. Bezpośrednią konsekwencją mniej licznej i słabiej wyszkolonej kadry jest mniejsza świadomość metrologiczna, co powoduje np. korzystanie z usług laboratoriów nieposiadających akredytacji tam, gdzie jest to wskazane, i brak czasu na śledzenie najnowszych norm. Niestety, nie bez winy są tu również same laboratoria promujące swoje usługi za pomocą reklam przekonujących, że stosują procedury takie jak w normie i z nią zgodne, co bez akredytacji uznanego organu akredytacyjnego jest całkowicie bezwartościowe i może się skończyć poważną niezgodnością wystawioną przez audytora zewnętrznego. To pokazuje, jak ważne i odpowiedzialne zadania mają laboratoria akredytowane i jak wiele w tym zakresie jest jeszcze do zrobienia w naszym kraju. Również firmy oferujące sprzęt pomiarowy, dążąc do zwiększenia sprzedaży, mają klientów tekstami, że można mierzyć bez wiedzy metrologicznej. Mają oni na myśli wciskanie przycisku uruchamiającego pomiar i bezkrytyczne odbieranie raportów z wynikami – jest to bardzo naganna polityka, w efekcie której traci się kontrolę nad całym procesem pomiarowym, a działanie bieżące pozbawione jest świadomości czynników wpływających na wynik surowy i niepewność pomiaru. Poza tym sprzedawcy tych firm często mylą znaczenia pojęć (np. dokładność, powtarzalność, precyzja itp. [25]), wprowadzając w błąd odbiorców o mniejszej świadomości metrologicznej. Jak widać także w tym zakresie wiarygodny i odpowiedzialny partner w postaci firmy oferującej sprzęt pomiarowy z wysoko wykwalifikowanymi specjalistami jest bardzo cenny. Asertywność personelu kontroli jakości w stosunku do produkcji jest wymagana, aby nie ugiąć się pod presją tego działu, który chcąc uzyskać wynik jak najszybciej, może nalegać

na nieprzestrzeganie czasu stabilizacji termicznej (i nie tylko) przedmiotu przed pomiarem. Poza tym kolejnym problemem związanym ze świadomością metrologiczną jest brak wzorcowania przyrządów zabudowanych w liniach produkcyjnych. Bardzo często zakłada się, że taki przyrząd wzorcowaniu po prostu nie podlega, co prawdą oczywiście nie jest. Ważna jest też asertywna współpraca z działem konstrukcji, jako że według nowych norm to właśnie konstruktor bardzo często odpowiada za oznaczenia rysunkowe i dobór warunków pomiaru.

Trzeci element ściśle związany z poprzednimi dwoma to rozwój kadry, czyli przede wszystkim szkolenia. Bezspornie rozwój m.in. oprogramowania pomiarowego doprowadził do tego, że mnogość funkcji we współczesnych systemach pomiarowych wymaga od operatora bardzo dużego zaangażowania, uwagi i wiedzy, nawet jeśli i tak wielu z dostępnych funkcji nie używa. Do tego dochodzą modyfikacje starych norm i tworzenie nowych, co wymaga stałego śledzenia zmian na rynku. Przy szczupłej kadrze *stricte* metrologicznej w zakładzie pracy jest to temat trudny do opanowania. Zarządzający niechętnie zgadzają się na wysyłanie pracowników na szkolenia w godzinach pracy, bo cierpią na tym bieżące zadania pomiarowe, przy czym nawet w czasie takich szkoleń, pracownicy często muszą rozwiązywać problemy zakładowe na telefon zamiast skupić się na przekazywanych treściach.

Z tej krótkiej analizy wynika, że podstawowy element do zmiany to podniesienie świadomości metrologicznej w Polsce w nieco szerszym zakresie. Przede wszystkim należy postawić na kształcenie i szkolenia, w szczególności realizowane przez uczelnie i instytuty oferujące specjalistyczne podejście do metrologii oraz posiadające ekspertów prowadzących badania naukowe w tym obszarze. W ten zakres dobrze wpisują się programy z Funduszu Europejskiego dla Rozwoju Społecznego (FERS), które wspierają tworzenie nowych kierunków studiów (również metrologicznych) oraz kursów i szkoleń, organizowanych przez uczelnie, a także projekty rozwoju sieci naukowych, np. Narodowa Sieć Metrologii Współrzędnościowej (NSMET) [26]. Pomocne są też wszelkie seminaria i konferencje mające na celu podniesienie świadomości metrologicznej wśród specjalistów i pracowników związanych z produkcją, badaniami i kontrolą jakości. W taką działalność włącza się również główny organ odpowiedzialny za metrologię w naszym kraju, czyli GUM, który z jednej strony nadzoruje przestrzeganie przepisów metrologicznych, a z drugiej realizuje zadania z zakresu wzorcowania

i zatwierdzania typu przyrządów pomiarowych. Ważne jest też realizowanie kampanii edukacyjnych, mających za zadanie podniesienie świadomości metrologicznej wśród społeczeństwa, przez podmioty posiadające do tego odpowiednią wiedzę i kompetencje, w tym należy wspomnieć o stowarzyszeniach metrologicznych. Kolejnym istotnym aspektem jest dalszy rozwój laboratoriów akredytowanych zarówno badawczych, jak i wzorcujących. W Polsce akredytację laboratoriów metrologicznych przeprowadza Polskie Centrum Akredytacji (PCA), które jest członkiem organizacji Europejska Współpraca w dziedzinie Akredytacji (*European co-operation for Accreditation* – EA) i Międzynarodowego Forum Akredytacji (*International Accreditation Forum* – IAF). Tylko bowiem laboratoria posiadające akredytację PCA (np. placówka wzorcująca zgodnie z normą PN-EN ISO/IEC 17025 – Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących) zapewniają, że akredytowany podmiot posiada personel z odpowiednimi kompetencjami, właściwe, certyfikowane wzorce i wyposażenie do sprawdzania przyrządów, stosowną wiedzę i doświadczenie w realizacji działań kalibracyjnych, a poza tym stosuje wiarygodne i na pewno poprawne metody, co w efekcie sprawia, że wyniki wzorcowań są wiarygodne i bezstronne.

2.7. Podsumowanie diagnozy stanu metrologii przemysłowej w Polsce

Analizując sytuację w naszym kraju, można wyraźnie zauważyć, że głównym powodem problemów polskiej metrologii jest niezbyt liczna kadra. Z tego powodu obecnie dla wielu rozwijających się firm mniejszym problemem jest inwestycja w urządzenia w porównaniu z inwestycją w człowieka, który miałby się nimi posługiwać. Aby wynik pomiaru był rzetelnym odzwierciedleniem rzeczywistości, urządzenia pomiarowe i nowe technologie w nich zawarte wymagają bowiem wiedzy i zrozumienia tego, co się dzieje w trakcie procesu pomiarowego. Konieczny jest przy tym rozwój wiedzy metrologicznej i rozwój kompetencji personelu metrologicznego. W ten nurt dobrze wpisują się projekty z programów, takich jak: „Polska Metrologia” i „Doktorat wdrożeniowy”, prowadzone pod auspicjami. Jeden i drugi znalazły duże uznanie zarówno wśród kadry badawczej, jak i pracowników

przedsiębiorstw. Mam głęboką nadzieję, że dla dobra polskiego przemysłu będą one kontynuowane przez następne lata. Dobrą i stosunkowo prostą inwestycją w personel są także studia niestacjonarne i podyplomowe, realizowane na większości polskich uczelni. Na świecie jako remedium dla kadry myśli się o zastosowaniu sztucznej inteligencji (AI), również w metrologii. Jest to temat, któremu poświęca się coraz więcej uwagi [27], przewidując, że w niedalekiej przyszłości wsparcie dla operatorów z tej strony stanie się po prostu koniecznością. Jak już wspomniano, koszt zatrudnienia pracownika i jego pełnego przygotowania do pracy na nowoczesnych stanowiskach pomiarowych jest duży, a sam proces – czasochłonny, co również można przeliczyć na koszt dla przedsiębiorstwa. Bez tego natomiast, z powodu braku wystarczających umiejętności, można popełnić błąd formalny lub interpretacyjny o bardzo istotnych konsekwencjach. Sztuczna inteligencja ma zatem asystować w procesie pomiarowym i podpowiadać sugestie dotyczące każdego wyboru, a przynajmniej proponować przyjęcie opcji domyślnych dla danej aplikacji, co znacznie ułatwi pracę. Sztuczna inteligencja jest więc nadzieją dla tych, którzy poszukują pracowników i martwią się o konieczność ich długotrwałego przygotowania do pracy.

Współczesne systemy pomiarowe oparte są często o komputery o dużych mocach obliczeniowych i zaawansowanych kartach graficznych. Wadą tego jest ich stosunkowo szybkie moralne starzenie się, co powoduje konieczność stałego inwestowania w nowe urządzenia. W tym zakresie zakłady przemysłowe chętnie patrzą na wszelkie możliwości uzyskania dofinansowania, co daje możliwość utrzymania się na wysokim poziomie jako wiarygodny partner zarówno dla odbiorców końcowych, jak i dla poddostawców. Również tutaj znacząco rozwija się sztuczna inteligencja, która może być wykorzystana m.in.: do doboru warunków i strategii pomiarowych oraz technik filtracji czy parametrów nierówności powierzchni [28]. Wsparcie to znów jest szczególnie ważne dla osób mniej wykwalifikowanych oraz dla nowych przedmiotów przeznaczonych do pomiaru, kiedy nie można wprost skorzystać z istniejących doświadczeń. Można zatem założyć, że AI stanie się przedłużeniem samych ludzi, więc zamiast mówić o sztucznej inteligencji, można ją postrzegać jako inteligencję rozszerzoną [29]. Według Maxa Tegmarka [30] przyszłością badań nad sztuczną inteligencją jest zbudowanie ogólnej sztucznej inteligencji, która mogłaby osiągnąć znacznie bardziej zaawansowane cele, w tym uczenie się.

Tak wygląda stan polskiej metrologii przemysłowej *anno Domini* 2023 i skrócona wizja ogólnych kierunków rozwoju na najbliższe lata. W tym wszystkim naturalnie nie można zapominać, że każdy zakład przemysłowy, przedsiębiorstwo czy laboratorium ma przede wszystkim generować zyski, aby, oprócz zadowolenia właścicieli, zapewnić sobie środki na bieżącą działalność i dalszy rozwój. Bez tego bowiem we współczesnym konkurencyjnym świecie przetrwanie jest praktycznie niemożliwe.

3.1. Wprowadzenie do przyszłości metrologii przemysłowej

Świat współczesnej metrologii, podobnie zresztą jak rzeczywistość, która nas otacza, podlega nieustannym zmianom. Zmiany te są z jednej strony wymuszone przez wymagania odbiorców (przemysłu), a z drugiej przez rewolucję o charakterze społecznym, wynikającą z założeń Przemysłu 4.0, a ostatnio również 5.0.

Żyjemy w czasach informatyzacji niemal każdej dziedziny życia. Przemysł wkroczył w epokę cyfryzacji i Internetu rzeczy. Niezwykle istotną rolę w tym procesie transformacji pełni metrologia. Produkcja i badania mogą się tym bardziej rozwijać, im bardziej wiarygodne powstają systemy pomiarowe. Postęp elektroniki i konstrukcji szybkich detektorów optycznych, stabilnych laserów, przyczynił się do zwiększenia znaczenia metrologii optycznej. Techniki optyczne zyskały dodatkowo na znaczeniu po redefinicji jednostek układu SI, gdzie obecnie obowiązująca jednostka metra jest definiowana poprzez stałą fizyczną c (prędkość światła w próżni) oraz czas wyznaczany przy pomocy zegarów atomowych [31]. Precyzyjną „linijką” w optycznych pomiarach długości stało się koherentne (spójne) źródło światła – laser o zdefiniowanej długości fali.

Wpływ na rozwój metrologii mają naturalnie także współczesne technologie wytwarzania i zamierzenia konstrukcyjne [32]. Projektując nowe zespoły i urządzenia, konstruktorzy zmniejszają tolerancje, zwiększając wymagania odnośnie do funkcjonalności. W związku z tym obrabiarki w strategii Przemysł 4.0 również produkują przedmioty w mniejszych tolerancjach, co z kolei zmusza urządzenia pomiarowe do działania przy mniejszych największych dopuszczalnych błędach pomiaru MPE. Pojawiają się też innowacyjne sposoby wytwarzania, jak

np. wytwarzanie przyrostowe (ang. *additive manufacturing*), i związane z tym nowe aplikacje oraz wymagania dla technik pomiarowych. Wszystkie te czynniki powodują z jednej strony poszukiwanie nowych technik pomiarowych, a z drugiej nowe podejście do algorytmów stosowanych w metrologii. Opierając się o zasady fizyki i wykorzystując lepszą rozdzielczość detektorów oraz zwiększone parametry jednostek obliczeniowych, tworzone są przyrządy o rosnących możliwościach. Do tego dochodzą postępująca automatyzacja i robotyzacja, które są ukierunkowane na eliminację człowieka jako najbardziej zawodnego elementu procesu produkcji, oraz rozwój technik informatycznych (włączając komputery kwantowe jako możliwość dokonania kolejnej rewolucji przemysłowej). Pojawiają się też nowe wyzwania. Rozwijające się branże elektroniczna, optyczna i biomedyczna wymuszają nowe rozwiązania w metrologii wymiarów geometrycznych. Powodują również powstawanie nowych koncepcji związanych z komponentami mechanicznymi, ponieważ bez nich niemożliwe jest istnienie urządzeń i systemów realizujących skomplikowane zadania wykonawcze. Nie bez znaczenia jest tutaj strategia Przemysł 4.0, która zmieniła podejście do wielu elementów nie tylko w przemyśle, ale również w postrzeganiu życia codziennego. Jej metrologiczny odpowiednik, czyli Metrologia 4.0, otwiera także wiele nowych możliwości zarówno w dziedzinie wykonywania pomiarów, jak i zarządzania całym procesem pomiarowym. Pojawiają się także koncepcje metrologii długości i kąta w czterech wymiarach, wliczając w to dynamiczną zmienność wyników w czasie. Te wszystkie elementy wpływają na możliwość konstruowania nowych i ulepszonych przyrządów pomiarowych. Przyrządy te z kolei wymagają nie tylko zaawansowanych rozwiązań mechanicznych i elektronicznych pozwalających na uzyskiwanie wiarygodnych wyników pomiarów i właściwe wzorcowanie. Potrzebują również coraz bardziej zaawansowanych rozwiązań informatycznych, opartych o właściwe elementy hardware i coraz bardziej rozbudowany software, którego jedną z misji staje się wspomaganie i wyręczenie operatora w podejmowaniu trudnych decyzji.

I taka w zarysie ogólnym jest przyszłość metrologii przemysłowej.

3.2. Nowe systemy i rozwiązania pomiarowe

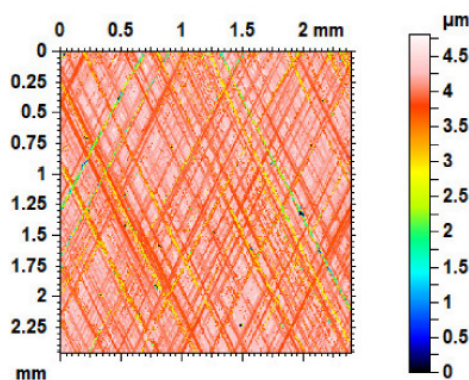
Rozwój metrologii przemysłowej, podobnie jak innych obszarów działalności podmiotów przemysłowych, jest rzeczą normalną i w pewnym sensie nieuchronną. Wymusza to produkcja i rozwój wyrobów jako naturalną konsekwencję chęci podnoszenia jakości. Wzrost możliwości przyrządów pomiarowych jest zatem nierozzerwalnie związany z wymaganiami, jakie stawia przed nimi przemysł.

W zastosowaniach przemysłowych zauważalne są dwie tendencje tworzenia nowych przyrządów pomiarowych. Pierwszą jest wysoka specjalizacja systemów, które mają pracować w linii lub tuż obok niej. Są one najczęściej praktycznie bezobsługowe i wykonują ściśle określone zadania, stąd jakiegokolwiek dodatkowe możliwości są całkowicie zbędne. Druga tendencja dotyczy urządzeń stosowanych do badań laboratoryjnych i często jest odwrotna. Dokładane są nowe czujniki, możliwości pomiarowe i opcje oprogramowania. Ważnym elementem Metrologii 4.0 są zatem rozwiązania multisensoryczne [33]. Zawsze aktualnym pozostaje pytanie, ile pracy ma samo urządzenie i czy pomiary multisensorowe (zwłaszcza w różnych skalach) są efektywne, czy jednak warto realizować je za pomocą dwóch oddzielnych urządzeń. To zależy oczywiście od konkretnego zadania pomiarowego i miejsca pomiaru – laboratorium zawsze będzie bardziej szukać rozwiązań uniwersalnych, a produkcja specjalizowanych. Ponadto w samych urządzeniach pomiarowych będą pojawiać się nowe sensory, komunikujące się pomiędzy sobą, a także z otoczeniem zewnętrznym. Uzyskane informacje przyczynią się do lepszego kontrolowania procesu pomiarowego (a co za tym idzie również produkcyjnego) oraz docelowo konstruowania jeszcze bardziej inteligentnych systemów pomiarowych.

Kolejna zmiana w metrologii już się rozpoczęła i wiąże się z zastosowaniem nowych technologii wytwarzania. Jedną z nich jest wytwarzanie przyrostowe (potocznie określane jako druk 3D), które wymusiło nowe podejście metrologiczne [34]. Zrewolucjonizowało ono obszar wytwarzania, a przez to również metrologię, m.in. wielkości geometrycznych [35]. Takie podejście pozwala tworzyć obiekty fizyczne bezpośrednio z modelu cyfrowego. Proces pomiaru wygląda inaczej niż w przypadku tradycyjnych sposobów wytwarzania, przede wszystkim z uwagi na zupełnie inną strukturę uzyskiwanych przedmiotów. Jedną z ważnych zalet druku 3D w metrologii wielkości geometrycznych jest

możliwość tworzenia złożonych geometrii i kształtów, które są trudne lub niemożliwe do zmierzenia przy użyciu tradycyjnych metod. Jako kolejną należy wymienić możliwość szybkiego i łatwego tworzenia modeli. Umożliwia to ekspertom tworzenie wielu fizycznych modeli tej samej części wykorzystywanych do pomiarów, kontroli i analizy. Druk 3D jest również przydatnym narzędziem do tworzenia uchwytów i przyrządów, które są używane do zamocowania części podczas pomiarów. Są to z reguły niestandardowe uchwyty i przyrządy, dostosowane do konkretnych potrzeb mierzonej części. Poprawia to parametry dokładnościowe oraz zmniejsza ryzyko wystąpienia niepoprawnych pomiarów. Wytwarzanie przyrostowe niesie ze sobą struktury porowate, a te weryfikować pozwala tomografia komputerowa. Jej powszechne zastosowanie w przemyśle to perspektywa następnych lat. Badania materiałowe struktur uzyskanych technologiami addytywnymi także mają swoją określoną specyfikę.

Jeszcze kilka, kilkanaście lat temu przemysł motoryzacyjny napędzał wiele aspektów i obszarów metrologii. Było to związane z silnikami spalinowymi, bardzo zaawansowanymi technologicznie. Pojazdy z napędem elektrycznym są natomiast o wiele prostsze i nie wymagają tak dużej liczby elementów o tak złożonym kształcie i wymaganiach dokładnościowych. Przykładem jest powierzchnia po honowaniu plateau (gładzeniu płaskowierzchołkowym) pokazana na rycinie 12.



Ryc. 12. Topograficzny obraz powierzchni po honowaniu plateau

Mniejsze wymagania przemysłu motoryzacyjnego powodują określone konsekwencje dla rozwoju przyrządów pomiarowych w tym zakresie. Cały czas bardzo wysokie wymagania są domeną przemysłu

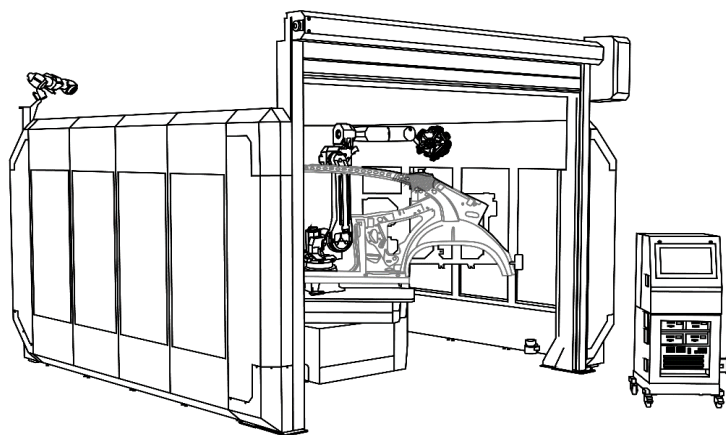
lotniczego (i kosmicznego) oraz elektronicznego, ale skala jest tu mniejsza. To z kolei powoduje bardziej dynamiczny rozwój oprogramowania zamiast części mechanicznych przyrządów i aplikacji nowych metod pomiarowych.

3.3. Automatyzacja i robotyzacja

Tendencja zastępowania rąk ludzkich automatami i urządzeniami zmechanizowanymi, a także robotami przemysłowymi powoduje w wielu aspektach zastąpienie również prostych przyrządów pomiarowych przez systemy pomiarowe o zdecydowanie większym stopniu złożoności. Kolejnym czynnikiem warunkującym automatyzację i robotyzację są rosnące koszty pracy (zwłaszcza w Europie) oraz coraz bardziej popularna idea *work life balance*, sprawiająca, że pracownik coraz bardziej myśli o własnym komforcie, a nie o realiach przemysłowych. Jednakże koszty urządzeń automatycznych i robotów relatywnie maleją, co powoduje, że stają się one dostępne nawet w mniejszych przedsiębiorstwach. Ten kierunek jest zatem jedyną alternatywą dla opcji i perspektywy ucieczki producentów z Europy. Wyręczenie człowieka ma też głębokie uzasadnienie merytoryczne, ponieważ to właśnie operator jest często najbardziej niewiarygodnym elementem toru pomiarowego. Automatyzacja i robotyzacja to zatem coraz ważniejsze trendy w metrologii wielkości geometrycznych, ponieważ pomagają w zwiększeniu wydajności procesów pomiarowych. Robotyczne systemy pomiarowe, zaprojektowane w celu zautomatyzowania procesu pomiaru części, komponentów i produktów, można zaprogramować tak, aby wykonywały serię pomiarów. Ich jednostki przetwarzające mogą automatycznie generować raporty i przeprowadzać analizę statystyczną danych pomiarowych.

Pomiary przeszły ewolucyjną drogę pod względem automatyzacji. Na początku polegały na czynnościach wyłącznie manualnych, w których zarówno sam proces, jak i wszystkie przemieszczenia wykonywane były przez operatora. Następnym krokiem była mechanizacja, gdzie ruchy poszczególnych elementów wykonywane były dzięki energii zewnętrznej. Operator był odpowiedzialny jedynie za wyłączenie napędu po dojściu do zadanej pozycji. Kolejny etap, czyli automatyzacja, doprowadził do przesunięcia operatora do roli osoby

odpowiedzialnej za przekazanie danych do sterownika. Można zatem powiedzieć, że w urządzeniach pomiarowych osiągnęła ona poziom, w którym opcja komputerowego sterowania numerycznego (ang. *computerized numerical control* – CNC) stała się pewnego rodzaju standardem. Przemieszczenia elementów wykonawczych współczesnych systemów pomiarowych czy stolików z przedmiotami realizowane są automatycznie. Operator wybiera stosowny program pomiarowy i resztę realizuje urządzenie. Powtarzalność najazdów i pozycji pomiarowych jest wystarczająca do tego, żeby głowica lub system optyczny znalazły się w zakresie pomiarowym, a osiągnęte niepewności pomiarów były w pełni satysfakcjonujące [36]. Do tego niektóre urządzenia mają możliwość działania z robotem lub kobotem, czyli robotem współpracującym, dzięki czemu urzeczywistnia się ideę metrologii jak najbliżej produkcji (bezpośrednio w linii produkcyjnej – *in-line*, lub równoległe z nią – *at-line*). Ich bardziej zaawansowane wykorzystanie odbywa się w zautomatyzowanych celach pomiarowych, gdzie instaluje się roboty produkcyjne, o dużych prędkościach ustawczych i roboczych. Na rycinie 13 pokazano optyczny skaner współrzędnościowy na robocie i wygląd przykładowej celi pomiarowej.



Ryc. 13. Skaner na robocie i celi pomiarowa

Takie rozwiązanie jest przykładem automatyzacji skanowania w koncepcji Metrologia 4.0 w obszarze metrologii wielkości geometrycznych. Cechuje się ono pracą w niezależnej celi pomiarowej z systemem załadoczym. Głowica skanera współpracuje z trackerem śledzącym jej położenie w sposób ciągły, co pozwala na pracę bez

dodatkowych znaczników, których nakładanie jest szczególnie uciążliwe i czasochłonne. Układ laserowych promieni świetlnych pozwala bez konieczności matowienia mierzyć jednocześnie powierzchnie o różnych kolorach, pochłaniające i odbijające promieniowanie. Tracker umożliwia ponadto uzyskanie lepszych parametrów dokładnościowych dzięki automatycznej fotogrametrii. W ten sposób system posiada tzw. referencję dynamiczną i może mierzyć także przy wykorzystaniu ruchu kąтового na zintegrowanym stole obrotowym. Zadaniem operatora jest zaprogramowanie pomiaru i uruchomienie platformy, a wszystkie dalsze czynności wykonywane są automatycznie, bez jego obecności. Celem ma zabezpieczenia uniemożliwiające wejście do środka w czasie trwania pomiaru. System wyposażono w możliwość realizacji automatycznej kalibracji za pomocą specjalnego wzorca i modułu oprogramowania. Dodatkowym elementem wpisującym się w koncepcję Metrologia 4.0 jest system kamer umożliwiający śledzenie procesu pomiarowego. Obserwator znajdujący się często bardzo daleko od systemu pomiarowego otrzymuje wiadomość z linkiem dostępu i za pomocą układu kamer może na bieżąco obserwować pracę wspomnianego systemu. Kamery są zamontowane na ściankach celi pomiarowej lub na głowicy robota przemieszczającego się z głowicą pomiarową. Dzięki temu z jednej strony obserwator w oddalonej lokacji na bieżąco weryfikuje strategię pomiarową, a z drugiej może śledzić uzyskiwane wyniki pomiarów, nie ruszając się ze swojego miejsca pracy.

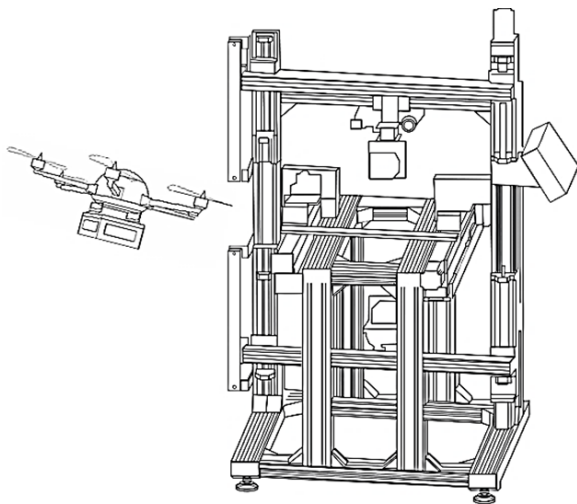
Koboty i roboty stają się w Metrologii 4.0 codziennością [37]. Ich wykorzystanie pozwala coraz bardziej uniezależnić się od człowieka, jako, niestety, najbardziej nieprzewidywalnego elementu procesu pomiarowego. Pozwalają one też w wielu wypadkach skrócić czas realizacji procesu pomiarowego. Operator jest również z punktu widzenia zjawisk cieplnych bardzo istotnym elementem wpływającym na niepewność pomiaru. To również sprawia, że przyszłość systemów pomiarowych kojarzona jest z rosnącą automatyzacją.

Urządzenia pomiarowe są, jak widać, konsekwentnie montowane na różnych urządzeniach transportujących, w tym robotach pracujących w trybie stacjonarnym, prowadnicach liniowych, stołach obrotowych itp. Istnieją jednak sytuacje, takie jak np. potrzeba skanowania wnętrza złożonego, wielkogabarytowego korpusu lub systemu rur, gdzie żadna z tych opcji nie może rozwiązać problemu. Do takich celów można wykorzystać robota mobilnego, a w szczególności kroczącego

z możliwością poruszania się po wnętrzach niezależnie od przeszkód na jego drodze. Roboty mobilne można podzielić [38] na: roboty kołowe (które poruszają się za pomocą obracających się kół), roboty gąsienicowe (które poruszają się za pomocą gąsienic) i roboty kroczące (które poruszają się za pomocą kończyn, podobnie jak większość zwierząt). Kluczową cechą odróżniającą roboty kroczące od robotów kołowych (i gąsienicowych) jest ślad kontaktu z podłożem niebędący linią ciągłą, ale seria oddzielonych od siebie punktów. Roboty kroczące są najbardziej skomplikowane w projektowaniu i kontrolowaniu (zarówno pod względem kontroli ruchu, jak i stabilności) oraz wymagają więcej energii do poruszania się. Są jednak znacznie bardziej wszechstronne i zdolne do poruszania się w środowiskach, w których pojazdy kołowe mogą mieć trudności. Ich zaletą jest także możliwość pokonywania nieprzewidzianych przeszkód na swojej drodze [39]. Najpopularniejsze roboty są dwunożne, z chodem wzorowanym na ludzkim, czworonożne, wzorowane na ssakach lub gadach, oraz sześćcionożne, zwykle wzorowane na owadach. Stanowią one kluczowy obszar w dziedzinie robotyki, wykazując potencjał do wykonywania różnych zadań w trudnym terenie i warunkach, w których roboty kołowe lub gąsienicowe napotykały ograniczenia [40]. Robot kroczący może zatem przenosić urządzenia pomiarowe i realizować zadania z różnych obszarów metrologii przemysłowej zarówno pod względem inspekcyjnym, jak i *stricte* pomiarowym.

Oprócz robotów w pracach metrologicznych rozważa się także wykorzystanie dronów, co w pewnym sensie jest naturalną konsekwencją przedstawionej powyżej możliwości stosowania robotów kroczących [41]. Drony w najprostszym układzie mogą być wykorzystywane do obserwacji pomiarów w miejscach, w których obecność człowieka jest niepożądana lub niewskazana, albo z powodów termicznych (dron generuje dużo mniej energii cieplnej od operatora) czy też związanych z bezpieczeństwem. Operator będzie obserwować przebieg pomiaru za pomocą umieszczonych na dronie kamer, sterując urządzeniem tak, aby uzyskany obraz przekazywał wszystkie niezbędne informacje. W bardziej zaawansowanej wersji osoba znajdująca się w zdalnej lokacji może także ingerować w proces pomiarowy z poziomu oprogramowania. Do poprawnej realizacji procesu obserwacji dron powinien mieć określoną przestrzeń poruszania się w celu uniknięcia kolizji z urządzeniem, robotem lub zamocowanym przedmiotem.

Jego możliwość wejścia w strefę, w której może znaleźć się element na trajektorii kolizyjnej powinna zostać zasygnalizowana lub uniemożliwiona. Jeśli natomiast pozwolimy dronowi na wejście w potencjalną strefę kolizji, to samo urządzenie musi zostać wyposażone w czujniki zbliżeniowe wykrywające zbliżający się obiekt (np. ramię robota lub stół obrotowy z mierzonym przedmiotem) i uruchamiające jego szybką ewakuację ze strefy zagrożonej do bezpiecznej pozycji poza nią. Dron może też zostać potraktowany jako urządzenie przenoszące mierzone przedmioty, czyli jako system transportowy (ryc. 14).

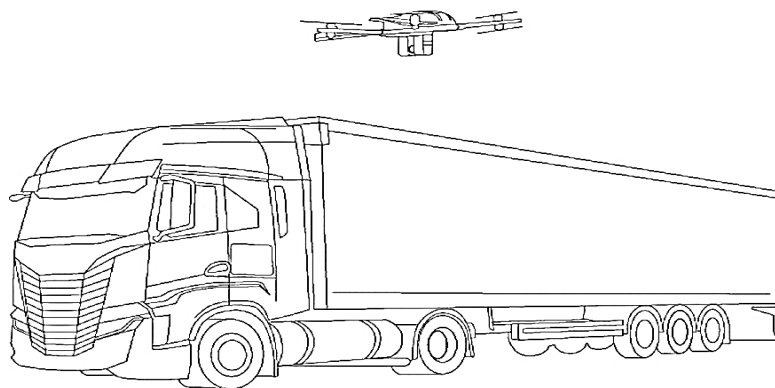


Ryc. 14. Dron jako system transportujący przedmiot

Zadanie drona sprowadza się do przemieszczania przedmiotów, ich pobierania z magazynu, zanieśienia na stanowisko pomiarowe, a następnie odłożenie do magazynu. Dron musi w tym celu posiadać specjalne uchwyty zapewniające stabilne mocowanie mierzonego przedmiotu, zależne naturalnie od jego cech geometrycznych. Musi także komunikować się z centralnym systemem sterującym, aby uzyskać informację, jak ułożone są przedmioty i który z nich należy wybrać. Takie sekwencje kodów funkcjonują już dla robotów, więc ich przekształcenie dla drona nie nastręcza większych problemów. Pozostaje jeszcze kwestia transportu zmierzonego przedmiotu na miejsce przechowywania lub do izolatora braków. W zależności od obciążenia zadaniami pomiarowymi opisaną funkcję może realizować ten sam dron (jednostka 1) lub, w przypadku dużego natężenia pracy, oddzielna jednostka latająca (jednostka 2). Odbiera ona zmierzony przedmiot od

urządzenia pomiarowego i otrzymuje informację, czy jest on poprawny, błędny lub wymaga interwencji operatora (w tym czasie jednostka 1 czeka już z kolejnym przedmiotem). W zależności od statusu części zmierzonej jest ona transportowana i odkładana na odpowiednie pole. Jest to sytuacja analogiczna do tej, kiedy dron znajduje zastosowanie w zarządzaniu magazynem [42].

Kolejnym możliwym wykorzystaniem jest zastosowanie drona nie do trzymania mierzonego przedmiotu, ale do przemieszczania urządzenia pomiarowego. Musi ono być oczywiście na tyle lekkie i wygodne do przemieszczania, aby dron był w stanie je udźwignąć. Schemat pomiaru przedmiotu ze skanera przedstawiono na rycinie 15.

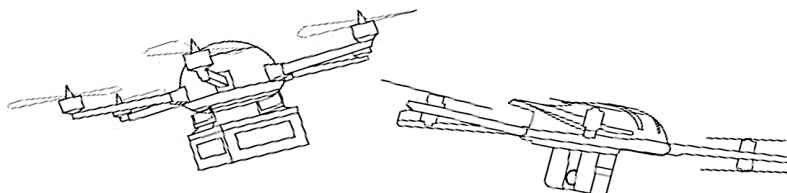


Ryc. 15. Dron przemieszczający skaner wokół mierzonego przedmiotu

Ta koncepcja jest analogiczna do zastosowania robota kroczącego. Dron zastępuje albo rękę człowieka (pomiar ręczny) albo ramię robota. Jest to szczególnie przydatne przy dużych przedmiotach mierzonych, dla których jeden robot jest z reguły niewystarczający (co mocno komplikuje proces pomiarowy i powoduje wzrost ceny rozwiązania). Dron zastępujący operatora przemieszcza się po trajektorii zaprogramowanej (na podstawie ręcznego pomiaru pierwszego przedmiotu lub operacji na pliku CAD) albo określonej na bieżąco przez systemy wizyjne (jeśli jest w nie wyposażony). Rozwinięciem tej sytuacji w metrologii wielkości geometrycznych jest choćby rozbudowa systemu i zastosowanie większej liczby dronów z różnymi urządzeniami pomiarowymi (mogą to być np.: głowice stykowe, skanery, linijki laserowe [43], głowice konfokalne, systemy interferometryczne światła białego

lub rozproszenia światła itp.), jednocześnie mierzącymi różne obszary tego samego przedmiotu w tym samym układzie współrzędnych albo jeden dron niosący kilka kamer [44]. Naturalnie, na końcową jakość uzyskanych informacji istotny wpływ ma również dalsza fuzja danych pochodzących z urządzeń umieszczonych na dronach i biorących udział w procesie pomiaru i lokalizacji [45].

Następną opcją jest zastosowanie drona do trzymania przedmiotu, przy nieruchomym urządzeniu pomiarowym. W tym przypadku przedmiot musi mieć odpowiednio małą masę. Stacjonarne urządzenie realizuje proces pomiarowy, a ruchy wokół niego wykonuje przedmiot trzymany przez jednostkę latającą. Można także zaproponować rozwiązanie, w którym jeden dron trzyma przedmiot, a drugi trzyma skaner (ryc. 16).



Ryc. 16. Dwa drony, z których jeden zarządza skanerem, a drugi mierzonym przedmiotem

Kolejny, najbardziej rozbudowany wariant polega na zastosowaniu dwóch dronów pracujących w duecie, przekazujących sobie przedmiot w czasie pomiaru. Opcja ta, np. przy digitalizacji obiektu, związana jest z koniecznością zeskanowania całego kształtu przedmiotu, łącznie z miejscami, w których przedmiot jest trzymany przez bezzałogowy statek powietrzny UAV (ang. *unmanned aerial vehicle*). W takiej sytuacji urządzenie pomiarowe w pierwszym kroku zbiera dane obiektu trzymanego przez drona 1. Po zakończeniu tego etapu dron 2 przejmuje przedmiot, chwytając go w innych miejscach niż dron 1. Po przejściu, system do digitalizacji zbiera dane po raz drugi, a oprogramowanie łączy wszystkie skany, pozwalając uzyskać dane z całego przedmiotu.

Przemysł przyszłości to także kontrola wymiarowa blisko produkcji, a więc najlepiej w linii produkcyjnej. Pomiary w linii obejmują wykorzystanie systemów pomiarowych często zintegrowanych z samym procesem produkcyjnym. Umożliwia to wykonywanie pomiarów na różnych etapach procesu produkcyjnego i pomaga w identyfikacji

i korygowaniu problemów jakościowych w czasie rzeczywistym. Systemy pomiarowe w linii produkcyjnej mogą być wykorzystywane do monitorowania charakterystyk wymiarowych części oraz produktów, a także do dwustanowej inspekcji jakościowej (ocena dobry – zły). Pomiary w linii produkcyjnej wiążą się ściśle z automatyzacją i robotyzacją procesów pomiarowych, coraz bardziej obecnymi w naszym przemyśle. Opierają się one zarówno na klasycznych urządzeniach pomiarowych, jak i systemach, np. na bazie kamer przeznaczonych bardziej do inspekcji. Również w tym przypadku optyka, z uwagi na szybkość realizacji zadań, odgrywa dominującą rolę. Pomiary w linii wymagają także odpowiedniego podejścia do wzorcowań zamontowanych w niej czy przy niej urządzeń pomiarowych. Proces wzorcowania powinien być również prowadzony w linii, bez jej wyłączania, aby warunki weryfikacji systemu pomiarowego były jak najbardziej zbliżone do rzeczywistych.

W następującej rzeczywistości komunikacja, odgrywająca bardzo ważną rolę pomiędzy ludźmi, będzie się rozwijać również pomiędzy systemami oraz ich elementami składowymi, a także poszczególnymi sensorami do nich należącymi. Doniosłą rolę ma odegrać Internet rzeczy (ang. *Internet of Things* – IoT) oraz sztuczna inteligencja. Według koncepcji IoT wszystkie elementy, a nawet przedmioty są jednoznacznie identyfikowalne. W ten sposób w urządzeniach pomiarowych będą instalowane zbiory różnych czujników monitorujących ich parametry oraz przekazujących zebrane informacje do dalszych analiz i systemów podejmowania decyzji. Wśród tych informacji będą naturalnie te związane z prowadzonym procesem pomiarowym i warunkami otoczenia (temperatura, ciśnienie, wilgotność powietrza), ale także te związane ze stanem poszczególnych podzespołów urządzenia. Na ich podstawie będzie można podjąć decyzję o ewentualnym przerwaniu pomiaru z uwagi na możliwość wzrostu wartości błędów pomiarowych.

Elementem komunikacji jest też możliwość wykorzystania rzeczywistości rozszerzonej lub wirtualnej. Rzeczywistość rozszerzona (ang. *augmented reality* – AR) polega na wykorzystaniu generowanego komputerowo obrazu lub nakładki, która jest nakładana na widok użytkownika w świecie rzeczywistym za pomocą prostych narzędzi komunikacyjnych, np. smartfona. Na jego ekranie na widoku maszyny mogą się pojawić informacje o temperaturze w wybranych miejscach,

operatorze, czasie pomiarowym, zadaniu itp. Przykładowy obraz pokazano na rycinie 17.



Ryc. 17. Przykładowy obraz z aplikacji wykorzystującej rzeczywistość rozszerzoną

W kontekście metrologii wielkości geometrycznych, AR może być wykorzystana do poprawy parametrów dokładnościowych, szybkości i łatwości użycia systemów pomiarowych. Pozwala na wizualizację i porównywanie części. Umożliwia ona użytkownikom nakładanie modeli 3D na obiekty świata rzeczywistego i zapewnia wirtualną reprezentację mierzonej części. Jednym z zastosowań AR w prezentowanym obszarze jest osiowanie i pozycjonowanie narzędzi pomiarowych. Można ją wykorzystać do nałożenia wirtualnego obrazu części lub produktu na świat rzeczywisty, co pozwala użytkownikowi na precyzyjne ustawienie i pozycjonowanie narzędzia pomiarowego względem części lub produktu. Dzięki temu można zredukować błędy pomiarowe i zaoszczędzić czas. Rzeczywistość rozszerzoną można również wykorzystać do zapewnienia użytkownikowi wskazówek w czasie rzeczywistym podczas procesu pomiarowego. Możliwe jest np. nałożenie wirtualnego obrazu prawidłowej ścieżki pomiarowej lub sekwencji na świat rzeczywisty, prowadząc użytkownika i wspierając proces pomiarowy. Rzeczywistość rozszerzoną wykorzystuje się też do nałożenia wirtualnego obrazu danych pomiarowych na świat rzeczywisty, umożliwiając użytkownikowi ich przeglądanie i analizowanie w czasie rzeczywistym przy użyciu prostych narzędzi komunikacyjnych, takich jak smartfon. Na jego ekranie w widoku maszyny mogą pojawić się informacje o temperaturze w wybranych miejscach, operatorze, czasie pomiaru,

zadaniu itp. W połączeniu z technologią *Big Data* AR może pomóc w identyfikacji trendów oraz umożliwić szybsze podejmowanie decyzji. W miarę rozwoju tej technologii, najprawdopodobniej zobaczymy zdecydowanie więcej takich aplikacji w metrologii wielkości geometrycznych. Zapotrzebowanie na takie technologie powoduje powstawanie nowych specjalistycznych rozwiązań programowych i sprzętowych, których zastosowanie i dostępność są diametralnie różne w porównaniu do przeszłości.

Rzeczywistość wirtualna (ang. *virtual reality* – VR) to dalsze rozszerzenie możliwości pomiarowych. Obejmuje ona wykorzystanie komputerowo wygenerowanych środowisk, z którymi można wchodzić w interakcje w realistyczny i wciągający sposób. W takim aspekcie VR może być wykorzystywana do symulacji środowisk pomiarowych, umożliwiając użytkownikom wykonywanie wirtualnych pomiarów na wirtualnych częściach lub produktach. Możliwość zrealizowania pomiaru na obiekcie wirtualnym to nie tylko wcześniejsze wykrycie błędów w programie pomiarowym na pojedynczym urządzeniu, ale także symulacja pomiarów w wielu skalach wykorzystująca różne systemy pomiarowe. Jednym z ważnych zastosowań rzeczywistości wirtualnej w metrologii jest szkolenie użytkowników, dzięki tworzeniu realistycznych symulacji środowisk pomiarowych, umożliwiając ćwiczenie technik i procedur pomiarowych w bezpiecznym i kontrolowanym środowisku. Jest to przyczynek do zmniejszenia ryzyka wystąpienia błędów operatora. Rzeczywistość wirtualną można również wykorzystać do wizualizacji i analizy danych pomiarowych, tworząc wirtualne reprezentacje części i ich danych pomiarowych, aby lepiej pokazać zależności między różnymi cechami pomiarowymi. Podobnie jak w przypadku AR pomaga to w identyfikacji trendów w danych i szybszym podejmowaniu decyzji. Innym zastosowaniem VR w metrologii jest projektowanie i optymalizacja systemów pomiarowych. Tworząc wirtualne reprezentacje systemów i środowisk pomiarowych, specjaliści mogą symulować zachowanie systemów oraz udoskonalać konstrukcje.

W tym zakresie jednak rozważa się także pewne zagrożenia. Mianowicie, w mentalności człowieka już teraz pojawiają się: wielozadaniowość na stałe, tylko pobieżne zapoznawanie się z informacjami oraz uzależnienie od technologii mobilnych i sieci. Wymienione aspekty nie zawsze są postrzegane jako elementy pozytywne. Obserwujemy

również zmiany fizjologiczne wynikające z tego, że praca tradycyjna powodująca obciążenie mięśni ramion, przedramion i dłoni, zastępowana jest przez działania obciążające mięśnie palców, oczu i głowy. Poza tym, głębsze zanurzenie w rzeczywistości wirtualnej to ryzyko zmian w psychice związanych z izolacją i poczuciem odosobnienia. Z tego powodu, aplikacje rzeczywistości wirtualnej wprowadzane są obecnie wolniej niż można było tego oczekiwać jeszcze parę lat temu.

3.4. Informatyzacja w metrologii

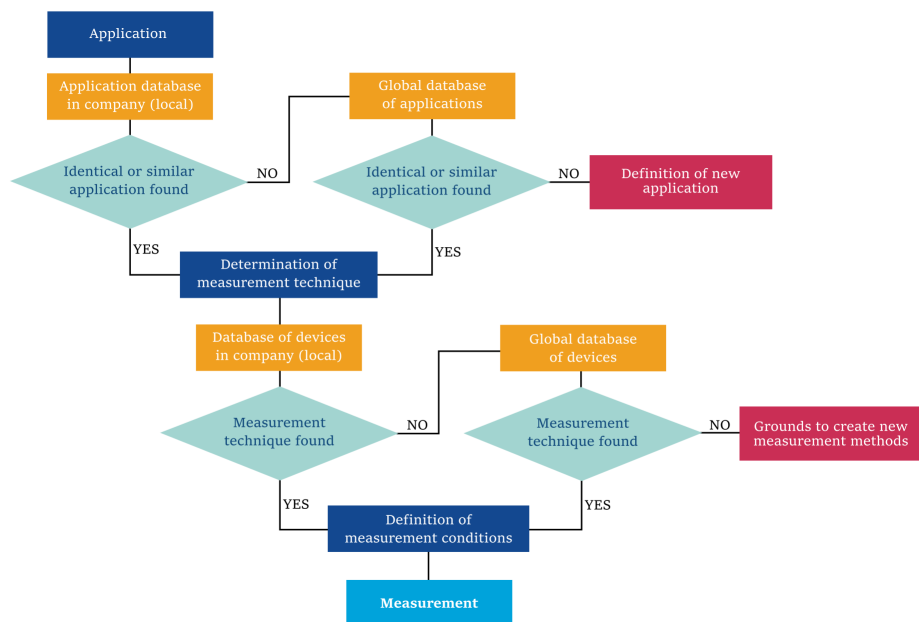
Przyszłość metrologii to także informatyzacja zarówno pod kątem hardware'owym, jak i – a może przede wszystkim – software'owym. Współczesne urządzenia pomiarowe mają często bardzo dużo różnych opcji i możliwości oraz warunków pomiarowych, jakie można ustawić, przez co wymagają od osób je obsługujących coraz większej wiedzy i umiejętności. Jako że operator powoli staje się towarem deficytowym i bardzo kosztownym z punktu widzenia zarządzania procesem wytwarzania, pewną jego namiastkę mają stanowić procedury wspierające oparte na sztucznej inteligencji. Właśnie ten szybko rosnący koszt zatrudnienia pracownika i jego bardzo czasochłonne pełne przygotowanie do pracy na nowoczesnych przyrządach są czynnikami mocno faworyzującymi wszelkie prace w obszarze sztucznej inteligencji na polu metrologii. Należy brać również pod uwagę, że w czasie przygotowania nie w pełni wykształcony i przeszkolony pracownik ze względu na brak doświadczenia i słabą znajomość poszczególnych czynności, może popełnić błąd o znaczących konsekwencjach. Poza tym rosnąca liczba opcji oferowana przez producentów oprogramowania pomiarowego mocno zwiększa jego możliwości, to jednak powoduje również pewne utrudnienia związane z samym wyborem. Według wiedzy psychologicznej zbyt duża liczba opcji do wyboru jest dla człowieka źródłem stresu i może również powodować poczucie paraliżu i niezadowolenia [30]. A zatem jakakolwiek podpowiedź ze strony systemu informatycznego dotycząca tego wyboru może się okazać znacznym ułatwieniem pracy. Pewnym rozwiązaniem jest też zaproponowanie przez twórców systemu pomiarowego opcji domyślnych, opracowanych na bazie dotychczasowych doświadczeń i aplikacji. Rozwijając tę myśl, dochodzimy do aplikacji opartych na rozszerzonej lub wirtualnej

rzeczywistości oraz sztucznej inteligencji, które mogą być użyteczne zwłaszcza w procesach decyzyjnych. Dzięki takim rozwiązaniom możliwe stanie się sprawne i szybkie podejmowanie decyzji zgodnie z użytymi danymi i informacjami z bazy wiedzy tworzonej i rozwijanej na podstawie wcześniejszych zadań. To wszystko pokazuje, że zastosowanie metod sztucznej inteligencji w metrologii w najbliższej przyszłości stanie się po prostu koniecznością [46].

Sztuczna inteligencja (ang. *artificial intelligence* – AI), od momentu powstania pierwszych koncepcji na ten temat, wywiera istotny wpływ na różne dziedziny nauki i sfery życia każdego człowieka. Coraz częściej okazuje się, że jej chociażby podstawowe elementy są nieodzowne w otaczającym nas świecie i – chociaż często nieświadomie – chętnie korzystamy z dobrodziejstw, jakie ze sobą niesie. Obszar związany z aparaturą pomiarową i pomiarami samymi w sobie (ang. *Instrumentation and Measurements* – I&M) jest tu jednym z przykładów, w których pole aplikacyjne wciąż rośnie. Można przy tym założyć, że zastosowanie AI w I&M ma pozwolić na uproszczenie całej procedury pomiarowej z punktu widzenia operatora oraz przyczynić do poprawienia parametrów dokładnościowych metody pomiarowej lub przyrządu pomiarowego [47]. Ogólnie rzecz ujmując, metody AI umożliwiają dokonywanie klasyfikacji, grupowania, przewidywania, podejmowania decyzji i optymalizacji, bazując raczej na podstawie zgromadzonych danych, a nie na opracowanym w większości *a priori* analitycznym modelu problemu zdefiniowanym jedynie na założeniach. Klasa metod AI jest bardzo szeroka. Obejmuje ona uczenie maszynowe (ang. *machine learning* – ML), systemy eksperckie, sieci Bayesowskie (ang. *Bayesian Networks*), inteligencję symboliczną, logikę rozmytą i zbiory przybliżone, obliczenia ewolucyjne i wiele innych. Wśród wymienionych powyżej za najbardziej popularną i najczęściej stosowaną metodę AI uważa się uczenie maszynowe (ML). Pojęciowo można przyjąć, że całość uczenia maszynowego to kategoria algorytmów, które koncentrują się na znajdowaniu w danych określonych wzorców i wykorzystaniu ich do przewidywania.

Metody sztucznej inteligencji w obszarze związanym z aparaturą pomiarową i pomiarami mogą być przydatne przede wszystkim do wykrywania, śledzenia, monitorowania, charakteryzowania, identyfikacji, szacowania, diagnozowania czy przewidywania. Opisane działania mogą być zatem wykorzystane w projektowaniu czujników,

wzorcowaniu, przewidywaniu niepewności, interpolacji danych pomiarowych, instrumentach programowych, a także w pomiarach pośrednich, wykrywaniu błędów i identyfikacji systemów. Wykorzystanie sztucznej inteligencji w metrologii to temat, któremu poświęca się coraz więcej uwagi. Już w procesie doboru techniki pomiarowej można dla niej znaleźć pole aplikacyjne, co pokazano na rycinie 18.



Ryc. 18. Artificial intelligence w procesie doboru techniki pomiarowej [27]

System funkcjonuje, opierając się na dwóch typach baz danych: lokalnej i globalnej. Przy pojawieniu się aplikacji pomiarowej najpierw poszukiwana jest identyczna lub podobna w lokalnej bazie danych (w danej firmie). Jeśli nie uda się jej tam znaleźć, to system poszuka w bazie globalnej, zarządzanej przez jednostkę niezależną lub producentów wyposażenia pomiarowego. Na podstawie znalezionej przypadkowo system określa technikę pomiarową i sprawdza, czy takie urządzenie jest dostępne w zakładzie. Jeśli nie, to proponuje wybór techniki spełniającej wymagania lub konkretne urządzenie pomiarowe, w zależności od tego, kto zarządza bazą globalną (powinna to być jednostka niezależna od producentów). Może także zaproponować połączenie różnych technik pomiarowych, np. optycznych i stykowych. Finalnym efektem jest dobór warunków pomiarowych i sam

pomiar, w trakcie którego AI również może aktywnie uczestniczyć. Na podstawie danych kalibracyjnych może się także nauczyć, które obszary przestrzeni pomiarowej są dokładniejsze i sugerować ustawienie przedmiotu właśnie tam w celu spełnienia wymagań.

Sztuczna inteligencja jest również bardzo istotna w szacowaniu niepewności pomiarów, zwłaszcza przy wykorzystaniu metod symulacyjnych opartych na wirtualnych urządzeniach pomiarowych [48, 49]. Na tej podstawie możliwa będzie ocena jakości uzyskanego wyniku pomiaru (z uwzględnieniem oszacowanej niepewności pomiaru). Jeśli efekt nie będzie satysfakcjonujący, to system zaproponuje działania alternatywne w celu uzyskania bardziej wiarygodnych rezultatów. Idąc dalej, system może bardziej wszechstronnie uczyć się ograniczeń konkretnych przyrządów pomiarowych u użytkownika na podstawie zrealizowanych aplikacji i rozwijać dzięki temu bazę lokalną. Może wreszcie przewidywać kolejne aplikacje, na podstawie tych, które w danym laboratorium już realizowano. A skoro jesteśmy przy symulacjach, to AI może także poprawić proces pomiarowy, bazując na uprzedniej symulacji, w oparciu o cyfrowego bliźniaka (ang. *digital twin* – DT).

Istotnym elementem przyrządów pomiarowych, funkcjonujących zgodnie z Metrologią 4.0 (a także 5.0) i wykorzystaniem AI, będzie łączność ich elementów ze światem zewnętrznym na podstawie IoT. Dzięki temu przyrząd pomiarowy połączy się z linią produkcyjną, z której będzie mógł zaczytać dane o procesie obróbki i inne, na podstawie których AI zaproponuje warunki pomiaru i ustawienia. Może również ostrzegać, że przy pewnych ustawieniach systemu wytwórczego uzyskanie poprawnych wyników pomiarów będzie niemożliwe. A skoro jesteśmy przy łączności systemu pomiarowego z urządzeniami produkcyjnymi, to warto wspomnieć o *Product Manufacturing Information* (PMI) jako o zbiorze zawierającym nie tylko cechy geometryczne i tolerancje, ale także dane materiałowe, wymagania powierzchni, warunki pomiaru itp. zawarte w modelu 3D przedmiotu. W ten sposób, zamiast bazować na dokumentach cyfrowych w celu przekazania danych inżynierskich lub produkcyjnych, można je osadzić w oryginalnym pliku CAD. Biorąc pod uwagę AI, cała koncepcja informacji o wytwarzaniu produktu wydaje się być najważniejszą informacją w cyfrowym modelu produktu [50]. Już na podstawie tych informacji uzyskanych z danych CAD, przy wykorzystaniu sztucznej inteligencji, będzie mógł nastąpić dobór techniki pomiarowej do aplikacji.

Niezwykle istotnym czynnikiem jest również to, że system będzie mieć możliwość rozbudowania i uzupełnienia preinstalowanej bazy danych powiązanej z aplikacjami o wszelkie nowe przedmioty i informacje, które uzyskał w działaniach bieżących.

Przyszłość metrologii związana z technologiami internetowymi to także duże zbiory danych, czyli *Big Data*. Termin ten jest używany do opisanego dużej ilości ustrukturyzowanych i nieustrukturyzowanych danych, które są generowane i gromadzone na ogół przez współczesne firmy i gałęzie przemysłu. W kontekście metrologii, *Big Data* odnosi się do ogromnych ilości danych pomiarowych, które są zbierane z różnych źródeł i z różnych obszarów metrologii. Tylko przy pomiarach długości i kąta współrzędnościowe maszyny pomiarowe, skanery optyczne, tomografy komputerowe itp. generują zbiory mierzone w gigabajtach. Rozwijanie pomiaru jako pojedynczej wartości do zbioru punktów i wartości, a później również obrazów spowodowało powstanie zbiorów danych trudnych do przetworzenia przez ówczesne systemy komputerowe. Dopiero ich rozwój spowodował progres pomiarów (tu dużą rolę do dziś odgrywają karty graficzne). W ten sposób już obecnie kadra metrologiczna, a także sprzęt obliczeniowy i oprogramowanie, którego używamy, mierzą się z problemami dużych zbiorów danych i koniecznością sprawnego ich przetwarzania. Gromadzenie oraz analiza *Big Data* w metrologii staje się coraz ważniejsze, ponieważ dostarcza wglądu w zachowanie i działanie systemów pomiarowych, a także w jakość mierzonych części i produktów. Dzięki temu można zidentyfikować trendy, trudne lub niemożliwe do wykrycia poprzez ręczną kontrolę, zidentyfikować problemy z jakością oraz zoptymalizować produkcję. Inną z korzyści płynących z *Big Data* w metrologii jest możliwość przeprowadzania konserwacji predykcyjnej systemów pomiarowych. Pozwala to proaktywnie rozwiązywać problemy, zanim staną się one krytyczne, redukując czas przestoju i poprawiając ogólną wydajność systemu produkcyjnego. Kolejnym pozytywnym elementem *Big Data* jest możliwość prowadzenia statystycznej kontroli procesu (SPC). Współczesne systemy pomiarowe oparte są zatem często o komputery o dużych mocach obliczeniowych i zaawansowanych kartach graficznych. Wadą tego jest ich stosunkowo szybkie moralne starzenie się, co powoduje konieczność stałego inwestowania w nowe urządzenia.

Sztuczna inteligencja, przetwarzanie dużych zbiorów danych i ich gromadzenie związane są z działaniem jednostek obliczeniowych, które zużywają coraz więcej energii. Powoli zaczyna to być ilość zauważalna w ogólnoswiatowym bilansie. Wielkie centra danych zaczynają mieć ograniczenia w funkcjonowaniu i rozbudowie właśnie z uwagi na to, że nie jest możliwe zapewnienie wystarczającej ilości energii. Na pewno wskazane jest, aby energia ta była zielona, co z kolei często wiąże się z dodatkowymi kosztami i trudnościami oraz może znacząco podnieść koszty wytwarzania wyrobów, czyniąc producentów, szczególnie w naszej części świata, mniej konkurencyjnymi. W kontekście informatycznym ten problem będzie wymagał w najbliższych latach efektywnego rozwiązania systemowego.

Ostatnim z zagadnień wartym poruszenia przy omawianiu informatyzacji w metrologii jest cyberbezpieczeństwo. Niepożądana ingerencja w dane konstrukcyjne i technologiczne prowadzi rzecz jasna do błędnych założeń i parametrów wykonawczych. Atak na dane pomiarowe może spowodować informację o wartościach cech wykraczających poza tolerancje, podczas gdy w rzeczywistości nic takiego się nie stało. Może także doprowadzić do sytuacji odwrotnej, czyli do przekazania informacji o tym, że przedmiot jest poprawny, gdy rzeczywiste uzyskane wyniki okazały się przekraczające limity tolerancji. Aby tego uniknąć stosuje się coraz bardziej zaawansowane zabezpieczenia informatyczne. Firmy zaczynają też chętniej patrzeć na budowanie do takich celów sieci wewnętrznych, bez dostępu spoza korporacji, wykorzystujących jedynie łącza przewodowe. Problem ten będzie się nasilał przy rozwoju technologii komputerowych, szczególnie kiedy bardziej powszechne stanie się *quantum computing*.

Najbliższe lata pokażą zapewne jeszcze inne pola aplikacyjne dla technologii informatycznych w metrologii. Jest to szczególnie ważne przy ciągle rosnącym zaawansowaniu stosowanych przyrządów pomiarowych i oprogramowania, które posiada coraz więcej opcji wymagających ze strony operatora zaawansowanej wiedzy i doświadczenia. Być może systemy pomiarowe będą się opierać na obiektach współpracujących ze sobą, przy czym definicja połączeń wykorzysta ideę *blockchain*. W pewnym sensie można założyć, że aplikacje staną się rozszerzeniem samego człowieka jako inteligencja rozszerzona [29]. Być może przyszłością jest zbudowanie ogólnej sztucznej inteligencji, która mogłaby osiągnąć znacznie bardziej zaawansowane cele, włączając w to uczenie

się. Opierając się na przykładach z gier, można zauważyć, że największe postępy uzyskano wtedy, kiedy system wyposażony był jedynie w zasady, bez dotychczasowej ludzkiej wiedzy bazującej na przykładach jako danych treningowych. Może dzięki temu również w metrologii powstaną procedury lepsze i bardziej efektywne od stosowanych obecnie, nawet jeśli ich zawartość nie będzie nam znana.

3.5. Zrównoważony rozwój

Wpływ na przyszłość metrologii będzie mieć także zrównoważony rozwój i to co za sobą niesie. Tak zwana Agenda 2030 ma charakter uniwersalny, horyzontalny i jest bardzo ambitna (w niektórych obszarach może nawet za bardzo). Obejmuje 17 celów zrównoważonego rozwoju oraz powiązanych z nimi 169 zadań, które oddają trzy wymiary: gospodarczy, społeczny i środowiskowy. W wielu z nich metrologia przemysłowa wpisuje się pośrednio – dotyczy to działań związanych z ubóstwem, głodem, edukacją, dostępem do wody, zmniejszeniem nierówności pomiędzy krajami, bezpiecznymi miastami, zrównoważoną konsumpcją, ochroną mórz, zapewnieniem dostępu do wymiaru sprawiedliwości czy ożywieniem globalnego partnerstwa na rzecz zrównoważonego rozwoju. Są cele, które metrologia przemysłowa aktywnie wspiera. Przykładem tego jest chociażby cel 3. – zapewnienie wszystkim ludziom w każdym wieku zdrowego życia oraz promowanie dobrobytu. Metrologia w medycynie rozwija się bardzo wyraźnie bazując na nowych czujnikach, mierzących istotne zjawiska dla funkcjonowania człowieka. Metrologia jest też bardzo istotnym narzędziem celów 13. i 15., dotyczących działań w kierunku przeciwdziałania zmianom klimatu i ich skutkom oraz zrównoważonego użytkowania ekosystemów lądowych. Na pewno szkoda, że nie wszystkie kraje na świecie są zaangażowane w te działania. Najwięksi truciciele USA, Rosja i Chiny nie specjalnie się przejmują zachodzącymi negatywnymi zmianami, przy czym część z nich właśnie na tym buduje przewagę ekonomiczną. W Unii Europejskiej rośnie świadomość, że w zakresie ogólnie pojętej ekologii sama nasza część Europy świata nie zbawi, a podnosi to koszty działania i wytwarzania (podobnie jak wynikający ze zrównoważonego rozwoju ogromny wzrost zbędnej biurokracji na chwałę urzędników – tu nikt nie przejmuje się wycinaniem lasów na

dokumenty), dramatycznie zmniejszając własną konkurencyjność globalną. Podobnie przedstawia się kwestia celu 9. związanego z budową stabilnej infrastruktury, promowaniem zrównoważonego uprzemysłowienia oraz wspieraniem innowacyjności. Czynności pomiarowe rzadko przyczyniają się do zanieczyszczeń, z reguły nie wymagają również dużych poborów energii elektrycznej lub ciepłej. Największym wyzwaniem z termicznego punktu widzenia jest tu zapewnienie odpowiednich warunków klimatycznych w laboratoriach (szczególnie temperatury i jej gradientów), niezbędnych dla uzyskania prawidłowych wyników pomiarów.

Bardzo ważne jest, aby przestrzeganie zasad zrównoważonego rozwoju, oparte było na logice i pozytywnym efekcie końcowym, a nie wymuszaniu regulacyjnym. Dobrym przykładem tego jest cel 5. mówiący o równości płci i wzmocnieniu pozycji kobiet. W metrologicznej świadomości przemysłowej są działania, w których lepiej sprawdzają się kobiety i inne, gdzie preferowani są mężczyźni. Z jednej strony np. praca w laboratoriach chemicznych czy biologicznych, a także sprawdzanie płytek wzorcowych w metrologii długości i kąta stanowią domenę pań i obserwuje się ich wyraźną przewagę. Z drugiej strony laboratoria mechaniczne czy elektrotechniczne skupiają głównie mężczyzn. Ważne jest natomiast, aby zatrudniany personel bez względu na płeć cechował się wiedzą i umiejętnościami oraz gotowością do ich doskonalenia. Kompetencje są znacznie ważniejsze od płci, czego niestety wielu wyznawców filozofii gender nie chce zrozumieć. Dostęp do pewnych zasobów musi wynikać z pełnionej funkcji i schematu organizacyjnego, a nie z płci, natomiast ta funkcja znów powinna być efektem doświadczenia i zapotrzebowania ze strony organizacji zatrudniającej. Poza tym bardzo często o równej liczbie kobiet i mężczyzn w zespołach mówi się tylko wtedy, kiedy mężczyzn jest więcej, w przeciwniej sytuacji tematu się nie porusza. Z tym zagadnieniem związany jest także cel 8. mówiący o stabilnym, zrównoważonym i inkluzywnym wzroście gospodarczym, pełnym i produktywnym zatrudnieniu oraz godnej pracy dla wszystkich ludzi. Działalność metrologiczna jako wspierająca produkcję na ogół spełnia te założenia od lat. Natomiast coraz większa liczba regulacji krajowych i międzynarodowych nie przekłada się na pozytywne działanie podmiotów zawierających metrologię. Każdy rozsądny pracodawca dba o swój personel, także pomiarowy, biorąc pod uwagę, jak trudno znaleźć dobrego fachowca. Powinien też mieć

prawo (coraz częściej odbierane) do własnej oceny i wynagradzania w zależności od przynoszonych efektów, a nie europejskich dyrektyw. Każdy metrolog na świecie chciałby zapewne znaleźć kiedyś obiektywny miernik wartości pracy i być może wtedy udałoby się zrozumieć, co mają na myśli autorzy bezkrytycznego hołdowania jednakowemu wynagrodzeniu za pracę o teoretycznie takiej samej wartości. Co by również nie powiedzieć, zewnętrzne dyktowanie właścicielowi firmy, jak ma kształtować strukturę wynagrodzeń jest ingerencją w jego wolność i zabija ducha kapitalizmu.

Pozostał jeszcze jeden cel, a mianowicie 7., dotyczący zapewnienia wszystkim dostępu do źródeł stabilnej, zrównoważonej i nowoczesnej energii po przystępnej cenie. Każdy przedsiębiorca wykorzystujący osiągnięcia metrologii przemysłowej bardzo by chciał, aby zewnętrzne podmioty zapewniły mu dostęp do przystępnych cenowo, niezawodnych i nowoczesnych usług energetycznych. Niestety realia są takie, że cena energii mocno rzutuje na końcowe ceny produktu. Energia zielona wiąże się z kosztami, które nie każdy może ponieść, a wsparcie w tym zakresie jest mocno niewystarczające. Flota pojazdów przemysłowych pokonuje dziennie wiele kilometrów, co na dzień dzisiejszy wyklucza napędy elektryczne (dodatkowo są one bardzo zawodne pod względem zasięgu w funkcji temperatury i wykorzystania urządzeń pomocniczych). Hybrydy z punktu widzenia kosztów zakupu i eksploatacji też nie zawsze okazują się ekonomiczne, a pojazdy wodorowe wykorzystujące ogniwa paliwowe jak na razie nie zastąpią używanych obecnie (brak stacji, koszt zakupu, niestabilny koszt wodoru itp.). Mamy już pełną świadomość, że Europa (może z wyjątkiem Skandynawii) nie będzie w stanie zapewnić zielonej energii z własnych źródeł. W związku z tym będziemy ją importować po cenach dyktowanych przez innych (tak jak to jest obecnie w przypadku ropy naftowej). Powstaną zatem nowe regiony bogactwa (obszary pustynne), które nie będą się przejmować zrównoważonym rozwojem, ale zyskiem. Zielona energia będzie więc w Europie bardzo droga, co spowoduje dalszy wzrost kosztów pracy w naszej części świata i sukcesywne kolejne mocne pogorszenie konkurencyjności. W ciągu najbliższych 10 lat prawdopodobnie bardzo się zmieni mapa państw najsłabiej rozwiniętych (jeszcze na początku lat 30. XX w. kraje arabskie były bardzo biedne, a kilka lat później poważnie zaczęto mówić o ropie).

Jak wynika z powyższej analizy, ważne jest mądre i przemyślane realizowanie opisanych celów. Można to ująć eufemistycznie – zrównoważone działania w zakresie zrównoważonego rozwoju, także pod względem wymogów związanych z raportowaniem. Sukcesywnie zwiększają się obowiązki informacyjne podmiotów przemysłowych względem instytucji zewnętrznych, co wynika z dyrektyw UE. Wymagając coraz to nowych zestawień i sprawozdań, urzędnicy zupełnie nie interesują się faktem, że pociągają one za sobą wzrost kosztów pracy, przez konieczność zatrudniania nowych osób bezproduktywnych. Nawet jeśli takie wymagania stawia się czasowo w stosunku do dużych podmiotów, to one natychmiast obowiązek ten przerzucają na swoich małych i średnich dostawców, aby ułatwić sobie pracę. To samo będzie mieć miejsce przy ewolucji *Corporate Social Responsibility* w *Environmental, Social and Governance* i dość nieokreślonych zysków z tego dla podmiotów gospodarczych.

Naturalnie może się pojawić pytanie, dlaczego te wszystkie elementy są istotne dla metrologii przemysłowej? Otóż przedsiębiorcy często traktują pomiary jako coś na czym się nie zarabia (nie zdając sobie sprawy, ile można stracić, jeśli się nie mierzy) i mniej chętnie inwestują w urządzenia pomiarowe. Koszty ponoszone w związku ze zrównoważonym rozwojem jeszcze bardziej tę niechęć potęgują. Promowanie rozwiązań ekologicznych jest bardzo drogie. Stal produkowana z wykorzystaniem wodoru zamiast węgla jest kilka razy droższa, a to tylko jeden z wielu przykładów. Można się tylko domyślać, jak wymuszenie stosowania takiej ekologii wpłynie na koszty urządzeń pomiarowych.

3.6. Człowiek w metrologii przyszłości

Pomimo wszelkich nowoczesnych rozwiązań związanych z automatyzacją i robotyzacją, metrologia przemysłowa w najbliższych latach w dalszym ciągu będzie związana z czynnikiem ludzkim. Idealna fabryka bez udziału człowieka, chociaż jest bardzo pociągająca, to ciągle jeszcze jest raczej domeną *science fiction*. Dlatego warto poświęcić trochę miejsca wymaganiom i zmianom, jakie w tym zakresie zachodzą na rynku pracy. Szczególnie, że analizując sytuację w naszym kraju, można wyraźnie zauważyć, że jednym z głównych powodów problemów polskiej

metrologii jest szczupłość kadry, a dla wielu rozwijających się firm mniejszym problemem jest inwestycja w urządzenia niż w człowieka, który miałby ich używać. Urządzenia pomiarowe i zawarte w nich nowe technologie wymagają bowiem wiedzy i zrozumienia tego, co się dzieje w trakcie procesu pomiarowego. Jest to konieczne, aby uzyskać wynik pomiaru jako rzetelne odzwierciedlenie wytworzonego obiektu. Istotny jest przy tym ciągły rozwój wiedzy metrologicznej generalnie i rozwój kompetencji personelu metrologicznego.

Wkraczające na rynek młode pokolenie odbiera świat jako zdecydowanie cyfrowy, najlepiej w wersji 3D, w czasie rzeczywistym i z efektem immersji, czyli zanurzenia w tym, co się dzieje, niezależnie czy chodzi o media społecznościowe, czy pracę zawodową. Tak zwane pokolenie „Z” ma też zupełnie inną optykę związaną z pracą – trochę generalizując, woli zarabiać mniej i mniej pracować, poświęcając się zajęciom czasu wolnego. Często nie radzi sobie z funkcjonowaniem w napięciu, co jest efektem wychowania bezstresowego, całkowicie nieudanego eksperymentu lansowanego przez psychologów od końca lat 90. XX w. – wszak życie nie jest bezstresowe. Dbając o *work life balance*, a w zasadzie o *life work balance*, w rzeczywistości popandemicznej młode pokolenie ma pełną świadomość możliwości pracy zdalnej, wymagając dostępu do Internetu jako podstawowego warunku funkcjonowania w rzeczywistości zawodowej, niezależnie od sytuacji. Zarządzając młodym narybkiem, należy bezwzględnie stosować elementy zarządzania turkusowego. Do tego bardzo niskie bezrobocie powoduje wyraźny rynek pracownika, co nie wpływa pozytywnie na jakość kadry. Zmienia się także podejście do wynagrodzenia – pracownik zamiast podwyżki może poprosić o skrócenie czasu pracy z 8 do 7 godzin, zostawiając pracodawcę w trudnym położeniu, bo jak znaleźć kogoś na pozostałą godzinę? Jeśli taka tendencja się utrzyma, to będzie trzeba rozważyć 6-godzinny dzień pracy i cztery zmiany po 6 godzin zamiast trzech po 8. A może w pewnym momencie cała zmiana to będą tylko 4 godziny i to, co obecnie wykonuje jeden pracownik, będzie realizować dwóch? Albo wymaganiem będą 4 godziny w pracy i 4 zdalne? A przy tym coraz powszechniej mówi się o 4-dniowym tygodniu pracy. W ten sposób koszty pracy w Europie – nawet bez działań regulacji zmuszających do zatrudniania osób nieprodukcyjnych bez wyraźnych korzyści dla pracodawcy – rosną bardzo wyraźnie. Dla dużych korporacji jest to sygnał do kolejnej ucieczki z naszej części

świata, a dla firm małych i średnich przyczynę do bardzo trudnej sytuacji na rynku globalnym. Oczywiście automatyzacja i robotyzacja mają zmniejszyć ten problem, ale z jednej strony wiążą się z kosztami, a z drugiej zmniejszają elastyczność, będącą ogromnym atutem małych i średnich przedsiębiorstw. O ile Przemysł 4.0 był związany z informatyzacją, o tyle Przemysł 5.0 jest nastawiony na pracownika, pytanie tylko, czy nie za bardzo.

Niedobór fachowej kadry niektórzy pracodawcy będą rozwiązywać poprzez *outsourcing*, co przy rosnącej specjalizacji może okazać się rozwiązaniem dla pewnych usług, które nie muszą być wykonywane w sposób ciągły. Możliwe, choć na razie bardziej teoretycznie, jest poprowadzenie procesów pomiarowych przez mniej wykwalifikowanych pracowników pod kierunkiem zewnętrznego eksperta dostępnego zdalnie. Takie rozwiązania są też pomysłem na trudny rynek pracy, a poza tym pozwalają na większą liczbę specjalistycznych ekspertów dziedzinowych zaangażowanych w mniejszym wymiarze czasowym. Oczywiście zdalny dostęp również tutaj warunkuje opisany pomysł.

Łatwość znajdowania informacji w Internecie spowodowała jeszcze jedną zmianę z punktu widzenia podmiotów przemysłowych wytwarzających bądź wykorzystujących metrologię. Otóż nowości pojawiały się na targach, których popularność była ogromna, przy czym ostatnie lata zmieniły to bardzo wyraźnie. Rozwiązania poszukiwane są w sieci, a nie na targach, natomiast wybrane opcje weryfikuje się u producenta. Firmy oferujące systemy pomiarowe w ślad za tym zastanawiają się nad rzadszym udziałem w takich wydarzeniach. To kolejna dość rewolucyjna zmiana o charakterze społecznym.

3.7. Podsumowanie kierunków rozwoju metrologii przemysłowej

Podsumowując wizję przyszłości metrologii przemysłowej w naszym kraju, daje się zauważyć dwa istotne uwarunkowania, które będą mocno wpływać na jej kształt. Pierwszym z nich jest rozwój przyrządów pomiarowych, ze szczególnym uwzględnieniem kwestii informatycznych. Sztuczna inteligencja i duże zbiory danych to coś, z czym już powoli zaczynamy się zaprzyjaźniać. Na pewno dużą rolę odgrywać będą także problemy związane z cyberbezpieczeństwem. Urządzenia

pomiarowe dzięki temu będą coraz prostsze z punktu widzenia użytkownika, ale coraz bardziej złożone pod kątem procedur oprogramowania odpowiedzialnych nie tylko za prezentację wyników, ale także za korekcje i analizę wskazań czujników monitorujących stan bieżący. Większą rolę odgrywać będzie multisensoryka, szczególnie w urządzeniach stosowanych w laboratoriach. Poszczególne sensory mogą mierzyć parametry z różnych dziedzin, aby uzyskać bardziej kompleksową informację o przedmiocie.

Drugim uwarunkowaniem jest człowiek, czyli kadra techniczna. Nowe pokolenie Z wkraczające na rynek pracy ma zupełnie inne nastawienie do rzeczywistości przemysłowej i jest dużo bardziej skupione na sobie niż na etosie pracy. Dążąc do zmniejszenia liczby godzin spędzanych na obowiązkach zawodowych, może doprowadzić do poważnych perturbacji w sferze długości zmiany. Poza tym powinniśmy się nastawić w metrologii na operatorów potrafiących przeprowadzić pomiar i ekspertów wspieranych sztuczną inteligencją, którzy będą wyciągać wnioski na podstawie danych. Tu z kolei będzie się liczyć interdyscyplinarność jako wspólna praca osób specjalizujących się w różnych dziedzinach. Jedną z opcji realizacji tego jest *outsourcing*.

Na koniec warto wspomnieć, że metrologia zmienia się również pod względem usług oferowanych przez wyspecjalizowane laboratoria pomiarowe. Skoro bowiem nie trzeba opuszczać biura, żeby wziąć zdalny udział w pomiarach, to pojawia się pytanie, czy na pewno konkretny system pomiarowy jest w danej firmie niezbędny, czy nie lepiej zlecić pomiary na zewnątrz? Jest to oczywiście zależne od liczby zadań pomiarowych, ale jeśli jest ich mało, to opcja *outsourcingu* jest godna rozważenia. Do jej zalet – oprócz tego, że nie trzeba inwestować w urządzenie pomiarowe – należy również to, że nie ma konieczności zatrudniania specjalistów, a zleceniobiorca posiada (a przynajmniej powinien posiadać) wykwalifikowaną kadrę, której koszty w ostatnich latach w naszym kraju zdecydowanie rosną. Przy czym wybór zleceniobiorcy nie zawsze jest zadaniem prostym. Na rynku pojawia się szereg podmiotów w różny sposób zachwalających swoje usługi, chociaż ich jakość nie zawsze jest tym, czego chcielibyśmy doświadczać. Weryfikacja dostawcy powinna zostać przeprowadzona bardzo skrupulatnie, nie tylko pod względem kosztów. Dobrym wskaźnikiem przy wyborze partnera jest posiadanie przez niego akredytacji zgodnie z normą PN-EN ISO/IEC 17025 – Ogólne wymagania dotyczące kompetencji

laboratoriów badawczych i wzorcujących. Korzystanie z usług laboratorium akredytowanego daje pełną gwarancję (potwierdzoną przez PCA), że wyniki są wiarygodne i bezstronne, a akredytowany podmiot posiada personel z odpowiednią wiedzą i kompetencjami, właściwe wyposażenie oraz stosuje wiarygodne i poprawne metody badawcze. Nie bez znaczenia jest także fakt, że to po stronie wykonującego pomiary leży również obowiązek wzorcowania przyrządów pomiarowych.

Na świecie powoli zaczyna się mówić o Przemysle 5.0, czego zatem możemy oczekiwać po Metrologii 5.0? To oczywiście nie jest jeszcze do końca określone. Niemniej oczekuje się, że przemysł, poza innowacyjnością, efektywnością i wydajnością, będzie motorem przemian ekologicznych i społecznych, stawiając dobro pracownika w centrum procesu produkcyjnego. Jest to odpowiedź na zmieniające się umiejętności i potrzeby szkoleniowe pracowników, docelowo zwiększające konkurencyjność, w celu zapewnienia dobrobytu życia także poza miejscami pracy, przy jednoczesnym bardziej efektywnym wykorzystaniu zasobów naturalnych naszej planety. Mocno teoretycznie powinno się to również przyczynić do lepszej odporności na globalne wstrząsy, które w ostatnich latach dotyczą społeczeństwa. Ta zmiana w metrologii zapoczątkowana będzie przez jeszcze powszechniejsze wykorzystanie technologii informatycznych, w tym oczywiście sztucznej inteligencji i związanych z nią systemów uczących się. Ważne będzie również odpowiednie zarządzanie danymi, ponieważ ich liczba będzie w najbliższych latach wzrastać bardzo gwałtownie, dzięki technologii 5G i rozwojowi sensoryki. Pojawia się zatem aplikacje zarządzane zdarzeniami, pozwalające wybrać te, które są najbardziej istotne, aby wynik pomiaru odzwierciedlał rzeczywistość, a jego interpretacja nie była nadmiernie skomplikowana dla użytkownika. Ich funkcjonowanie zobrazuje mechanizm: zdarzenie – informacja – przyjęcie informacji. Będzie tu ogromne pole działania dla małych firm (w tym również startupów), którym łatwiej będzie się dostosować do zmian niż dużym organizacjom. Sprostanie tym wyzwaniom będzie więc dla przemysłu bardzo istotne, aby zakład przemysłowy był przygotowany na młodych inżynierów co najmniej tak dobrze, jak oni będą przygotowani na swoją pracę. Można tylko obawiać się, czy Polska i nasza część świata jest finansowo przygotowana na takie rozwiązania, szczególnie pod względem społecznym.

Literatura

1. Mathia T.G., Pawlus P., Wieczorowski M., *Recent trends in surface metrology*, „Wear” 2011, vol. 271, no. 3–4, s. 494–508.
2. Schwab K., *Czwarta rewolucja przemysłowa*, Studio EMKA, 2018.
3. Wieczorowski M., Pawlus P., Gapiński B., *Perspektywy współczesnej metrologii*, „Mechanik” 2019, vol. 12, s. 767–773.
4. Wieczorowski M., Trojanowska J., *Towards metrology 4.0 in dimensional measurements*, „Journal of Machine Engineering” 2023, vol. 23, no. 1, s. 100–113.
5. Alaluss M., Kurth R., et al., *Potential of tool clamping surfaces in forming machines for cognitive production*, „Journal of Machine Engineering” 2022, vol. 22, no. 3, s. 116–131.
6. Friedrich C., Ihlenfeldt S., *Spatial compliance measurement of a clamping table with integrated force sensors*, „Journal of Machine Engineering” 2022, vol. 22, no. 1, s. 70–83.
7. Bleicher F., Ramsauer C., et al., *Tooling systems with integrated sensors enabling data based process optimization*, „Journal of Machine Engineering” 2021, vol. 21, no. 1, s. 5–21.
8. Wieczorowski M., *Wyzwania metrologii w kontekście przemysłu przyszłości*, „Stal Metale & Nowe Technologie” 2021, vol. 3–4, s. 66–74.
9. Wieczorowski M., *Metrologia przyszłości. Czy powinniśmy się bać?*, „Stal, Metale & Nowe Technologie” 2023, vol. 3–4, s. 8–16.
10. Swojak N., Wieczorowski M., Jakubowicz M., *Assessment of selected metrological properties of laser triangulation sensors*, „Measurement” 2021, vol. 176, 109190.
11. Gocator 3210, LMI, 2023.

12. Miller T., Adamczak S., Świdorski J., Wieczorowski M., Łętocha A., Gapiński B., *Influence of temperature gradient on surface texture measurements with the use of profilometry*, „Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences” 2017, vol. 65, no. 1, s. 53–61.
13. KOBA Steel Gauge Blocks, Kolb und Baumann, 2023.
14. PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02, Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących.
15. Gruszka J., Wieczorowski M., Śmierzchalska B., Szelewski M., Zachwiej I., Śmierzchalski D., *Laboratorium Wzorcujące ITA*, „Mechanik” 2018, vol. 5–6, s. 430–433.
16. Infinite Focus G6, Alicona, 2023.
17. Martindale Abrasion and Pilling Tester, James Heal, 2023.
18. MiniLab 300, GNR, 2023.
19. Fischerscope X-RAY XDL 230/240, Fischer, 2023.
20. Mantis, Vision Engineering, 2023.
21. MetraSCAN Black, Creaform, 2023.
22. Phoenix v|tome|x m, Waygate technologies, 2023.
23. Inspekt duo 5–10 kN, Hegewald und Peschke MPT, Hegewald & Peschke, 2023.
24. Wieczorowski M., Trojanowska J., Sokolov O., *Digital and Information Technologies in Metrology 4.0*, [in:] *Lecture Notes in Mechanical Engineering Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI*, eds. V. Ivanov, J. Trojanowska, I. Pavlenko, E. Rauch, J. Pitel', 2023, s. 81–90.
25. PKN-ISO/IEC Guide 99:2010 – wersja polska. Międzynarodowy słownik metrologii. Pojęcia podstawowe i ogólne oraz terminy z nimi związane (VIM).
26. Wieczorowski M., Gapiński B., Gaska A., Sładek J.A., Woźniak A., Kowaluk T., Kujawińska M., Stępień K., Adamczak S., *NSMET – Narodowa Sieć Metrologii Współrzędnościowej*, „Stal, Metale & Nowe Technologie” 2021, vol. 3–4, s. 52–61.
27. Wieczorowski M., Kucharski D., Sniatała P., Pawlus P., Krolczyk G., Gapiński B., *A novel approach to using artificial intelligence in coordinate metrology including nano scale*, „Measurement” 2023, vol. 217, 113051.
28. Pawlus P., Reizer R., Wieczorowski M., *Parametric characterization of machined textured surfaces*, „Materials” 2023, vol. 16, no. 1, s. 163.

29. Walsh M., *The algorithmic leader: how to be smart when machines are smarter than you*, Page Two Books, Inc., 2019.
30. Tegmark M., *Life 3.0: being human in the age of artificial intelligence*, Knopf Doubleday Publishing Group, 2018.
31. Stenger J., Ullrich J.H., *Units based on constants: the redefinition of the international system of units*, „Annual Review of Condensed Matter Physics” 2016, vol. 7, s. 35–59.
32. Wieczorowski M., *Wyzwania metrologii w kontekście przemysłu przyszłości*, „Stal, Metale & Nowe Technologie” 2021, vol. 3–4, s. 66–74.
33. Sadaoui S.E., Mehdi-Souzani C., Lartigue C., *Multisensor data processing in dimensional metrology for collaborative measurement of a laser plane sensor combined to a touch probe*, „Measurement” 2022, vol. 188, 110395.
34. Liu M., Senin N., Leach R., *Intelligent quality monitoring for additive manufactured surfaces by machine learning and light scattering*, [in:] *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XII – proceedings vol. 11782*, eds. P. Lehmann, W. Osten, A.A. Goncalves, 2021.
35. Gapiński B., Wieczorowski M., Grzelka M., Alonso P.A., Tome A.B., *The application of micro computed tomography to assess quality of parts manufactured by means of rapid prototyping*, „Polimery” 2017, vol. 62, no. 1, s. 53–59.
36. Śladek J.A., *Coordinate Metrology, Accuracy of systems and measurements*, Springer, 2016.
37. Wieczorowski M., Gapiński B., Talar R., Stachowska E., Jakubowicz M., Grochalski K., et al., *Metrologia w skali makro – jak zmieniają się polskie laboratoria metrologiczne*, „Stal, Metale & Nowe Technologie” 2024, vol. 3–4, s. 20–24.
38. Todd D.J., *Walking machines. An introduction to legged robots*, Springer, 2013.
39. Biswal P., Mohanty P.K., *Development of quadruped walking robots: a review*, „Ain Shams Engineering Journal” 2021, vol. 12, s. 2017–2031.
40. Walas K., *Terrain classification and negotiation with a walking robot*, „Journal of Intelligent & Robotic Systems” 2015, vol. 78, s. 401–423.
41. Wieczorowski M., Swojak N., Pawlus P., Pereira A., *The use of drones in modern length and angle metrology*, [in:] *Modern technologies enabling safe and secure UAV operation in urban airspace*, eds. P. Sniatała, S.S. Iyengar, A. Bendarma, M. Klosak, IOS Press, 2021, s. 125–140.

42. Cristiani D., Bottonelli F., Trotta A., Felice M., *Inventory management through mini-drones: architecture and proof-of-concept implementation*, [in:] *Proceedings 21st IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, WoWMoM*, 2020, 9217726, s. 317–322.
43. Swojak N., Wieczorowski M., Jakubowicz M., *Assessment of selected metrological properties of laser triangulation sensors*, „Measurement” 2021, vol. 176, 109190.
44. Schurig R., Désesquelles T., Dumont A., Lefranc E., Lux A., *3D stereoscopic measurements from AR Drone Squadron*, [in:] *IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering*, 2014.
45. Wang Y., Zhang T., Wang J., *Building 3D realistic modeling based on air-ground multi-source data fusion*, „E3S Web of Conferences” 2020, vol. 213, 03025.
46. Wieczorowski M., Kucharski D., Sniatala P., Krolczyk G., Pawlus P., Gapinski B., *Theoretical considerations on application of artificial intelligence in coordinate metrology*, [in:] *6th International Conference on Nanotechnology for Instrumentation and Measurement (NanofIM)*, 2021.
47. Khanafer M., Shirmohammadi S., *Applied AI in instrumentation and measurement: The deep learning revolution*, „IEEE Instrumentation & Measurement Magazine” 2020, vol. 23, no. 6, s. 10–17.
48. Gaska A., Harmatys W., Gaska P., Gruza M., Gromczak K., Ostrowska K., *Virtual CMM-based model for uncertainty estimation of coordinate measurements performed in industrial conditions*, „Measurement” 2017, vol. 98, s. 361–371.
49. Su R., Leach R., *Physics-based virtual coherence scanning interferometer for surface measurement*, „Light: Advanced Manufacturing” 2021, 2(2), s. 120–135.
50. Peng Z., Huang M., Zhong Y., Chen L., Liu G., *A new method for interoperability and conformance checking of product manufacturing information*, „Computers & Electrical Engineering” 2020, vol. 85, 106650.

W rozdziale przedstawiono diagnozę stanu metrologii przemysłowej w Polsce oraz opisano strategiczne kierunki jej dalszego rozwoju. W pierwszej części określono obszar merytoryczny, będący przedmiotem opracowania, a w kolejnej omówiono funkcjonowanie klasycznego zakładu przemysłowego wraz z charakterystyką służb metrologicznych oraz opisem funkcjonowania laboratoriów pomiarowych i działu badawczo-rozwojowego. Scharakteryzowano także metrologiczne usługi zewnętrzne. Dodatkowo przeprowadzono analizę aktualnych problemów i potrzeb. Następnie skoncentrowano się na przyszłości metrologii przemysłowej w priorytetowych obszarach, takich jak: nowe systemy i rozwiązania pomiarowe, automatyzacja i robotyzacja, informatyzacja oraz zrównoważony rozwój. Przedstawiono również rolę człowieka w metrologii przyszłości. Stwierdzono, że ważnym aspektem będzie rozwój przyrządów pomiarowych, ze szczególnym uwzględnieniem kwestii informatycznych. Sztuczna inteligencja i duże zbiory danych to coś, z czym już powoli należy się oswoić. Na pewno dużą rolę odgrywać będzie cyberbezpieczeństwo. Istotna będzie także kadra techniczna i problemy z pozyskaniem wysoko wykwalifikowanych specjalistów. Zwrócono również uwagę na konieczność współpracy między przedsiębiorstwami, uczelniami technicznymi oraz ośrodkami badawczymi, co ma na celu przyspieszenie transferu wiedzy i innowacji do przemysłu. Podkreślono znaczenie metrologii przemysłowej, ze względu na aspekt aplikacyjny tej dziedziny nauki. Przedstawiono działania mające na celu wzmocnienie konkurencyjności polskiego przemysłu poprzez poprawę jakości i efektywności procesów zarówno pomiarowych, jak i produkcyjnych.

Słowa kluczowe: metrologia przemysłowa, „Polska Metrologia”, diagnoza stanu metrologii, strategiczne kierunki rozwoju metrologii

CZĘŚĆ DRUGA

Metrologia chemiczna



Prof. dr hab. Ewa Bulska

ORCID: 0000-0003-4872-5521

Uniwersytet Warszawski

ROR: <https://ror.org/039bjqg32>

Pracownik Wydziału Chemii Uniwersytetu Warszawskiego. Kierownik Centrum Metrologii Chemicznej przy Uniwersytecie Warszawskim (UW) i dyrektor Centrum Nauk Biologiczno-Chemicznych UW. Członek Komitetu Chemii Analitycznej Polskiej Akademii Nauk (KChA PAN) oraz przewodnicząca Zespołu Spektrometrii Atomowej KChA PAN, członek Polskiego Towarzystwa Chemicznego, wiceprezes Klubu POLLAB, członek zarządu międzynarodowej organizacji EUROLAB. W latach 2017–2022 przewodnicząca Rady Metrologii przy Prezesie Głównego Urzędu Miar. Obecnie przewodnicząca Rady Programowej wydawnictwa MALAMUT.

Współautorka ponad 240 publikacji naukowych w czasopiśmie międzynarodowych oraz rozdziałów w wydawnictwach polskich i międzynarodowych. Jest ekspertką w zakresie chemii analitycznej, spektrometrii atomowej i spektrometrii mas. Autorka podręcznika *Metrologia Chemiczna*, wyd. MALAMUT, oraz powstałej na tej podstawie monografii *Metrology in Chemistry* (Springer, 2018). Jest laureatką wielu nagród, w tym nagrody im. Bunsena-Kirchhoffa przyznanej przez Niemieckie Towarzystwo Chemiczne (2004), nagrody Uniwersytetu Warszawskiego im W. Świątosławskiego (2006), medalu im. Wiktora Kemuli przyznanego przez Polskie Towarzystwo Chemiczne (2012), nagrody im. Jerzego Fijałkowskiego przyznanej przez Komitet Chemii Analitycznej PAN (2016). Została odznaczona Złotym Krzyżem Zasługi oraz Krzyżem Kawalerskim Odrodzenia Polski. Została zaliczona przez międzynarodową organizację International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) do grona dwunastu najwybitniejszych kobiet chemików, a w 2015 r. uzyskała tytuł IUPAC Distinguished Women in Chemistry. W 2024 r. otrzymała nagrodę indywidualną I stopnia Ministra Nauki. W 2024 r. została również wyróżniona przez Czeskie Towarzystwo Spektroskopowe medalem im. Ioannes Marcus Marci of Kronland.

Była stypendystką Towarzystwa Maxa Plancka (MPG) oraz Fundacji Aleksandra von Humboldta. Była także profesorem wizytującym na kilku uniwersytetach w Chinach, Japonii, Niemczech, Słowenii, Szwecji i USA.

Określenie obszaru merytorycznego metrologii chemicznej

Metrologia chemiczna dotyczy wszystkich pomiarów, których celem jest określenie składu chemicznego danego obiektu. Jako przykłady można wskazać m.in.: wyniki badań klinicznych służące lekarzowi do podjęcia decyzji o niezbędnej terapii, wyniki badań składu produktów spożywczych stanowiące podstawę ich dopuszczenia do obrotu, a w konsekwencji do spożycia. Nie są to jednak jedyne obszary zastosowań pomiarów składu obiektów, ponieważ do ważnych obszarów można zaliczyć także monitorowanie stanu środowiska, nadzór nad procesami produkcyjnymi, czy też badania obecności substancji dopingujących u sportowców. Wymienione, siłą rzeczy wybrane, przykłady wskazują na pomiary, których celem jest określenie składu chemicznego danego obiektu, a tym obszarem zajmuje się właśnie metrologia chemiczna [1]. Należy zaznaczyć, że procedura pomiarów chemicznych zależy nie tylko od rodzaju badanego obiektu, ale w dużym stopniu również od celu wykorzystania wyników tych pomiarów. W tabeli 1 przedstawiono obszary i dziedziny wiedzy wykorzystujące metrologię chemiczną wraz z wybranymi przykładami.

Tab. 1. Obszary i dziedziny wiedzy wykorzystujące metrologię chemiczną – wybrane przykłady (nie wyczerpują wszystkich możliwych obszarów zastosowania pomiarów chemicznych)

Dziedzina wiedzy	Obszary, w których prowadzone są pomiary właściwości fizyko-chemicznych obiektów
Biologia	botanika, genetyka, mikrobiologia, biologia molekularna, zoologia (badanie profilu białkowego – proteomika)
Chemia	chemia nieorganiczna, chemia organiczna, chemia fizyczna, inżynieria chemiczna, biochemia (badanie zawartości etanotolu dodawanego do gazu opałowego, wykrywanie ewentualnych nieszczelności instalacji gazowej)

Tab. 1. Obszary i dziedziny wiedzy wykorzystujące metrologię chemiczną – wybrane przykłady (nie wyczerpują wszystkich możliwych obszarów zastosowania pomiarów chemicznych)

Dziedzina wiedzy	Obszary, w których prowadzone są pomiary właściwości fizyko-chemicznych obiektów
Fizyka	astrofizyka, astronomia, biofizyka, materiałoznawstwo (badanie morfologii ciał stałych i rozmieszczenia wybranych substancji – niezbędne w przygotowaniu nowych materiałów o przewidywanych właściwościach)
Inżynieria	inżynieria lądowa, inżynieria chemiczna, inżynieria elektryczna, inżynieria mechaniczna (badanie składu chemicznego obiektów w celu określenia procesów starzenia i korozji)
Medycyna	chemia kliniczna, chemia medyczna, farmacja, toksykologia (badanie oznaczenia zawartości tlenu i ditlenku węgla we krwi, badanie zawartości zjonizowanego wapnia w surowicy krwi – przydatne w diagnostyce chorób gruczołów przytarczowych)
Materiałoznawstwo	metalurgia, polimery i tworzywa sztuczne, ciała stałe (w tym szkliste i niejednorodne), mikroplastik (analiza składu chemicznego stali w czasie jej produkcji – przydatne w dopasowywaniu zawartości C, Ni i Cr do wymagań odnośnie jej wytrzymałości, twardości, odporności na korozję oraz ciągliwości)
Nauki społeczne	archeologia, antropologia, kryminalistyka (badanie składu pierwiastkowego i izotopowego okruchów szkła w celu określenia proveniencji obiektów)
Rolnictwo	nauka o zwierzętach, rolnictwo, żywność, ogrodnictwo, gleboznawstwo, nawozy sztuczne, środki ochrony roślin (badanie zawartości azotu w produktach żywnościowych w celu wyznaczania zawartości białka, a w konsekwencji oceny wartości odżywczych)
Nauki o środowisku	monitoring środowiska, ekologia, meteorologia, oceanografia (badanie zawartości węglowodorów, tlenków azotu oraz tlenu węgla w spalinach samochodowych w celu oceny skuteczności urządzeń kontrolujących emisję tych gazów do środowiska)
Geologia	geofizyka, geochemia, paleobiologia (analiza składu pierwiastkowego i izotopowego w celu wspomagania badania procesów geologicznych)

Specyfika metrologii chemicznej wynika przede wszystkim z różnorodności obiektów, co oznacza ich różny skład chemiczny, oraz z różnorodności wyznaczanych specji chemicznych, występujących w danym obiekcie na zróżnicowanym poziomie. Specyfika metrologii chemicznej wynika też z tego, że dana substancja chemiczna może występować w różnym otoczeniu chemicznym, czyli w matrycy próbki, stąd w większości przypadków pomiar nie jest bezpośredni. Przed pomiarem wymagane jest często specjalistyczne przygotowanie próbki, co w praktyce oznacza np. konieczność wydzielenia danej substancji z otoczenia

chemicznego (matrycy), a przy tym wymaga dalszego zatężenia lub rozcienienia. Stąd integralną częścią chemicznej procedury pomiarowej jest proces przygotowania próbki, tak aby można było dla niej wykonać zamierzone pomiary za pomocą wybranego przyrządu pomiarowego.

Należy wyjaśnić na potrzeby niniejszego opracowania, że specje chemiczne to wszystkie rodzaje chemicznych indywiduów, składających się na dany układ chemiczny. W przypadku roztworów wodnych określenie specje zawiera cząsteczki wody jako rozpuszczalnika, jony H^+ i OH^- powstałe w wyniku autoprotolizy wody, wszystkie jony dodatnie i ujemne powstałe z rozpuszczonych soli, kwasów i zasad oraz cząsteczki obojętne.

1.1. Różnorodność w metrologii chemicznej

W metrologii chemicznej (także biochemicznej, biologicznej) wykorzystuje się pośredni pomiar wielkości mierzonej (jako stężenie lub zawartość). Pomiar nie dotyczy całego badanego obiektu, a jedynie reprezentatywnej próbki, której cechy fizyczne i skład chemiczny powinny, w jak największym stopniu, odzwierciedlać cechy badanego obiektu. Biorąc pod uwagę złożoność jego składu chemicznego, wynik pomiaru zależy od czynników, takich jak:

- rodzaj próbki,
- rodzaj i zawartość analitu,
- zastosowana procedura przygotowania próbki,
- wybrana technika pomiarowa,
- sposób przeprowadzenia wzorcowania przyrządu pomiarowego.

Kluczowymi aspektami charakteryzującymi metrologię chemiczną są więc różnorodność oraz konieczność każdorazowego wyboru właściwego procesu analitycznego [2].

Ważnym zagadnieniem w pomiarach właściwości fizykochemicznych jest reprezentatywność próbki względem badanego obiektu. Wyróżnia się przy tym próbkę ogólną (partia materiału złożona ze wszystkich próbek pierwotnych pobranych z danego obiektu) i próbkę laboratoryjną (część próbki ogólnej, reprezentująca właściwości materiału, przeznaczona do prowadzenia badań w laboratorium). Skład próbki laboratoryjnej powinien ściśle odzwierciedlać średni skład całkowitej masy (partii) analizowanego materiału (obektu) [3].

Niezmiernie rzadko mamy do czynienia z sytuacją, kiedy do pomiaru jest wykorzystywany cały badany obiekt. Stąd do procedury pomiarowej należy również proces pobierania próbek (próbkiowanie). Proces próbkiowania polega na uzyskaniu takiej ilości jednorodnego materiału, którą można operować w warunkach laboratoryjnych, a której skład odpowiada składowi badanego obiektu. Próbką ogólna lub laboratoryjna może mieć różne rozmiary, stąd w pomiarach chemicznych stosuje się następującą terminologię:

- makroanaliza: próbki o masie $> 0,1$ g,
- półmikroanaliza: próbki o masie od $0,01$ g do $0,1$ g,
- mikroanaliza: próbki o masie od 10^{-4} g do 10^{-2} g,
- ultramikroanaliza: próbki o masie $< 10^{-4}$ g.

Oznaczane składniki próbki mogą występować w bardzo różniących się stężeniach. W tym przypadku stosuje się następujący podział [4]:

- składniki główne: zawartość w próbce od 1% do 100% ,
- składniki poboczne: zawartość w próbce od $0,01\%$ do 1% ,
- składniki śladowe: zawartość w próbce od $100\text{ }\mu\text{g/g}$ (100 ppm / $0,01\%$) do 1 ng/g (1 ppb),
- składniki ultraśladowe: zawartość mniejsza niż 1 ng/g .

1.2. Definicja matrycy próbki

Pomiary właściwości chemicznych różnych obiektów (rzeczywistych próbek analitycznych) są często utrudnione ze względu na obecność innych składników, tj. matrycy próbki. W próbce mogą być obecne specje podobne pod względem właściwości chemicznych do analitu, mogą reagować z tymi samymi odczynnikami co analit lub też mogą powodować powstanie sygnału, którego nie można łatwo odróżnić od sygnału pochodzącego od analitu. Oznacza to, że reakcje uboczne oraz nakładanie się sygnałów mogą zaburzać uzyskanie wiarygodnego wyniku pomiaru, co w pomiarach chemicznych jest uznawane za interferencje. W przypadku, gdy zaburzenie sygnału wynika z obecności pozostałych składników próbki (matrycy), mamy do czynienia z efektami matrycy. Interferencje mogą być powodowane przez pierwotnie obecne w próbce składniki, jak również przez substancje dodawane w procesie przygotowania próbek. Warto też podkreślić, że dużym problemem w badaniu składu chemicznego jest możliwość zmiany

składu próbki w czasie, np. w wyniku wysychania lub podatności na reakcje fotochemiczne.

Podsumowując, jest wiele czynników wpływających na końcowy wynik badania. Próbki często nie są stabilne, stąd wiele czynników jest związanych z samym obiektem badań:

- substancje obecne oryginalnie w próbce (mogą podlegać podobnym reakcjom, mogą zmieniać sygnał analityczny),
- substancje dodane w procesie przygotowania próbki (występowanie reakcji ubocznych),
- zmiany składu próbki w czasie pod wpływem warunków zewnętrznych (temperatura, światło, mikroorganizmy).

Proces wyboru procedury analitycznej wymaga krytycznej analizy samego obiektu badań, co stanowi podstawę do wyboru właściwej techniki pomiarowej. W tabeli 2 przedstawiono zestawienie różnorodnych cech badanych obiektów, pamiętając, że ta lista nie wyczerpuje wszystkich możliwych rodzajów obiektów.

Tab. 2. Zestawienie różnorodnych cech badanych obiektów (nie wyczerpuje wszystkich możliwych rodzajów obiektów)

Różnorodność badanych obiektów: przykłady	
Stan skupienia	• próbki stałe: • zwarte: jednorodne szkliste / niejednorodne z wtrąceniami • ziarniste: jednorodne/niejednorodne, proszki o małym zróżnicowaniu wielkości ziaren / o dużym zróżnicowaniu wielkości ziaren • próbki ciekłe: roztwory wodne/niewodne, koloidy, ciecze jonowe • próbki gazowe: mieszaniny gazów, gazy z zawieszonym pyłem
Matryca chemiczna (wybrane przykłady)	• próbki kliniczne: mocz, krew, tkanki miękkie i twarde • próbki środowiskowe: gleba, osady, wody (opadowe, jeziorne, rzeczne, morskie, podziemne), powietrze, gazy odlotowe • ścieki i odpady: komunalne, przemysłowe, szpitalne • produkty spożywcze: woda przeznaczona do spożycia, napoje, soki owocowe, owoce i warzywa, mięso i wędliny, przetwory • próbki przemysłowe: metale i stopy, wyroby gumowe, paliwa, smary, szkło, tworzywa sztuczne, wyroby farmaceutyczne
Rodzaj substancji chemicznej (specji)	• pierwiastki/izotopy • związki nieorganiczne/organiczne • substancje polarne/niepolarne • substancje rozpuszczalne w wodzie / rozpuszczalne w rozpuszczalnikach organicznych • związki niskocząsteczkowe/wysokocząsteczkowe
Poziom zawartości	• makro • mikro • składniki śladowe • składniki ultraśladowe

Masa/ilość próbki laboratoryjnej (dla której będzie wyznaczony wynik pomiaru) zależy od stopnia jednorodności obiektu. Należy pamiętać, że materiał niejednorodny to taki materiał, którego składniki można rozróżnić gołym okiem lub za pomocą mikroskopu. Do materiałów niejednorodnych zaliczamy przykładowo węgiel, tkanki zwierzęce, glebę. Niejednorodność nie jest jednoznaczną cechą danego obiektu. Może się różnić w odniesieniu do różnych cech. Przykładowo, w glebie zawartość wapnia może być jednorodna na poziomie 500 mg, a zawartość miedzi na poziomie 100 mg. Stąd przy przygotowywaniu próbki laboratoryjnej konieczna jest decyzja o „najmniejszej, reprezentatywnej odważce próbki” dla danego celu analitycznego (cel wykorzystania wyników pomiarów).

1.3. Charakterystyka pomiarów chemicznych

Wyróżnia się analizę jakościową i analizę ilościową. Analiza jakościowa pozwala na identyfikację składników danej próbki, czyli na określenie czy dana substancja występuje na poziomie powyżej granicy wykrywalności danej techniki pomiarowej, przy czym granica wykrywalności może być różna dla różnych technik pomiarowych. Analiza ilościowa umożliwia określenie względnych zawartości poszczególnych składników (analitów) w formie liczbowej, pod warunkiem, że występują w próbce na poziomie powyżej granicy oznaczalności, przy czym granica oznaczalności może być różna dla różnych technik pomiarowych.

Jedną z istotnych cech pomiarów chemicznych jest różnorodność w wyrażaniu zawartości analitów względem badanego obiektu. W praktyce stosuje się różne sposoby opisu, co oznacza również stosowanie różnych jednostek (tab. 3).

Tab. 3. Różnorodność w wyrażaniu zawartości analitów względem badanego obiektu

Opis	Jednostki	Komentarz
Stężenie molowe	np. [mol/L, mmol/mL]	liczba moli substancji w danej objętości roztworu
Stężenie procentowe	względna zawartość substancji w danej próbce	konieczne jest określenie, w jakich jednostkach są wyrażane wartości w liczniku i mianowniku
Procent masowy	m/m np. [g/g, g/kg]	masa substancji względem masy próbki
Procent objętościowy	v/v np. [mL/kg]	objętość substancji względem objętości próbki
Procent masowo-objętościowy	m/v np. [g/L, mg/mL]	masa substancji względem objętości próbki
Jednostki względne ppm i ppb są stosowane do określania bardzo małych stężeń, jako zawartość substancji względem objętości lub masy próbki.		
Części na milion	ppm [mg/kg lub mg/L]	stężenie jest wyznaczone względem masy lub względem objętości
Części na miliard	ppb [μg/kg lub μg/L]	
W przypadku dużej różnicy stężeń wygodnie jest stosować skalę logarytmiczną i wyrażać zawartość danego jonu jako ujemny logarytm z jego stężenia. Najczęściej zapis pX jest wykorzystywany do określania stężenia jonów H+ lub OH- w roztworach wodnych.		
Notacja pX	$pX = -\log[X]$	najczęściej stosuje się pH oraz pOH

Diagnoza stanu metrologii chemicznej w Polsce

2.1. Podmioty zajmujące się metrologią chemiczną

W Polsce jest wiele grup badawczych związanych z uczelniami lub instytutami naukowymi zajmujących się opracowywaniem i walidacją nowych technik i procedur pomiarowych właściwości chemicznych. W wielu przypadkach praca naukowa jest powiązana z działalnością edukacyjną. W tabeli 4 przedstawiono wybrane przykłady instytucji zajmujących się aktywnie pracami badawczymi oraz nauczaniem w obszarze metrologii chemicznej.

Tab. 4. Wybrane przykłady instytucji zajmujących się aktywnie pracami badawczymi oraz nauczaniem w obszarze metrologii chemicznej

Instytucja	Obszar badań	Dydaktyka
Uniwersytet Warszawski	• opracowywanie nowych procedur pomiarowych • certyfikacja matrycowych materiałów odniesienia • pomiary definitywne (technika rozcieńczeń izotopowych) • realizacja projektów związanych z wytwarzaniem i certyfikacją nowych CRM	• kurs podstawowy z metrologii chemicznej dla studentów chemii, biologii i geologii • studia podyplomowe z metrologii chemicznej • szkoły letnie „Metrologia in chemistry”
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu	• stosowanie zasad metrologii w badaniach specjacji	• kurs podstawowy z metrologii chemicznej dla studentów chemii i biologii • studia podyplomowe analityka chemiczna • szkoły letnie „Metrologia in chemistry”
Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie	• stosowanie zasad metrologii w metodach spektralnych	• kurs podstawowy z metrologii chemicznej dla studentów chemii • szkoły letnie „Metrologia in chemistry”

Tab. 4. Wybrane przykłady instytucji zajmujących się aktywnie pracami badawczymi oraz nauczaniem w obszarze metrologii chemicznej

Instytucja	Obszar badań	Dydaktyka
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu	• stosowanie zasad metrologii przy realizacji projektów naukowych • realizacja projektów związanych z wytwarzaniem i certyfikacją nowych CRM	• kurs podstawowy z chemii analitycznej z elementami metrologii chemicznej dla studentów chemii
Uniwersytet w Białymstoku	• stosowanie zasad metrologii w metodach spektralnych oraz w badaniach specjacji	• kurs podstawowy z metrologii chemicznej i kurs z walidacji metod pomiarowych dla studentów chemii oraz chemii kryminalistycznej i sądowej • szkoły letnie „Metrology in chemistry”
Uniwersytet Łódzki	• stosowanie matrycowych materiałów odniesienia w badaniach środowiskowych	• kurs podstawowy chemii analitycznej z elementami metrologii chemicznej dla studentów przedmiotu analityka chemiczna
Zachodniopomorski Uniwersytet Techniczny w Szczecinie	• stosowanie matrycowych materiałów odniesienia w badaniach środowiskowych	• przedmiot metrologia chemiczna i przygotowanie próbek analitycznych
Politechnika Gdańska	• badania podstawowe z zastosowaniem techniki rozcieńczeń izotopowych • udział w projektach dotyczących wytwarzania i certyfikacji matrycowych i bezmatrycowych materiałów odniesienia	• kurs podstawowy analityki chemicznej z elementami metrologii chemicznej dla studentów chemii • kursy magisterskie Erasmus Mundus z elementami metrologii chemicznej i jakości wyników
Politechnika Warszawska	• stosowanie zasad metrologii przy realizacji projektów naukowych • realizacja projektów związanych z wytwarzaniem i certyfikacją nowych CRM	• kurs podstawowy analityki chemicznej z elementami metrologii chemicznej dla studentów chemii
Politechnika Śląska	• stosowanie zasad metrologii przy realizacji projektów naukowych • realizacja projektów związanych z wytwarzaniem i certyfikacją nowych CRM	• kurs podstawowy analityki chemicznej z elementami metrologii chemicznej dla studentów chemii
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Metali Nieżelaznych w Gliwicach	• wytwarzanie i certyfikacja matrycowych materiałów odniesienia (stopy)	• udział w seminariach, szkoleniach i konferencjach

W ramach Polskiej Akademii Nauk działają komitety naukowe, w tym Komitet Chemii Analitycznej gromadzący analityków działających w następujących zespołach:

- Zespół Analityki Sądowej i Toksykologicznej,
- Zespół Analityki Środowiskowej i Przemysłowej,
- Zespół Analityki Żywności, Surowców i Produktów Żywnościowych,
- Zespół Analizy Farmaceutycznej, Biomedycznej i Produktów Naturalnych,
- Zespół Analizy Spektralnej,
- Zespół Podstawowych Problemów Technik Analitycznych,
- Zespół Chemometrii i Metrologii Chemicznej,
- Zespół Chromatografii i Technik Pokrewnych,
- Zespół Elektroanalizy,
- Zespół Nauczania Chemii Analitycznej.

Zespoły zajmują się propagowaniem wiedzy w zakresie reprezentowanej tematyki, w tym zagadnienia związane z pomiarami chemicznymi i stosowaniem zasad metrologii stanowią ważny element działalności. Zespół Analizy Spektralnej jest od wielu lat zaangażowany w organizację konferencji „Jakość w chemii analitycznej”, gdzie wiodącym obszarem jest tematyka metrologii chemicznej. Zespół Chemometrii i Metrologii Chemicznej cyklicznie organizuje natomiast konferencję „Chemometria i metrologia w analityce” (od 2021 r.).

W Polskim Komitecie Normalizacyjnym (PKN) działa 337 Komitetów Technicznych (KT), przy czym wiele z nich obejmuje swoim działaniem również pomiary chemiczne. Poniżej przywołano jedynie kilka przykładów KT PKN:

- KT 12 Materiałów Wybuchowych i Wyrobów Pirotechnicznych,
- KT 28 Materiałów Ogniotrwałych,
- KT 29 Analiz Chemicznych Rud, Koncentratów i Metali,
- KT 121 Jakości Wody – Badania Chemiczne – Substancje Nieorganiczne,
- KT 122 Jakości Wody – Badania Chemiczne – Substancje Organiczne,
- KT 191 Chemii Gleby,
- KT 235 Analizy Żywności,
- KT 249 Analizy Chemicznej,
- KT 269 Bezpieczeństwa Chemicznego.

Członkowie Klubu Polskich Laboratoriów Badawczych POLLAB działają w sekcjach, a do statutowych zadań Klubu należy organizacja

tematycznych sympozjów, szkoleń oraz prowadzenie działalności wydawniczej związanej z funkcjonowaniem laboratoriów badawczych i wzorcujących, w tym laboratoriów chemicznych i biochemicznych. Sekcje i komisje funkcjonujące w ramach POLLAB są następujące:

- Sekcja Badań Materiałowych,
- Sekcja POLLAB-CHEM/EURACHEM-PL,
- Sekcja Laboratoria Budowlane,
- Sekcja Laboratoriów Wzorcujących,
- Sekcja Elektryczno-Mechaniczna i Środków Transportu,
- Sekcja Ochrony Środowiska,
- Sekcja PETROL-GAZ,
- Sekcja Przemysłu Tekstylnego i Skórzanego,
- Sekcja Żywności i Zdrowia,
- Komisja ds. auditorów,
- Komisja ds. metrologii.

Badania chemiczne, biochemiczne i biologiczne, zgodnie z zasadami metrologii, są realizowane w akredytowanych laboratoriach badawczych (według wymagań normy PN-EN ISO/IEC 17025 – Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących). Akredytacji udziela Polskie Centrum Akredytacji (PCA). Badania prowadzone są w obszarach klinicznych, medycznych i weterynaryjnych, inżynierii środowiska, nauk sądowych oraz wytwarzania materiałów odniesienia. Na podstawie informacji dostępnych na stronie domowej PCA (<https://pca.gov.pl/>) można podać liczbę laboratoriów akredytowanych:

- badania biologiczne i biochemiczne: ponad 130 laboratoriów,
- badania chemiczne: ponad 200 laboratoriów.

Wśród instytucji, w których znajdują się laboratoria akredytowane są: uniwersytety i politechniki, instytuty badawcze i branżowe (w tym instytuty należące do Sieci Badawczej Łukasiewicz), laboratoria Głównego Inspektoratu Ochrony Roślin i Nasiennictwa, laboratoria Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, Narodowy Instytut Leków, Stacje Sanitarно-Epidemiologiczne, Wojewódzkie Inspektoraty Weterynarii oraz laboratoria przemysłowe.

2.2. Metodyka prowadzenia pomiarów wielkości chemicznych

Wyznaczenie wartości wielkości mierzonej (oznaczenie zawartości analitu w próbce) wymaga pobrania odpowiedniej części materiału z dostarczonej do laboratorium reprezentatywnej porcji badanego obiektu, a następnie przeprowadzenie szeregu procesów fizykochemicznych i chemicznych związanych m.in. z wydzieleniem analizowanego składnika z matrycy i jego ewentualnym zatężeniem (lub rozcieńczeniem), kończąc na wykonaniu właściwego pomiaru. W tabeli 5 zestawiono najważniejsze etapy procedury analitycznej stosowanej do wyznaczania wielkości chemicznych.

Tab. 5. Najważniejsze etapy procedury analitycznej stosowanej do wyznaczania wielkości chemicznych

Etap analityczny	Komentarz
Opis problemu	Wybór procedury analitycznej obejmującej przygotowanie próbki i wybór techniki pomiarowej wymaga określenia celu badań, czyli celu wykorzystania uzyskanych wyników.
Wybór techniki pomiarowej	Wybór techniki pomiarowej zależy od rodzaju analitu, jego zawartości w próbce, otoczenia chemicznego (matrycy) oraz możliwych interferencji.
Otrzymanie próbki reprezentatywnej	Wielkość próbki zależy od stopnia jednorodności badanego obiektu, który często jest różny dla różnych analitów.
Otrzymanie próbki laboratoryjnej	Ten etap obejmuje pozyskanie próbki z badanego obiektu, takiej dla której możliwe jest prowadzenie operacji w laboratorium.
Określenie liczby powtórzeń	Liczba powtórzonych próbek laboratoryjnych z jednej strony pozwala na wyznaczenie rozrzutu wyników, a z drugiej strony zależy zarówno od wielkości próbki laboratoryjnej, jak i niezbędnej wielkości próbki przygotowanej do wykonania pomiaru.
Przygotowanie fizyko-chemiczne w laboratorium	Ten etap obejmuje różne procesy fizyko-chemiczne (np.: suszenie, mielenie, przesiewanie, spopielanie, mineralizacja, ekstrakcja), które są niezbędne do przygotowania próbek w formie dogodnej do pomiaru za pomocą danej techniki pomiarowej.
Wybór metody usuwania interferencji	Ten etap może być realizowany przy zastosowaniu operacji fizyko-chemicznych pozwalających na oddzielenie analitu od matrycy, poprzez zastosowanie matrycowych materiałów odniesienia oraz za pomocą odpowiednio dobranego wzorcowania połączonego z korektą matematyczną.
Wzorcowanie przyrządu pomiarowego	Możliwe są różne metody wzorcowania. Do najczęściej stosowanych należą: wzorcowanie zewnętrzne za pomocą czystych substancji, metoda dodatku wzorca, metoda wzorca wewnętrznego.
Pomiar	Pomiar wymaga doboru właściwej techniki pomiarowej, optymalizacji warunków pomiarowych, jak również wykonania odpowiedniej liczby powtórzeń.
Obliczenia	Algorytm stosowany do wykonania obliczeń zależy zarówno od stosowanej techniki pomiarowej, jak i celu wykorzystania wyników. Należy pamiętać również o różnych sposobach wyrażania stężenia.

Problemy i wyzwania metrologii chemicznej

Zakres działania laboratorium chemicznego nie obejmuje jedynie wyznaczenia wartości wielkości dla badanego obiektu, ale jest to cały proces prowadzący do rozwiązania problemu klienta. Nadrzędnym celem jest wiedza dotycząca zastosowania wyników pomiarów, co determinuje sposób przygotowania próbki, wybór techniki pomiarowej, wybór techniki kalibrowania oraz sposobu zapewnienia spójności pomiarowej wyników, jak również określenie poziomu niepewności docelowej.

Walidacja procedury pomiarowej

Celem walidacji procedury pomiarowej jest potwierdzenie tego, że jest odpowiednia do celu prowadzenia badań. W przypadku pomiarów chemicznych scenariusz walidacji oraz wybór kluczowych parametrów musi być dobierany każdorazowo do danego zadania analitycznego. Zaplanowane działania walidacyjne muszą uwzględniać różnorodność obiektów badań, różnorodność substancji, których stężenie lub zawartość jest celem prowadzenia pomiarów, ale musi też uwzględniać możliwości i ograniczenia wybranej techniki pomiarowej.

Zapewnienie spójności pomiarowej

W typowych pomiarach ilościowych do obliczenia wyniku analitycznego konieczne jest wykonanie przynajmniej dwóch pomiarów. Jeden pomiar to wyznaczenie masy lub objętości analizowanej próbki, a drugi pomiar to wyznaczenie wielkości, która jest proporcjonalna do zawartości analitu w analizowanej próbce.

W przypadku pierwszego etapu, czyli wyznaczenia masy próbki, stosowane są wagi (np. laboratoryjne, analityczne, mikrowagi), dla których każde laboratorium powinno posiadać aktualne świadectwo wzorcowania oraz wyznaczyć przewidywaną częstotliwość wzorcowania, a do sprawdzania wag w okresie między wzorcowaniem stosować odważniki, dla których posiada świadectwo wzorcowania.

W przypadku pomiaru zawartości danego składnika w próbce nie ma możliwości ustanowienia systemu zapewniającego spójność pomiarową dla każdego rodzaju procesu analitycznego, tj.: rodzaju próbki i rodzaju analitu. Nie jest możliwe przygotowanie *a priori* zestawu

wzorców dla wszystkich rodzajów pomiarów chemicznych. W przypadku pomiarów chemicznych nie dysponujemy infrastrukturą laboratoriów wzorcujących i uniwersalnym systemem zapewnienia spójności pomiarowej.

W praktyce, czyste substancje chemiczne o najlepszej dostępnej czystości i ściśle określonym składzie chemicznym (substancje wzorcowe pierwsze) służą do wzorcowania (w pomiarach chemicznych stosuje się powszechnie termin „kalibrowanie”) przyrządów pomiarowych, co oznacza przypisanie odpowiedzi przyrządu pomiarowego do znanej zawartości danej substancji.

Aby zapewnić spójność pomiarową dla próbek o złożonym składzie (złożonej matrycy), najważniejsze są matrycowe, certyfikowane materiały odniesienia (CRM), których celem jest odtworzenie wszystkich cech badanego obiektu.

Na świecie jest wiele instytucji zajmujących się wytwarzaniem CRM-ów, każda z tych instytucji ma swoją specyfikę. Dostępne bazy danych umożliwiają wyszukanie dostępnych materiałów i na podstawie specyfikacji dobranie do potrzeb danego laboratorium. Istniejące bazy danych:

- COMAR: www.bam.de,
- VIRM: www.virm.net,
- REFMAT: www.refmat.org.pl,
- BAM: www.bam.de,
- LGC: www.lgc.co.uk,
- NIST: www.nist.gov,
- IChTJ: www.ichtj.waw.pl.

W systemie akredytacji ustanowiono wymagania dla producentów materiałów odniesienia, a wymagania te wynikają z zapisów odpowiednich przewodników lub norm międzynarodowych. Poniżej przedstawiono zestawienie grup najważniejszych dokumentów opisujących wymagania stawiane producentom CRM-ów oraz dotyczące stosowania materiałów odniesienia:

- PN-EN ISO/IEC 17025 – Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych,
- PKN-ISO Guide 30 – Materiały odniesienia – Wybrane terminy i definicje,
- PKN-ISO Guide 31 – Materiały odniesienia – Zawartość certyfikatów, etykiet i dokumentacji towarzyszącej,

- ISO Guide 33 – Reference materials – Good practice in using reference materials,
- PN-EN ISO 17034 – Ogólne wymagania dotyczące kompetencji producentów materiałów odniesienia,
- PKN-ISO Guide 35 – Materiały odniesienia – Wytyczne dotyczące charakteryzowania oraz oceny jednorodności i stabilności,
- PKN-ISO/IEC Guide 99 – Międzynarodowy słownik metrologii – Pojęcia podstawowe i ogólne oraz terminy z nimi związane (VIM),
- PKN-ISO/TR 16476 – Materiały odniesienia – Ustanawianie i wyrażanie spójności pomiarowej wartości wielkości przypisanych do materiałów odniesienia.

W tabeli 6 zestawiono definicje odnoszące się do materiałów odniesienia stosowanych w pomiarach chemicznych.

Tab. 6. Definicje odnoszące się do materiałów odniesienia stosowanych w pomiarach chemicznych

Określenie	Definicja
Certyfikowany materiał odniesienia (ang. <i>certified reference material</i> – CRM).	Materiał odniesienia opatrzony certyfikatem, dla którego każdej wartości przypisana jest niepewność na określonym poziomie ufności.
Laboratoryjny materiał odniesienia (ang. <i>laboratory reference material</i> – LRM).	Roboczy materiał odniesienia stosowany do wewnętrznej kontroli jakości. Wartości odniesienia ustalane są przy wykorzystaniu zwalidowanej procedury pomiarowej.
Matrycowy materiał odniesienia (ang. <i>matrix reference material</i>).	Materiał stosowany głównie do walidacji procedur analitycznych oraz wzorcowania przyrządów pomiarowych. Wyróżnić można: pierwotne materiały odniesienia, laboratoryjne materiały odniesienia oraz wtórne materiały odniesienia.
Bezmatrycowy materiał odniesienia (ang. <i>matrix-free reference material</i>).	Materiał odniesienia, którego skład matrycy nie wpływa na wynik oznaczenia. Materiały te stosowane są do wzorcowania przyrządów analitycznych. Można wśród nich wyróżnić czyste substancje i roztwory wzorcowe.

Zastosowanie materiałów odniesienia w pomiarach chemicznych obejmuje:

- walidację procedur analitycznych,
- wzorcowanie przyrządów pomiarowych,
- wyznaczanie dokładności,
- szacowanie niepewności,
- wewnątrz laboratoryjną kontrolę jakości wyników.

W Polsce, akredytację potwierdzającą kompetencje producenta CRM posiada sześć instytucji, które przedstawiono w tabeli 7.

Tab. 7. Zestawienie instytucji posiadających akredytację potwierdzającą kompetencje producenta CRM

Nr akredytacji	Nazwa producenta	Obiekty
RM 001	Centralne Laboratorium Pomiarowo-Badawcze Sp. z o.o.	• odpadowy materiał odniesienia • koksowy materiał odniesienia • węglowy materiał odniesienia
RM 002	LabStand Sp. z o.o. Laboratorium wzorcujące	• wodne wzorce pehametryczne • ciekłe wzorce konduktometryczne • ciekłe wzorce redoks • wiskozymetryczny materiał odniesienia
RM 003	Okręgowy Urząd Miar w Łodzi	• nieorganiczne materiały odniesienia • organiczne materiały odniesienia • właściwości fizykochemiczne
RM 004	Laboserwis Sp. z o.o.	• gazowy materiał odniesienia (propan w powietrzu syntetycznym)
RM 005	Air Liquide Polska Sp. z o.o.	• wieloskładnikowy gazowy materiał odniesienia
RM 006	Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Metali Nieżelaznych	• stopy: miedzi, glinu, cyny, cynku, żelaza

Ponadto w Polsce prowadzone były projekty w konsorcjach, w skład których wchodziły GUM, uczelnie, instytuty naukowe oraz firmy zajmujące się dystrybucją CRM-ów. Były to prace finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBR) oraz realizowane w ramach The European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR). Poniżej wymieniono realizowane projekty:

- projekt poświęcony wytworzeniu wodnych wzorców alkoholu do wzorcowania analizatorów wydechu, tam gdzie wyniki pomiaru są wykorzystywane do celów sądowych – tytuł: „Certified forensic alcohol reference materials”, nazwa skrócona: ALCOREF, numer projektu: 16RPT02 – nad wytworzeniem i certyfikacją CRM-u pracowało 11 partnerów, w tym z Polski Główny Urząd Miar oraz Uniwersytet Warszawski,
- projekt poświęcony wytworzeniu wzorców wybranych substancji psychoaktywnych do kontroli nielegalnego rynku narkotykowego, do celów bezpieczeństwa i obronności państwa – tytuł: „Opracowanie na potrzeby wymiaru sprawiedliwości wzorców nowych substancji psychoaktywnych oraz szybkich testów do ich wykrywania”, numer projektu: DOB-BIO6/16/44/2014 – realizowany na rzecz bezpieczeństwa i obronności państwa w ramach konkursu 6/2014, finansowany przez NCBR i angażujący jednostki, takie jak: Centralne Laboratorium Kryminalistyczne Policji, Uniwersytet

Warszawski oraz Łódzki Regionalny Park Naukowo-Technologiczny Sp. z o.o.,

- projekt poświęcony wytworzeniu serii wzorców próbek środowiskowych (gleba, osady dennie, tkanki) dla polskich laboratoriów badawczych – tytuł: „Opracowanie i atestacja nowych typów materiałów odniesienia niezbędnych do uzyskania akredytacji europejskiej przez polskie laboratoria zajmujące się analityką przemysłową”, akronim: MODAS – finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu INNOTECH, angażujący polskie ośrodki badawcze (Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, Politechnika Gdańska, Politechnika Śląska, Politechnika Warszawska, Politechnika Wrocławska, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Uniwersytet Warszawski) oraz firmę – dystrybutora wzorców (LGC Standards Sp. z o.o.).

2.3. Metody pomiarowe stosowane w pomiarach wielkości chemicznych

Metody analityczne są klasyfikowane ze względu na charakter pomiaru (wielkością może być np. masa, objętość, natężenie promieniowania czy ładunek elektryczny) [5].

W metodach grawimetrycznych (wagowych) wyznacza się masę analitu lub masę odpowiadającego mu związku chemicznego. Przeprowadza się wzorcowanie wagi i odważników wzorcowych w akredytowanych laboratoriach wzorcujących.

W metodach objętościowych wyznacza się objętość roztworu, zawierającego taką ilość odczynnika, która reaguje całkowicie z analitem. Wzorcowanie naczyń miarowych (kolby miarowe, pipety miarowe) polega na tym, że laboratorium kupuje szkło miarowe z certyfikatem indywidualnym lub z certyfikatem dotyczącym danej klasy szkła miarowego (np. kolba miarowa klasy A).

W metodach elektrochemicznych wykorzystuje się pomiar różnych właściwości elektrycznych, np.: potencjału, natężenia prądu, oporu elektrycznego lub wielkości ładunku. Poniżej zestawiono stosowane metody elektrochemiczne ze wskazaniem wielkości mierzonej:

- metody potencjometryczne – mierzymy potencjał elektrody, który jest funkcją aktywności analitu(ów) w roztworze: potencjometria bezpośrednia, miareczkowanie potencjometryczne,
- metody kulometryczne – mierzymy ładunek niezbędny do utlenienia lub redukcji: kulometria bezpośrednia, miareczkowanie kulometryczne,
- metody konduktometryczne – mierzymy opór elektryczny (przewodnictwo) badanego roztworu: konduktometria bezpośrednia, miareczkowanie konduktometryczne,
- metody woltamperometryczne – mierzymy prąd płynący pomiędzy elektrodami, do których przykładamy stałe lub zmienne w czasie napięcie,
- metody polarograficzne – wielkość prądu jest funkcją liniowo zmiennego w czasie napięcia przyłożonego do elektrod,
- metoda woltamperometrii inwersyjnej – wielkość prądu jest funkcją liniowo zmiennego w czasie napięcia przyłożonego do elektrod, przy czym na jednej z elektrod uprzednio elektrolitycznie wydzielono analit,
- metoda miareczkowania amperometrycznego – mierzymy prąd płynący pomiędzy elektrodami przy stałym, ściśle określonym napięciu przyłożonym do elektrod,
- metody elektrolityczne – mierzymy masę produktów elektrolizy.

W metodach spektroskopowych wykorzystuje się oddziaływanie promieniowania elektromagnetycznego z atomami lub cząsteczkami analitu bądź też obserwuje się promieniowanie emitowane przez analit. Podział spektroskopii według rodzajów układów, których widma badamy, jest znacznie ważniejszy, ponieważ dotyczy istoty badanych w spektroskopii procesów. Z tego punktu widzenia, można rozróżnić następujące działy:

- spektroskopia jądrowa,
- spektroskopia atomowa,
- spektroskopia cząsteczkowa (molekularna).

W praktyce laboratoryjnej stosuje się często podział spektroskopii według metody otrzymywania widma. W zależności od tego rozróżniamy trzy rodzaje widm: widma absorpcyjne, widma emisyjne i widma ramanowskie.

Takie podejście pozwala na wyróżnienie następujących działów spektroskopii:

- spektroskopia absorpcyjna,
- spektroskopia emisyjna,
- spektroskopia ramanowska (rozpraszania).

Biorąc pod uwagę to, że metody spektroskopowe należą do jednych z najczęściej wykorzystywanych w laboratoriach prowadzących pomiary wielkości chemicznych, warto jeszcze przywołać dodatkowy podział technik spektralnych.

Szczegółowy podział metod spektrometrycznych (spektrometria atomowa i cząsteczkowa) jest następujący:

- płomieniowa spektrometria atomowa emisyjna,
- spektrometria atomowa absorpcyjna,
- spektrometria atomowa fluorescencyjna,
- spektrometria w podczerwieni z transformacją Fouriera,
- spektrometria z plazmą sprzężoną indukcyjnie,
- spektrometria emisyjna promieniowania rentgenowskiego,
- spektrometria atomowa absorpcyjna i fluorescencyjna,
- spektrometria cząsteczkowa w zakresie nadfioletowym i widzialnym,
- spektrometria w podczerwieni i ramanowska,
- spektrometria jądrowego rezonansu magnetycznego.

Wśród innych wielkości wykorzystywanych w chemicznych metodach pomiarowych można wymienić: stosunek masy do ładunku jonów (spektrometria mas), szybkość rozpadu promieniotwórczego, ciepło reakcji, szybkość reakcji, przewodnictwo cieplne próbki, aktywność optyczna czy też współczynnik załamania światła.

2.4. Kadra metrologiczna

Kadra zajmująca się pomiarami właściwości fizyko-chemicznych jest zatrudniona przede wszystkim w następujących jednostkach:

- Główny Urząd Miar i Okręgowe Urzędy Miar,
- uczelnie, instytuty badawcze,
- laboratoria akredytowane wzorcujące, badawcze i medyczne.

2.5. Identyfikacja problemów i potrzeb

Najważniejszym wyzwaniem w obszarze metrologii chemicznej w Polsce jest potrzeba zabezpieczenia zestawu chemicznych, certyfikowanych materiałów odniesienia dopasowanych do potrzeb laboratoriów, szczególnie tych działających w obszarach regulowanych prawnie. Dotyczy to m.in. materiałów odniesienia produktów spożywczych, próbek środowiskowych, czy też próbek klinicznych. Główny Urząd Miar wspiera takie działania, z jednej strony utrzymując wytwarzanie wzorców jonów metali, pH czy też mieszanin gazowych, niemniej jednak brakuje zarówno infrastruktury, jak również procedur wspomagających wytwarzanie większej różnorodności wskazanych materiałów.

Należy przy tym pamiętać, że producent chemicznego CRM musi określić jego czystość, jednorodność i trwałość. Dodatkowo dla CRM-ów wytwarzanych w formie stałej, w tym proszków, producent powinien określić najmniejszą wartość odważki, która zapewnia odtworzenie cech materiału. Dla materiałów stałych, wytwarzanych w formie zwartej i służących jako CRM dla badań powierzchniowych, producent powinien podać informacje o jednorodności rozmieszczenia danej substancji na powierzchni, tak aby CRM był zgodny ze średnicą wiązki pomiarowej.

3.1. Wprowadzenie

Pomiary wielkości chemicznych są niezbędne w bardzo wielu dziedzinach, zaliczanych do obszarów priorytetowych, szczególnie w obszarze zdrowia, ochrony środowiska naturalnego, bezpieczeństwa cywilnego, bezpieczeństwa energetycznego czy rozwoju konkurencyjnej gospodarki.

Polskie laboratoria badawcze i wzorcujące, stosujące zasady metrologiczne w pomiarach wielkości chemicznych, są w większości dobrze wyposażone w aparaturę pomiarową i tym samym spełniają podstawowe wymagania odnośnie niezbędnej infrastruktury. Konieczne są natomiast działania pozwalające nie tylko na utrzymanie wymaganej sprawności, ale również na inwestycje w pozyskanie aparatury o najwyższych parametrach, umożliwiającej rozwój nowych technik pomiarowych, szczególnie tych zapewniających wysoki status metrologicznych wyników pomiarów i uznawanych na poziomie międzynarodowym.

Niezmiernie ważny jest też udział polskich laboratoriów w międzynarodowych projektach, dotyczących wyżej wspomnianych obszarów, finansowanych z horyzontalnych funduszy Komisji Europejskiej, m.in. The European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR) czy Interreg. Istotny jest też udział przedstawicieli krajowych w organizacjach międzynarodowych, w tym EUROLAB, EURACHEM, European Association of National Metrology Institutes (EURAMET) czy International Measurement Confederation (IMEKO).

3.2. Kierunki rozwoju metrologii chemicznej

Najważniejsze kierunki rozwoju metrologii chemicznej to zapewnienie ujednoliconego systemu pomiarowego gwarantującego wymaganą metrologiczną porównywalność wyników pomiarów oraz zapewnienie spójności pomiarowej dla szerokiego zakresu badanych obiektów, jak również dla szerokiego spektrum wielkości mierzonych. Należy mieć także na względzie dużą zmienność w odniesieniu do zawartości poszczególnych składników, od ilości śladowych do poziomów typowych dla składników głównych. W związku z tym, ważnym wyzwaniem jest opracowywanie i wytwarzanie wzorców odniesienia o zróżnicowanym zastosowaniu, w tym do pomiarów przesiewowych lub do pomiarów potwierdzeniowych. W tym drugim przypadku mamy najczęściej do czynienia z obszarem regulowanym prawnie, gdzie na podstawie wyników pomiarów, z przypisaną niepewnością, podejmowane są wiążące decyzje.

Należy również wspomnieć, że różnorodność obiektów oraz różnorodność mierzonych wielkości chemicznych powodują konieczność zaangażowania w system metrologii chemicznej bardzo wielu laboratoriów specjalistycznych. Nie jest możliwe utworzenie laboratorium spełniającego wszystkie oczekiwania społeczne i przemysłowe, a także nie jest możliwe zebranie „pod jednym dachem” zaawansowanej aparatury, wymaganej infrastruktury oraz kompetencji w tak szerokim zakresie badań. Z tego względu niezbędnym elementem rozwoju jest rozwój sieci laboratoriów, obejmujących swoim działaniem i swoimi możliwościami pomiarowymi różne rodzaje obiektów i różnorodne zapotrzebowania społeczne, często związane z regulacjami prawnymi. Niezbędnym elementem takiej sieci jest wybór laboratoriów odniesienia, dysponujących aparaturą zapewniającą najwyższą dokładność i precyzję pomiarów w danym obszarze. Niezbędne jest również wsparcie dla producentów specjalistycznych materiałów odniesienia, zapewniających porównywalność wyników i ich spójność metrologiczną.

Kolejnym, niezmiernie ważnym kierunkiem rozwoju jest budowanie kompetencji pracowników laboratoriów, co można osiągnąć poprzez ujednolicony system kształcenia w obszarze metrologii chemicznej. Należy także wspierać działania związane z wprowadzaniem przedmiotu metrologia chemiczna nie tylko na kierunkach chemicznych, ale również na biologii, geologii, medycynie, farmacji czy

technologii żywności. Realizacja prac dyplomowych, przygotowywanie publikacji naukowych oraz udział w konferencjach branżowych z pewnością są kierunkami pozwalającymi na wzmocnienie kompetencji osób zajmujących się lub odpowiadających za prowadzenie pomiarów wielkości chemicznych.

Ważne jest również budowanie świadomości społecznej, w tym szerzenie wiedzy na temat wagi metrologii w życiu codziennym, wykorzystania wyników pomiarów oraz umiejętności oceny informacji podawanych np. przez producentów.

3.2.1. Przemysł (zaawansowana produkcja)

Obszar wykorzystywania metrologii chemicznej w procesach produkcyjnych jest bardzo szeroki. Dotyczy to m.in. wspomagania rozwoju nowych technologii, zwiększania efektywności produkcji, oceny składu materiałów wejściowych od dostawców, półproduktów, jak i wyrobu końcowego, oceny trwałości produktu, a także wpływu produkcji na środowisko naturalne.

Do metod zapewniających oczekiwaną jakość procesów produkcyjnych i produktów końcowych zaliczamy przede wszystkim te, które pozwalają na identyfikację obecności i wyznaczanie zawartości składników kluczowych. W przypadku produkcji żywnościowej istotna jest ocena składu produktu końcowego zarówno pod względem składników odżywczych (np. białka, witaminy, składniki mineralne), jak i składników niekorzystnych (np. substancje toksyczne). W wielu przypadkach istotna jest też ocena zawartości składników w aspekcie najwyższych (składniki niepożądane) lub najniższych (składniki niezbędne) dopuszczalnych stężeń (NDS). W pierwszym przypadku może to być oznaczanie zawartości pierwiastków uznanych za toksyczne (np.: rtęć, kadm, ołów w mleku w proszku dla niemowląt), a w drugim przypadku może to być zawartość substancji czynnej w leku. Dla najwyższych dopuszczalnych stężeń zasadne będzie wykorzystanie czułych technik spektrometrii atomowej (np. atomowej spektrometrii absorpcyjnej z atomizacją elektrotermiczną lub atomowej spektrometrii mas z plazmą wzbudzoną indukcyjnie), a dla najniższych racjonalne będzie zastosowanie wysokorozdzielczej chromatografii cieczowej połączonej z cząsteczkową spektrometrią mas. W przemyśle farmaceutycznym, poza identyfikacją i określeniem stężenia substancji czynnej, istotne

są też określenie zawartości potencjalnych zanieczyszczeń (tu mogą być wykorzystywane wyżej wspomniane techniki atomowej lub częsteczkowej spektrometrii mas), jak i ocena trwałości produktu, czyli badania stabilności substancji czynnej i identyfikacja potencjalnych produktów rozkładu pod wpływem warunków środowiskowych (tu nieoceniona jest spektroskopia magnetycznego rezonansu jądrowego – NMR).

Technologie kwantowe w metrologii chemicznej to przede wszystkim redefinicja podstawowych jednostek miar układu SI. Można uznać, że aktualne definicje jednostek miar, w tym kilograma i mola weszły w epokę kwantową. Warto przy tym przypomnieć, że początkowo, każda jednostka miała własną definicję, wynikającą z charakteru danej właściwości, a te definicje wynikały z praw fizyki klasycznej. Obecnie stosowany jest „kwantowy układ SI”, wykorzystujący kwantowe stałe fizyczne, takie jak: stała Avogadra, stała Boltzmanna, ładunek elementarny oraz stała Plancka, które pozwalają na zdefiniowanie każdej wielkości mierzonej. Pierwszymi wzorcami kwantowymi były m.in. system odtwarzania jednostki napięcia elektrycznego (1 wolta) wykorzystujący zjawisko Josephsona oraz system odtwarzania jednostki rezystancji (1 oma) wykorzystujący kwantowy efekt Halla.

W pomiarach wielkości chemicznych wykorzystywana jest waga Watta do ustanowienia odtwarzalnego wzorca kilograma na podstawie natężenia oraz napięcia prądu, zdefiniowanych przez stałe ładunku elektrycznego i stałą Plancka. Tak zdefiniowana jednostka kilograma zapewnia odtwarzalność.

Robotyka i automatyzacja procesów pomiarowych jest niezmiernie ważnym i perspektywicznym kierunkiem rozwoju metrologii chemicznej. Obejmuje m.in. budowanie i wdrażanie automatycznych linii pomiarowych, gdzie większość czynności laboratoryjnych jest zautomatyzowana. Rozwój układów zautomatyzowanych pozwala na istotne zwiększenie powtarzalności i odtwarzalności pomiarów, z pewnością poprawia precyzję pomiarów, jak również wspomaga oszczędność zużycia odczynników.

Ważnym kierunkiem badań są również systemy pozwalające na prowadzenie pomiarów na miejscu, a dotyczy to m.in. badań polowych (badania środowiskowe w naturze i w miejscu pracy), badań na miejscu zdarzenia (badania kryminalistyczne), badań przy łóżku pacjenta (np. pomiar poziomu glukozy we krwi i pomiar poziomu białka

w moczu) czy też badań bezpośrednio na linii produkcyjnej. Ten kierunek jest bardzo rozwojowy, a możliwości tworzenia nowych układów, w tym zminiaturyzowanych, z pewnością poszerzą potencjał pomiarów wielkości chemicznych, tak aby wspomagać inne obszary, w których wyniki takich pomiarów są niezmiernie istotne.

3.2.2. Energia

Przejście ze źródeł klasycznych na źródła odnawialne oznacza konieczność badania wpływu budowanej infrastruktury na środowisko, w tym badania trwałości materiałów konstrukcyjnych, przy których można wymienić chociażby badanie procesów korozji i ich produktów. Badania właściwości chemicznych mogą też wspomagać przygotowywanie rozwiązań zwiększających efektywność energetyczną nowych źródeł energii, a w tym przypadku niezmiernie istotne będzie wykorzystywanie elektrochemicznych technik pomiarowych, m.in. potencjometrii czy chronowoltamperometrii. Niezbędny przy tym jest rozwój zarówno wzorców, jak i procedur odniesienia, tak aby zapewnić porównywalność i spójność pomiarów.

Nowe materiały do zbierania i magazynowania energii to przede wszystkim baterie ze stałym elektrolitem. Są one tańsze i bezpieczniejsze od powszechnie stosowanych baterii litowych. Badania rozwojowe wymagają stosowania elektrochemicznych technik pomiarowych oraz technik pozwalających na oznaczanie nie tylko zawartości litu (techniki spektrometrii atomowej), ale również innych składników proponowanych nowych rozwiązań w zakresie budowy elektrod. Przewiduje się, że takie rozwiązania pozwolą na długotrwałe magazynowanie energii, stąd uznano to za ważny kierunek rozwoju pomiarów wielkości chemicznych.

Innym rodzajem materiałów są polimery, w których wykorzystuje się zdolność do odwracalnej zmiany struktury pod wpływem promieniowania słonecznego, co może być wykorzystywane do pochłaniania i przechowywania energii słonecznej. W tym przypadku badanie struktur i ich przemian układów polimerowych wymaga stosowania spektroskopii Ramana oraz różnych technik badania powierzchni.

3.2.3. Środowisko

Monitorowanie zanieczyszczeń powietrza, wody i gleby jest niezmiernie ważnym kierunkiem rozwoju. Z jednej strony konieczne jest rozwijanie technologii pomiarowych umożliwiających pomiary obecności zanieczyszczeń na coraz niższym poziomie stężeń, a z drugiej strony konieczna jest identyfikacja nowych substancji, często tych będących konsekwencją wprowadzania nowych technologii. W tym przypadku konieczne jest rozwijanie kompleksowych, często nierutynowych scenariuszy badawczych, obejmujących szereg technik pomiarowych pozwalających na zbieranie komplementarnych informacji o badanym obiekcie.

Jednym z ważnych zagadnień jest obserwacja zmian klimatu, w tym przede wszystkim pomiary wielkości fizycznych, tj.: temperatury czy wilgotności. Nie mniej ważnym elementem tych obserwacji są pomiary składu chemicznego różnych elementów środowiskowych (gleby, wody, powietrza), tak aby ocenić konsekwencje zmian klimatycznych na ekosystem. W tym przypadku niezbędna jest gotowość laboratoriów chemicznych do pomiaru różnorodnych wielkości mierzonych, w zależności od celu badań.

Obserwacje zmian oceanów również wymagają zastosowania metod pomiarowych pozwalających na śledzenie potencjalnych procesów. Do najważniejszych można zaliczyć obecność zanieczyszczeń wprowadzanych w wyniku działalności człowieka zarówno bezpośrednio w wodzie oceanicznej, jak również w żyjących na różnych głębokościach organizmach żywych oraz w zawiesinie.

Ważnym i stosunkowo nowym kierunkiem badań środowiskowych są pomiary zawartości mikroplastiku, co jest m.in. dobrym przykładem wyzwań, jakie stoją przed pomiarami wielkości chemicznych, a tym samym istotnym wyzwaniem rozwoju metrologii chemicznej. Obecność niewielkich cząstek (mikro- i nano-) plastiku wynika z powszechnego stosowania tworzyw sztucznych i powstających odpadów. Natomiast zastosowanie odpowiednich procedur badawczych wymaga przede wszystkim określenia, jakimi metodami można określić rodzaj pierwotnego tworzywa (polimeru), rodzaj składników pobocznych (zanieczyszczeń), wielkość i kształt cząsteczek plastiku, jak również profil rozrzutu wielkości cząstek. Ta różnorodność w ramach jednej wielkości, jak obecność mikro- i nanoplastiku, jest ogromnym wyzwaniem

metrologicznym i z pewnością dotyczy przemysłu, który produkuje i/lub wykorzystuje tworzywa sztuczne oraz obszarów związanych ze zdrowiem, z zanieczyszczeniem środowiska czy zagospodarowania odpadów z tworzyw sztucznych.

3.2.4. Zdrowie

Pomiary wielkości chemicznych w aspekcie zdrowia to kolejna, bardzo szeroka tematyka. Do najważniejszych zagadnień można zaliczyć po pierwsze zapewnienie spójności pomiarowej oraz porównywalności metrologicznej wyników uzyskiwanych w różnych laboratoriach klinicznych. Po drugie ważnymi wyzwaniem są poszukiwanie nowych wskaźników stanu pacjenta oraz opracowywanie i walidacja odpowiednich procedur pomiarowych.

Istotnym zagadnieniem dotyczącym „zdrowia” jest również ochrona przed radioterapią. W tym przypadku należy wspomnieć o procedurach syntezy radiofarmaceutyków, w tym określenia tożsamości syntetyzowanego związku chemicznego oraz potencjalnych zanieczyszczeń (np. produktów ubocznych syntezy).

Bezpieczna i zdrowa żywność jest ogromnym obszarem stanowiącym wyzwanie metrologii chemicznej. W tym zakresie kluczowe są procedury pomiarowe gwarantujące odpowiednie granice wykrywalności przy oznaczaniu obecności potencjalnych zanieczyszczeń i substancji toksycznych. Istotnym wyzwaniem jest zarówno różnorodność produktów (m.in. napoje, owoce, warzywa, słodczyce, produkty mięsne), jak i substancji obecnych w tych produktach.

3.2.5. Bezpieczeństwo i dobrobyt

W odniesieniu do tematyki bezpieczeństwa do najważniejszych wyzwań można zaliczyć opracowywanie i walidację procedur pomiarowych gwarantujących pomiary z możliwie najmniejszą przypisaną niepewnością i umożliwiających porównywanie uzyskanego wyniku z wartościami decyzyjnymi (akty prawne), a w konsekwencji podejmowanie właściwych decyzji. Dotyczy to m.in. badania obecności na rynku nielegalnych substancji psychotropowych, pomiarów zawartości alkoholu w wydychanym powietrzu czy obecności CBD i delta-9 THC w suchu i produktach z konopi. Jest to związane również z poszukiwaniem

obecności środków bojowych o silnych właściwościach toksycznych. Aktualnie brak jest wzorców chemicznych zapewniających spójność pomiarową w wyżej wymienionych obszarach.

3.3. Podsumowanie kierunków rozwoju metrologii chemicznej

Podsumowując, warto zwrócić uwagę na podstawową cechę pomiarów właściwości chemicznych, czyli różnorodność. Z tego powodu podstawowym wyzwaniem jest ciągły rozwój procedur pomiarowych oraz opracowywanie nowych wzorców chemicznych, w zależności od pojawiających się nowych potrzeb. Wśród tej różnorodności warto jednak wyróżnić kilka wiodących zagadnień, które z pewnością stanowią najważniejsze wyzwania cywilizacyjne:

- ujednolicenie systemu zapewnienia spójności pomiarowej i porównywalności wyników pomiarów wskaźników klinicznych (obszar: zdrowie),
- opracowanie strategii pomiarowej, w tym określenie rodzaju wielkości mierzonej w odniesieniu do zwiększającego się problemu obecności mikroplastiku w ekosystemie (obszar: środowisko),
- opracowanie strategii pomiarowych pozwalających na identyfikację nowych, często bardzo toksycznych substancji wykorzystywanych w celach kryminalnych (obszar: bezpieczeństwo).

Literatura

1. Bulska E., *Metrologia chemiczna*, Wydawnictwo Malamut, Warszawa 2012.
2. Prichard E., Barwick V., *Quality assurance in analytical chemistry. Analytical techniques in the sciences (AnTs)*, John Wiley&Sons, Inc., Teddington 2007.
3. Kealey D., Haines P.J., *Chemia analityczna*, PWN, Warszawa 2005.
4. Baranowska I., *Analiza śladowa – zastosowania*, Wydawnictwo Malamut, Warszawa 2013.
5. Pyrżyńska K., *Analiza przepływowa – od teorii do praktyki*, Wydawnictwo Malamut, Warszawa 2017.

W rozdziale przedstawiono diagnozę stanu metrologii chemicznej w Polsce oraz opisano strategiczne kierunki jej dalszego rozwoju. Przeprowadzono analizę aktualnych wyzwań i możliwości w tym kluczowym dziale. W pierwszej części określono obszar merytoryczny, będący przedmiotem opracowania, a w kolejnej zaprezentowano ośrodki akademickie zajmujące się metrologią chemiczną wraz ze wskazaniem zakresu prowadzonych badań oraz dydaktyki. Omówiono również inne jednostki, takie jak: Komitet Chemii Analitycznej Polskiej Akademii Nauk, Komitety Techniczne Polskiego Komitetu Normalizacyjnego oraz Klub Polskich Laboratoriów Badawczych POLLAB. Ponadto zawarto informacje o metodyce prowadzenia tego typu pomiarów, instytucjach posiadających akredytację potwierdzającą kompetencje producenta certyfikowanych materiałów odniesienia oraz o realizowanych projektach. Zidentyfikowano także aktualne problemy i potrzeby. Następnie skoncentrowano się na przyszłości metrologii chemicznej w istotnych obszarach, wśród których wymieniono: przemysł, energię, środowisko, zdrowie oraz bezpieczeństwo i dobrobyt. Podsumowując, stwierdzono przede wszystkim, że podstawowym wyzwaniem jest ciągły rozwój procedur pomiarowych oraz opracowywanie nowych wzorców chemicznych. Zaznaczono, że metrologia chemiczna stanowi fundament do dalszych działań na rzecz wzmocnienia pozycji Polski w dziedzinie metrologii, podkreślając, że rozwój tej nauki jest niezbędny dla zwiększenia konkurencyjności gospodarki, bezpieczeństwa oraz jakości życia obywateli.

Słowa kluczowe: metrologia chemiczna, „Polska Metrologia”, diagnoza stanu metrologii, strategiczne kierunki rozwoju metrologii

CZĘŚĆ TRZECIA

Metrologia elektryczna



Prof. dr hab. inż. Janusz Gajda

ORCID: 0000-0003-4818-7663

**Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie**

ROR: <https://ror.org/00bas1c41>

Uzyskał stopień magistra, stopień doktora, stopień doktora habilitowanego oraz tytuł profesora odpowiednio w latach 1978, 1985, 1993 i 2001 w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie elektrotechnika. Obecnie jest zatrudniony na stanowisku profesora w Katedrze Metrologii i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej (AGH) w Krakowie. Obszary zainteresowań to: metrologia elektryczna i elektroniczna, identyfikacja obiektów, przetwarzanie sygnałów, pomiary parametrów ruchu drogowego oraz pomiary biomedyczne. Jest autorem ponad 250 publikacji naukowych, w tym siedmiu książek i pięciu patentów. Wypromował pięciu doktorów.

W latach 1999–2016 kierował Katedrą Metrologii i Elektroniki na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH. Od 2016 r. jest prodziekanem ds. nauki na tym wydziale. W latach 2007–2023 był członkiem Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej Państwowej Akademii Nauk, a w latach 2016–2023 przewodniczącym tego Komitetu. Od 2017 r. jest członkiem Rady Metrologii przy Prezesie Głównego Urzędu Miar. Od 2008 r. jest członkiem International Society of Weight-in-Motion.

Za swoją działalność naukową, dydaktyczną i organizacyjną został odznaczony Krzyżem Kawalerskim Orderu Odrodzenia Polski (2019), Złotym i Srebrnym Krzyżem Zasługi (2002 i 1998), Złotym Medalem za Wieloletnią Służbę (2009) oraz Medalem Komisji Edukacji Narodowej (1999).

Otrzymał pięć złotych i siedem srebrnych medali na Międzynarodowych Targach Wynałazków, m.in. w Warszawie, Seulu, Brukseli i Genewie. Wielokrotnie nagradzany Nagrodą Rektora AGH za osiągnięcia naukowe, dydaktyczne i organizacyjne.

Określenie obszaru merytorycznego metrologii elektrycznej

Zgodnie z powszechnie akceptowanym rozumieniem przyjmuje się, że metrologia elektryczna jest to dział metrologii zajmujący się pomiarami wielkości elektrycznych, takich jak: napięcie, prąd, rezystancja, pojemność i indukcyjność. Takie rozumienie pojęcia metrologii elektrycznej znajduje swoje uzasadnienie w międzynarodowych dokumentach [1, 2], w których zostały zdefiniowane jednostki wymienionych wielkości elektrycznych.

Zdaniem autora tego opracowania przytoczona powyżej definicja nadmiernie i w sposób nieuzasadniony ogranicza obszar zainteresowań metrologii elektrycznej. Dlatego na potrzeby tej pracy zostało przyjęte następujące, poszerzone określenie tego obszaru: metrologia elektryczna jest to obszar badań naukowych oraz działań o charakterze technologicznym, instrumentalnym i eksperymentalnym, które umożliwiają osiągnięcie następujących celów: pomiar wielkości elektrycznych, tj. parametrów charakteryzujących prąd elektryczny, napięcie, rezystancję, pojemność elektryczną, indukcyjność oraz wielkości z nimi powiązanych, jak np. parametry energii elektrycznej, opracowywanie metod, narzędzi i procedur zapewniających uzyskanie wymaganej dokładności pomiarów, zachowanie spójności pomiarowej z wzorcami mierzonych wielkości. Bardzo ważnym celem metrologii jest zapewnienie, że wyniki pomiaru charakteryzują się możliwie wysoką dokładnością i tę dokładność można ocenić zgodnie z międzynarodowymi normami. Osiąga się to poprzez stosowanie wzorców, odpowiednich procedur wzorcowania i technik pomiarowych.

Ponadto autor opracowania rozszerzył przytoczone powyżej określenia dotyczące metrologii elektrycznej i zaliczył do obszaru jej zainteresowań również pomiar wielkości nieelektrycznych, realizowanych metodami elektrycznymi.

Osiągnięcie przytoczonych powyżej celów stawianych przed metrologią elektryczną wymaga podejmowania działań w różnych obszarach, takich jak np.: opracowanie i konstrukcja przyrządów pomiarowych, poszukiwanie nowych technologii oraz udoskonalanie istniejących technologii wytwarzania czujników pomiarowych, opracowywanie nowych metod pomiarowych, opracowywanie i doskonalenie procedur wzorcowania i legalizacji przyrządów pomiarowych. Wszystkie te działania służą przede wszystkim podnoszeniu dokładności wyników pomiarowych oraz poszerzaniu zbioru wielkości mierzalnych. Metrologia elektryczna odgrywa kluczową rolę w wielu obszarach działalności współczesnego społeczeństwa, w tym m.in. w wytwarzaniu i dystrybucji energii, telekomunikacji, transporcie, produkcji i handlu oraz w ochronie zdrowia.

W obszarze zainteresowań metrologii elektrycznej mieści się również opracowywanie nowych technik i metod pomiarowych w celu sprostania pojawiającym się współcześnie wyzwaniom, takim jak dla przykładu wyzwania pomiarowe związane ze stosowaniem źródeł energii odnawialnej, pojazdami elektrycznymi, inteligentnymi sieciami elektroenergetycznymi, zarządzaniem transportem i infrastrukturą drogową, a także wyzwania pomiarowe związane z nowoczesną diagnostyką medyczną oraz zdalnym nadzorem medycznym. Ponadto metrologia elektryczna odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa, niezawodności i wydajności systemów elektrycznych, poczynając od urządzeń gospodarstwa domowego aż po rozległe sieci energetyczne. Ma ona również kluczowe znaczenie dla rozwoju nowych technologii, takich jak np.: źródła i wykorzystanie energii odnawialnej, rozwój pojazdów elektrycznych, telekomunikacja.

Z przedstawionej powyżej charakterystyki wynika, że metrologia elektryczna jest rozległym obszarem obejmującym zarówno działania o charakterze teoretycznym, jak również technicznym. Trzeba również podkreślić, że wyznaczenie ostrych granic pomiędzy poszczególnymi „metrologiami” nie jest możliwe. Różne obszary metrologii wzajemnie się przenikają i uzupełniają.

2.1. Charakterystyka akademickich ośrodków metrologicznych

2.1.1. Opis materiału badawczego

Podstawą, na której został oparty opis aktualnego stanu metrologii elektrycznej w Polsce, są wyniki ankiety przeprowadzonej przez autora. Do ankiety zostali zaproszeni kierownicy jednostek akademickich prowadzących badania w zakresie metrologii. Wybrane jednostki działają na różnym poziomie struktury organizacyjnej swoich uczelni. Były nimi zarówno wydziały, instytuty, katedry, a nawet kilku-, kilkunastoosobowe zespoły. Podstawą do wyłonienia tych jednostek były informacje zawarte na ich stronach internetowych. Łącznie zwrócono się do 52 tak rozumianych ośrodków z prośbą o udzielenie odpowiedzi na pytania zawarte w opracowanej ankiecie. Na ankietę odpowiedziało ponad 20 jednostek. W kilku przypadkach odpowiedź zawierała informację, że w danej jednostce są wprowadzane stosowane narzędzia i metody należące do obszaru metrologii, to jednak nie są tam prowadzone badania ani prace rozwojowe z tego zakresu lub metrologia nie jest głównym kierunkiem zainteresowań i aktywności jednostki. W dwóch innych przypadkach odpowiedź była tak lakoniczna, że nie była przydatna dla tego opracowania. W efekcie przeprowadzonej selekcji wybrane zostały odpowiedzi ankietowe udzielone przez przedstawicieli/kierowników 22 jednostek. Ich wykaz znajduje się w tabeli 1 wraz z podaniem autora udzielającego odpowiedzi.

Tab. 1. Akademickie ośrodki metrologiczne, które odpowiedziały na ankietę (w kolejności alfabetycznej)

Lp.	Nazwa ośrodka	Autor odpowiedzi
1	Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Metrologii i Elektroniki	Prof. dr hab. inż. Janusz Gajda
2	Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki	Dr hab. inż. Paweł Zydrón
3	Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii	Dr hab. inż. Andrzej Bień
4	Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji, Instytut Elektroniki, Zintegrowane Laboratorium Nanostruktur Sensorowych	Prof. dr hab. Katarzyna Zakrzewska
5	Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Fotoniki, Elektroniki i Techniki Światłnej	Prof. dr hab. inż. Marcin Kochanowicz
6	Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Katedra Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki	Prof. dr hab. inż. Waldemar Minkina
7	Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Metrologii i Systemów Informacyjnych	Dr hab. inż. Dariusz Świsulski
8	Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Katedra Automatyki i Informatyki	Dr hab. inż. Krzysztof Tomczyk
9	Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Zakład Optoelektroniki i Sieci Teleinformatycznych	Prof. dr hab. inż. Piotr Kisała
10	Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Automatyki i Metrologii	Prof. dr hab. inż. Jarosław Sikora
11	Politechnika Poznańska, Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej	Dr hab. inż. Cezary Jędryczka, Dr hab. inż. Grzegorz Wiczyński
12	Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Metrologii i Systemów Diagnostycznych	Dr hab. inż. Robert Hanus
13	Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Metrologii, Automatyki i Elektroniki	Prof. dr hab. inż. Marian Kampik
14	Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, Instytut Radioelektroniki i Technik Multimedialnych, Zakład Elektroniki Jądrowej i Medycznej, Pracownia Systemów Akwizycji i Przetwarzania Informacji	Dr hab. inż. Waldemar Smolik
15	Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny	Prof. dr hab. inż. Andrzej Michalski
16	Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, Instytut Systemów Elektronicznych, Zespół Mikrosystemów i Czujników Pomiarowych	Dr hab. Jerzy Weremczuk

Tab. 1. Akademickie ośrodki metrologiczne, które odpowiedziały na ankietę (w kolejności alfabetycznej)

Lp.	Nazwa ośrodka	Autor odpowiedzi
17	Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów, Katedry Nanometrologii	Prof. dr hab. inż. Teodor Gotszalk
18	Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki Okrętowej	Prof. dr hab. inż. Janusz Mindykowski
19	Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroniki Morskiej	Prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki
20	Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki, Zakład Metrologii i Elektroniki	Dr hab. inż. Sergiusz Sienkowski
21	Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Zespół Pomiarów Parametrów Pola Elektromagnetycznego	Dr. hab. inż. Marek Kuchta
22	Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Zespół Precyzyjnej Metrologii Czasu	Prof. dr hab. inż. Ryszard Szplet

W ankiecie zostało zawartych sześć zagadnień:

- tematyka badań prowadzonych w obszarze metrologii:
 - krótki opis najważniejszych, obecnie realizowanych tematów i stopnia ich zaawansowania,
 - cele badawcze,
 - najważniejsze osiągnięcia,
- liczność zespołu naukowego prowadzącego badania w obszarze metrologii w jednostce (z podziałem na profesorów, doktorów hab., doktorów, magistrów, personel techniczny),
- unikalna aparatura metrologiczna pozostająca w dyspozycji zespołu (wzorce, kalibratory, precyzyjne przyrządy pomiarowe, ciągi technologiczne do wytwarzania np. czujników *System-on-Chip* (SoC), czujników inteligentnych, akredytowane laboratoria itp.),
- liczba doktoratów realizowanych w obszarze metrologii, w tym doktoratów wdrożeniowych (liczba doktoratów ogółem, liczba doktoratów wdrożeniowych),
- plany/perspektywa naukowa badań w obszarze metrologii (planowane tematy badawcze, współpraca międzynarodowa, źródła finansowania), przeszkody w rozwoju,
- opinia na temat kierunków i perspektyw rozwoju metrologii.

Pytanie nr 5 zawierało dwie istotne części. Część pierwsza dotyczyła planów badawczych jednostki w obszarze metrologii. Część druga miała natomiast na celu pozyskanie informacji dotyczącej opinii

środowiska metrologów na temat najważniejszych utrudnień i przeszkód hamujących rozwój metrologii w Polsce.

Pytanie 6 nie dotyczyło bezpośrednio bieżącego stanu polskiej metrologii. Zostało ono dołączone do ankiety z zamiarem pozyskania informacji niezbędnej do opracowania drugiej części niniejszej pracy, a dotyczącej właśnie perspektyw rozwoju metrologii oraz korelacji planów rozwoju w krajowych ośrodkach metrologicznych z ogólnosiwiatowymi kierunkami, wskazywanymi w międzynarodowych dokumentach dotyczących tego tematu.

Pełne wyniki przeprowadzonej ankiety zajmują ponad 70 stron, dlatego ich zamieszczenie w niniejszym opracowaniu nie było niestety możliwe. Podczas prac redakcyjnych autor niniejszego opracowania wprowadził do nadesłanych odpowiedzi tylko niewielkie zmiany. Zamieszczenie pełnego tekstu otrzymanych odpowiedzi byłoby uzasadnione dwoma względami. Po pierwsze wymaga tego poszanowanie dla praw autorskich należnych autorom poszczególnych odpowiedzi. Po drugie materiał zgromadzony w wyniku przeprowadzonej ankiety jest na tyle cenny, że jego udostępnienie szerszemu gronu odbiorców byłoby jak najbardziej celowe. W niniejszym opracowaniu przedstawiono natomiast zbiorcze omówienie poszczególnych zagadnień, sformułowanych w pytaniach ankietowych.

2.1.2. Tematyka prac badawczych prowadzonych w obszarze metrologii w krajowych ośrodkach metrologicznych

Tematyka badań w zakresie metrologii elektrycznej, prowadzonych w poszczególnych ośrodkach, jest bardzo zróżnicowana. Można je zakwalifikować do kilku głównych obszarów. Są to:

1. badania o charakterze podstawowym, ukierunkowane na poszukiwanie metod pomiarowych i nowych narzędzi pomiarowych przeznaczonych do pomiaru wybranych wielkości,
2. prace badawcze i rozwojowe, mające na celu rozwiązanie ściśle zdefiniowanego problemu i ukierunkowane na bezpośrednią aplikację wyników badań, przy czym w tym obszarze mieszczą się takie zagadnienia jak np.: poszukiwanie wydajnych algorytmów przetwarzania danych pomiarowych, modelowanie obiektów i zjawisk będących przedmiotem pomiaru, budowa bezprzewodowych

- sieci czujników i ich optymalizacja, w tym również optymalizacja energetyczna,
3. prace badawcze i rozwojowe w obszarze elektroenergetyki, ze szczególnym uwzględnieniem rozwoju odnawialnych źródeł energii oraz energetyki rozproszonej,
 4. prace badawcze i rozwojowe w zakresie nowych rozwiązań czujników pomiarowych,
 5. prace badawcze i rozwojowe w zakresie pomiaru wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi.

Prace badawcze o charakterze podstawowym

Prace badawcze o charakterze podstawowym obejmują:

- akcelerację obliczeń i badanie możliwości sprzętowej implementacji sieci neuronowych,
- pomiary parametrów sygnałów sinusoidalnych, w tym niestacjonarnych,
- projektowanie i badanie algorytmów kompresji obrazów, ich efektywnych architektur obliczeniowych oraz implementację w specjalizowanych układach scalonych (ASIC),
- zastosowanie programu LabVIEW do akwizycji danych w systemach pomiarowych i z wykorzystaniem odpowiednich kart pomiarowych,
- wykorzystanie technologii *Data Socket* w komunikacji systemów pomiarowych,
- zastosowanie protokołu TCP/IP do komunikacji w rozproszonych systemach pomiarowych,
- opracowanie systemu pomiarowego do „sztywnej” i „adaptacyjnej” korekcji charakterystyk dynamicznych przetworników pomiarowych,
- opracowanie systemu do wyznaczania składowych LC impedancji z wykorzystaniem metody dynamicznej,
- opracowanie skomputeryzowanego rozproszonego systemu do pomiarów termowizyjnych,
- rozwój zaawansowanych metod cyfrowego przetwarzania sygnałów w metrologii, a w szczególności zastosowanie techniki oszczędnego próbkowania (ang. *compressive sensing* – CS) w pomiarach,

- wykorzystanie sygnałów pomiarowych z częstotliwościowym nośnikiem informacji,
- rozwój metod diagnostyki maszyn elektrycznych, głównie przy pomocy pomiaru i analizy prądu zasilającego maszynę,
- analizę błędów i niepewności pomiarowej w zakresie wzorcowania czujników pomiarowych oraz metody akwizycji sygnałów pomiarowych,
- opracowanie algorytmów i układów do odtwarzania wartości chwilowych wielkości wejściowych w torze pomiarowym z sygnałem częstotliwościowym,
- badania parametrów metrologicznych toru pomiarowego z częstotliwościowym nośnikiem informacji,
- opracowanie metody badania statycznych i dynamicznych właściwości metrologicznych sensorów gazów i sensorów wilgotności gazów,
- opracowanie metod poprawy dokładności i powtarzalności wyników pomiarów przyrządów pomiarowych z jonizacją gazu wiązką termoelektronową,
- opracowanie metod pomiaru i przetwarzania sygnałów stochastycznych ze szczególnym uwzględnieniem zastosowań w diagnostyce technicznej,
- rozwój teorii pomiaru oraz badań diagnostycznych i wzorcowania,
- rozwój metod pomiaru i przetwarzanie sygnałów w diagnostyce medycznej,
- badania dotyczące zastosowania metod statystycznych i sztucznej inteligencji w pomiarach parametrów przepływów dwufazowych, w pomiarach czasu opóźnienia i kąta przesunięcia fazowego oraz w analizie sygnałów biomedycznych, w szczególności dla sygnałów EKG, EMG, PPG, sygnału mowy i sygnału wibracji w ocenie drżenia kończyny górnej,
- badania dotyczące opracowania metodyki oceny wybranych przepływomierzy zwężkowych w pomiarach przepływów dwufazowych ciecz-gaz,
- prace badawcze i konstrukcyjne dotyczące pomiarów wielkości elektrycznych z najwyższymi dokładnościami, związane z budową i modelowaniem wzorców wielkości elektrycznych, opracowywaniem nowych metod i algorytmów pomiarowych, jak również

projektowaniem i budową nowoczesnej, wysokiej klasy aparatury kontrolno-pomiarowej,

- rozwój metod projektowania i programowania autonomicznych oraz skomputeryzowanych systemów pomiarowych,
- prace związane z szeroko rozumianą automatyzacją procesów pomiarowych oraz innych urządzeń elektrycznych, w tym także z implementacją układową i programowaniem sterowników przemysłowych,
- prace badawcze w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej, tj. badania oraz budowa aparatury pomiarowej do zastosowań w pomiarach i analizie pól elektromagnetycznych o małych i dużych częstotliwościach,
- opracowywanie nowoczesnych aplikacji elektronicznych do zastosowań w układach pomiarowych, implementację analogowych i cyfrowych podzespołów programowalnych, badania metod analizy, syntezy i modelowania nowoczesnych analogowych i cyfrowych układów elektronicznych,
- badania w zakresie elektrycznej tomografii pojemnościowej, pozwalającej na obrazowanie przestrzennego rozkładu przenikalności elektrycznej wewnątrz sondy tomograficznej,
- badania nad metodami pomiaru małych pojemności, wykorzystującymi wymuszenie impulsowe (metoda *single-shot high-voltage* – SSHV), charakteryzującymi się dużą szybkością pomiaru oraz wysokim stosunkiem sygnał-szum (SNR),
- prace badawcze nad wykorzystaniem technologii *energy harvesting* (EH) w zasilaniu bezprzewodowych sieci sensorów stosowanych w monitoringu środowiska,
- badania nad technologią oraz konstrukcją systemów pomiarowych wykorzystujących sieci czujnikowe,
- badania eksperymentalne i konstrukcyjne nad systemami pomiarowymi dedykowanymi laboratoriom lotniczym,
- badania nad rozproszonymi systemami pomiarowo-diagnostycznymi dla szpitali i przychodni, pozwalającymi na szybką ocenę wybranych parametrów fizjologicznych człowieka (zautomatyzowane laboratoria badawcze wykonywane w postaci jednorazowych systemów testujących),
- opracowanie metod i narzędzi badawczych do szybkiej oceny stanu lodowiska (jakości lodu) w czasie zawodów curlingowych,

- rozwój zagadnień technologicznych, w tym pomiarowych, dla mikrosystemów i czujników wytwarzanych z wykorzystaniem technologii *ink-jet*,
- opracowanie metod analizy danych pomiarowych z wykorzystaniem technologii chmurowych dla aplikacji w inteligentnych budynkach, węzłach sieci IoT, w medycynie,
- badania związane z obserwacją i opisem ilościowym oraz jakościowym zjawisk występujących w przyrządowych i materiałowych mikro- i nanostrukturach,
- opracowanie nowych metod i technik, w celu rejestracji zjawisk kwantowych „w polu widzenia” co najmniej pojedynczych nanometrów, z wykorzystaniem technologii mikro- i nanoskopowych, rozwiązań bazujących na układach mikro- oraz nanoelektromechanicznych (MEMS/NEMS),
- integrację precyzyjnych technologii pomiarowych, takich jak: spektroskopia impedancyjna, charakteryzacja stałoprądowa przyrządów w zakresie prądów i napięć od 1 pA i 10 mV, wykorzystujących skaningową mikroskopię elektronową, mikroskopię wiązki jonowej, nanoskopię bliskich oddziaływań, w tym mikroskopię sił atomowych, mikroskopię tunelową i skaningową mikroskopię termiczną,
- badania i ocenę jakości transmisji informacji analogowej i cyfrowej w okrętowych systemach pomiarowo-kontrolnych,
- modelowanie właściwości elementów i układów mocy przy uwzględnieniu zjawisk cieplnych i zastosowaniu modeli skupionych oraz eksperymentalną estymację parametrów opracowanych modeli, których celem jest stworzenie narzędzia do dokładnej i szybkiej analizy właściwości układów impulsowego przekształcania energii i do oceny pracy wszystkich komponentów tych układów,
- prace badawcze związane z opracowywaniem metodyk projektowania i analizy systemów pomiarowo-sterujących, konstruowaniem i badaniami bezprzewodowych sieci sensorowych oraz inteligentnych systemów pomiarowo-sterujących,
- badania w zakresie technologii Internetu rzeczy oraz hurtowni danych dla potrzeb systemów monitorowania, sterowania i diagnozowania obiektów i procesów przemysłowych.

Prace badawcze i rozwojowe, mające na celu rozwiązanie ściśle zdefiniowanego problemu i ukierunkowane na bezpośrednią aplikację wyników badań

Prace badawcze i rozwojowe, mające na celu rozwiązanie ściśle zdefiniowanego problemu i ukierunkowane na bezpośrednią aplikację wyników badań, obejmują następujące zagadnienia:

- dynamiczne ważenie pojazdów samochodowych (systemy *weigh-in-motion*, WIM), pomiary parametrów ruchu drogowego, klasyfikację pojazdów,
- pomiary drgań w diagnostyce maszyn w celu wykrywania i przewidywania awarii,
- pomiary parametrów obciążenia sieci energetycznej z wykorzystaniem czujników pojemnościowych,
- opracowanie, wykonanie i wdrożenie systemów pomiarowo-diagnostycznych do badania parametrów elektrycznych magnesów nadprzewodnikowych SIS-100, stosowanych w akceleratorze kołowym, a także badania nad metodami diagnostyki uzwojeń elektrycznych tych elektromagnesów,
- badania analityczne, symulacyjne i eksperymentalne przepływowierzy w zastosowaniach do pomiaru przepływów dwufazowych, w tym różnego rodzaju kryz pomiarowych,
- opracowanie szerokopasmowego, kalorymetrycznego wzorca wartości skutecznej napięcia przemiennego o liczałnej różnicy transferowej, której niepewność jest porównywalna z niepewnością najlepszych wzorców tej wielkości na świecie (jest to unikatowy wzorzec pierwotny w skali Polski i jeden z nielicznych na świecie),
- opracowanie metody analizy spektroskopii sygnału magnetyzacji z wykorzystaniem wzmacniacza homodynowego *lock-in* w zastosowaniu do pomiarów zespolonej podatności magnetycznej nanocząstek superparamagnetycznych, pomiary w szerokim zakresie częstotliwości zmiennego pola magnetycznego od 2 kHz do 400 kHz,
- badania i opracowanie metod pomiarowych i realizujących je układów pomiarowych dedykowanych do pomiaru parametrów skupionych modeli termicznych dyskretnych, półprzewodnikowych przyrządów mocy, komponentów półprzewodnikowych źródeł światła oraz elementów magnetycznych, przy czym mierzonymi parametrami są własna i wzajemna przejściowa impedancja termiczna

oraz rezystancja termiczna, charakteryzujące efektywność odprowadzania ciepła z tranzystorów MOSFET, IGBT, diod LED mocy, modułów mocy, modułów LED, dławików i transformatorów,

- pomiary wielkości elektrycznych i konstrukcja aparatury pomiarowej, a w szczególności opracowywanie metod i układów odtwarzania zespolonego stosunku napięć sinusoidalnych z zastosowaniem cyfrowych źródeł napięć sinusoidalnych, pomiar zespolonego stosunku napięć metodami cyfrowymi oraz opracowanie metod wzorcowania układów do cyfrowego pomiaru i odtwarzania zespolonego stosunku napięć,
- prace w zakresie doskonalenia utrzymania Polskiej Skali Czasu UTC (PL) w stosunku do uniwersalnej skali czasu UTC wyznaczonej przez Międzynarodowe Biuro Miar (BIPM), z zastosowaniem sieci neuronowych oraz opracowywanych, nowatorskich metod prognozowania, bazujących na wynikach pomiaru chodu zegara atomowego – aktualnie masera wodorowego,
- prace badawcze i konstrukcyjne dotyczące metod i urządzeń do pomiaru, generacji oraz dystrybucji sygnałów czasu i częstotliwości, w tym budowa precyzyjnych liczników czasu z użyciem relatywnie taniej technologii mikroelektronicznej, a mianowicie układów programowalnych oraz opracowanie pierwszego na świecie przetwornika czasowo-cyfrowego, zaimplementowanego w programowalnej matrycy bramkowej FPGA,
- skonstruowanie, wykonanie i przebadanie w warunkach laboratoryjnych oraz poligonowych prototypu miernika PM-HPM1 (nazwa własna – polowy miernik sygnałów HPM, wersja 1.) mierzącego natężenia impulsowych pól elektromagnetycznych do 500 kV/m, w zakresie częstotliwości 10 MHz–12 GHz,
- pomiar pola i konstrukcja przenośnego miernika impulsowych pól elektromagnetycznych mierzącego parametry amplitudowe, czasowe i częstotliwościowe impulsów.

Prace badawcze i rozwojowe w obszarze elektroenergetyki, ze szczególnym uwzględnieniem rozwoju odnawialnych źródeł energii oraz energetyki rozproszonej

Prace badawcze i rozwojowe w obszarze elektroenergetyki, ze szczególnym uwzględnieniem rozwoju odnawialnych źródeł energii oraz energetyki rozproszonej obejmują:

- pomiary wysokonapięciowe w elektroenergetyce, w tym pomiary eksploatacyjne oraz badania diagnostyczne, służące podwyższeniu niezawodności pracy urządzeń elektrycznych pracujących przy wysokim i średnim napięciu, w systemach przesyłu i rozdziału energii elektrycznej oraz dla zwiększania udziału odnawialnych źródeł energii,
- pomiary wytrzymałości elektrycznej dielektryków, przeprowadzane przy różnych rodzajach napięć (napięcia przemienne, stałe i udarowe, z uwzględnieniem narażeń zespolonych, elektrycznych i termicznych), pomiary konduktywności elektrycznej i strat dielektrycznych,
- opracowanie nowych materiałów, zaawansowanych technik pomiarowych oraz metod diagnostycznych, dotyczących pomiarów wyładowań niezupełnych, ładunku przestrzennego, spektroskopii dielektrycznej,
- prace badawcze w zakresie wysokonapięciowej inżynierii materiałowej, badania mechanizmów fizykalnych zjawisk w strukturach wysokonapięciowych dielektryków, pomiary dla potrzeb diagnostyki wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych,
- pomiary wyładowań niezupełnych (wnz), rozwój metod detekcji, rejestracji, monitoringu, analiz i interpretacji takich zjawisk w ramach diagnostyki wysokonapięciowych układów izolacyjnych,
- rozwój nowatorskiej fazowo-rozdzielczej metody akwizycji impulsów wyładowań niezupełnych w czasie rzeczywistym PRPDA,
- pomiary i analizę wnz przy wymuszeniach niesinusoidalnych, takich jak: napięcia o modulowanej szerokości impulsów PWM (ang. *pulse width modulation*), udary napięciowe, a także przy napięciu stałym DC,
- badania i pomiary obecności i rozkładu ładunku przestrzennego oraz procesów jego migracji (pomiary te obecnie wykonuje się głównie za pomocą metody PEA – ang. *pulsed electro-acoustic*),

- pomiary parametrów jakości energii elektrycznej,
- pomiary fazorów i parametrów diagnostycznych w sieciach dystrybucyjnych,
- badania nad pasywno-antyrefleksyjnymi warstwami podwójnymi $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ dla ogniw fotowoltaicznych o podwyższonej sprawności,
- opracowanie optymalnych algorytmów sterowania MPPT dla mikroturbin wiatrowych *off grid*,
- ocenę metrologiczną inteligentnych (*smart*) liczników energii elektrycznej AMI, weryfikację działania liczników, w tym w zakresie jakości energii elektrycznej dla stanów występujących w rzeczywistej sieci elektroenergetycznej,
- opracowywanie nowych, precyzyjnych metod pomiaru częstotliwości napięcia w sieciach elektroenergetycznych,
- opracowywanie modeli odnawialnych źródeł energii, w tym nowatorskich algorytmów elastycznego modelu zarządzania energią (EMZE), zorientowanych na zarządzanie energią w sieciach *Smart Grid* i zrównoważenie popytu i podaży na moc w tych sieciach,
- opracowywanie metod i technik pozyskiwania wiedzy z danych pomiarowych na potrzeby *Smart Grid* i *Smart City*,
- badania eksperymentalne i analizę charakterystyk energii elektrycznej w wybranych systemach energetyki morskiej i lądowej,
- rozproszone systemy pomiarowo-diagnostyczne w okrętowych systemach elektroenergetycznych,
- ocenę jakości energii elektrycznej w inteligentnych sieciach okrętowych z uwzględnieniem definicji, procedur, cyfrowych metod przetwarzania sygnałów i urządzeń pomiarowych właściwych dla rozpatrywanych zagadnień,
- ocenę wpływu jakości napięcia zasilania na właściwości eksploatacyjne i pracę silników elektrycznych stosowanych w systemach okrętowych i lądowych,
- badania nad modelami probabilistycznymi oraz metodami śledzenia rzeczywistej topologii sieci nN w inteligentnych, lądowych sieciach elektroenergetycznych,
- badania właściwości liczników energii elektrycznej stosowanych w *Smart Grids* w kontekście zakłóceń sygnałów transmitowanych w sieciach elektroenergetycznych,

- badania nad poprawą efektywności eksploatacji systemów fotowoltaicznych, szerzej – systemów z wykorzystaniem OZE,
- pomiary energii i mocy w układach elektroenergetycznych, w tym zagadnienia definicyjne i formalnoprawne,
- badanie miar jakości energii elektrycznej: ocena możliwości diagnostycznych, rozwój ukierunkowany na zwiększenie możliwości diagnostycznych, efektywność diagnostyki jakości napięcia w sieci elektroenergetycznej na podstawie aktualnych miar normatywnych,
- ocenę metrologiczną pomiarów miar jakości energii elektrycznej przez analizatory jakości energii elektrycznej: badanie działania analizatorów jakości energii elektrycznej dla stanów występujących w rzeczywistej sieci elektroenergetycznej.

Prace badawcze i rozwojowe w zakresie nowych rozwiązań czujników pomiarowych

Prace badawcze i rozwojowe w zakresie nowych rozwiązań czujników pomiarowych obejmują:

- badania naukowe w obszarze współczesnej sensoryki, w tym systemów czujników chemicznych do detekcji substancji stanowiących zagrożenie dla środowiska oraz tych, które określa się terminem markerów chorobotwórczych,
- badania nad matrycą nanosensorów jako nowym narzędziem w badaniach oddziaływań gaz-ciało stałe: problem selektywności,
- badania nad półprzewodnikowymi nano-heterostrukturami n-n i n-p w systemach rezystancyjnych sensorów gazu wspomaganych optycznie,
- badania nad reaktorami fotoelektrochemicznymi, wspomagany procesem *up-conversion*,
- badania nad cienkowarstwowymi hetero strukturami półprzewodnikowymi typu p-p, n-p i p-n na bazie CuO_x dla fotochemii,
- badania nad wpływem techniki GLAD na własności sensorów do detekcji biomarkerów cukrzycy obecnych w wydychanym powietrzu,
- prace badawcze nad metodami detekcji wydychanego acetonu w codziennym monitorowaniu cukrzycy,

- badania nad możliwością realizacji bioczuJNIKÓW do detekcji biomarkerów cukrzycy i NAFLD otrzymywanych w technologii TWD/GLAD,
- badania szumów i detekcyjności sensorów spintronicznych, poboru mocy i energii, algorytmów przetwarzania sygnałów sensorowych oraz systemów sensorycznych do oceny motoryki i postawy ciała,
- badania nad czujnikowymi zastosowaniami światłowodów, które obejmują grupy czujników amplitudowych, fazowych oraz opartych na siatkach Bragga, przy czym zakres mierzonych wielkości fizycznych obejmuje pomiar naprężenia, wydłużenia liniowego, nacisku bocznego, zgięcia, ciśnienia hydrostatycznego, temperatury oraz współczynnika załamania,
- rozwój precyzyjnych pomiarów rozkładu naprężenia z użyciem światłowodowych siatek Bragga (pomiaru te wykorzystują nową metodę pomiarową opracowaną w Zakładzie Optoelektroniki i Sieci Teleinformatycznych Politechniki Lubelskiej),
- badania w zakresie sensorów chemicznych wykorzystujących technikę światłowodową, przy czym zakres prowadzonych badań obejmuje pomiary pH oraz stężenia gazów, m.in. tlenku węgla,
- prace badawcze nad wykorzystaniem przetworników optoelektronicznych do pomiaru pól EM, szczególnie dużej mocy.

Prace badawcze i rozwojowe w zakresie pomiaru wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi

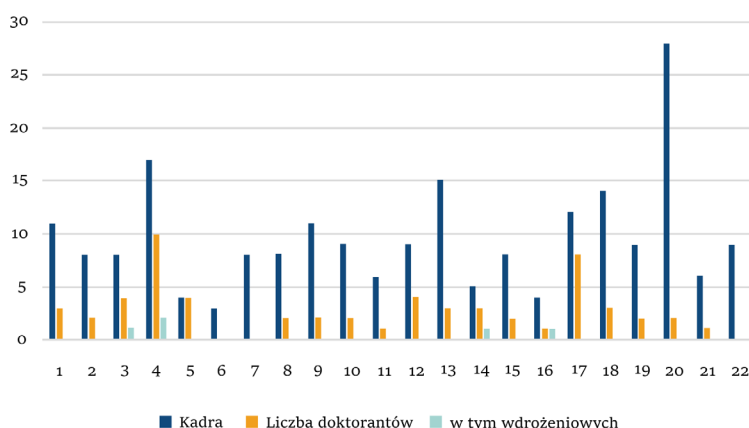
Prace badawcze i rozwojowe w zakresie pomiaru wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi obejmują:

- zastosowanie dedykowanych złożonych źródeł zbudowanych w technologii LED w metrologii techniki świetlnej i inżynierii biomedycznej, jako zamienniki tradycyjnych wzorców fotometrycznych oraz jako inteligentne źródła w układach oświetlaczy do zastosowań medycznych oraz ocenę metrologiczną ich przydatności w powyższych zastosowaniach,
- metrologię techniki świetlnej na potrzeby oświetlenia zintegrowanego, w tym opracowanie nowych metod oceny, kryteriów oraz koncepcje konstrukcji nowych urządzeń pomiarowych,

- kształtowanie rozkładów widmowych źródeł światła typu LED do zastosowań jako wzorce w kolorymetrii i jako źródła kalibracyjne w fotometrii,
- prace badawcze w zakresie metrologii promieniowania czynnego cyrkadiennie,
- badania nad termowizyjnymi pomiarami temperatury: niepewność pomiaru temperatury, badanie czynników wpływających na wynik pomiaru, opracowanie metodyki pomiaru temperatury elementów półprzewodnikowych w powiązaniu z symulacją propagacji ciepła,
- opracowanie metod badań nieniszczących do wykrywania defektów w skórkach naturalnych lub podobnych materiałach o strukturze włóknistej, opartych na termografii komputerowej,
- pomiary temperatury obiektów o niskiej emisyjności (tzw. efekt „lustrzany” – zjawisko odbicia promieniowania),
- badanie wpływu dokładności wprowadzenia do mikrokontrolera kamery parametrów obiektu (emisyjność, odległość kamera-obiekt), otoczenia i atmosfery (temperatury otoczenia, atmosfery, jej wilgotność) na dokładność wyznaczenia temperatury obiektu,
- badania nad nieoznaczonością modelu pomiarowego kamery termowizyjnej w sytuacji, gdy są sobie równe wartości temperatury mierzonego obiektu, otoczenia i atmosfery,
- badanie zjawiska konwekcji z wykorzystaniem metod termowizyjnych,
- pomiary termowizyjne różnych typów i kształtów radiatorów chłodzących elementy i układy elektroniczne, w zakresie odprowadzania ciepła,
- pomiary parametrów wilgotnościowych i elektrycznych materiałów budowlanych,
- badania dotyczące pomiarów wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi, a także pomiarów właściwości materiałów elektrotechnicznych, takich jak: dielektryki, magnetyki i przewodniki,
- badania nad infrastrukturą metrologiczną w obszarze akustyki podwodnej,
- projektowanie inteligentnych przetworników temperatury bazujących na opatentowanej metodzie procedury autokalibracji dla przetworników wielkości nieelektrycznych.

2.1.3. Informacja dotycząca liczności zespołów badawczych oraz liczby doktorantów, w tym wdrożeniowych zaangażowanych w prowadzenie badań w obszarze metrologii elektrycznej

Ośrodki badawcze, które odpowiedziały na ankietę, różnią się w znacznym stopniu liczbą pracowników naukowo-badawczych zaangażowanych w prace badawcze, jak również liczbą doktorantów powiązanych z danym zespołem badawczym. To zróżnicowanie zależy przede wszystkim od poziomu zajmowanego przez dany podmiot w strukturze organizacyjnej uczelni. Prezentowane dane dotyczą zarówno dużych jednostek typu katedra, jak też znacznie mniej licznych zespołów badawczych występujących w strukturze katedry lub instytutu. Informację ilościową dotyczącą kadry naukowo-badawczej, pozyskaną w wyniku przeprowadzonego badania ankietowego, przedstawiono w postaci graficznej na rycinie 1.



Ryc. 1. Liczność kadry oraz doktorantów zaangażowanych w badania w obszarze metrologii elektrycznej – numer na wykresie odpowiada uczelni wymienionej w tabeli 1

Łączna liczba pracowników zaangażowanych w badania w 22 ośrodkach metrologicznych, wymienionych w tabeli 1, wynosi 212, co oznacza średnio ponad 9 pracowników w jednym zespole. Na uwagę zasługuje znacząca liczba doktorantów realizujących swoje badania w obszarze metrologii. Łącznie w 22 ośrodkach jest to 59 doktorantów, ale w tej liczbie jest tylko 5 doktoratów realizowanych w ramach

programu „Doktorat wdrożeniowy”. Trudno wyłącznie na tej podstawie sformułować wnioski o jakimś bardziej ogólnym charakterze. Jednak biorąc pod uwagę założenia programu „Doktorat wdrożeniowy”, mała liczba doktoratów realizowanych w tym programie może wskazywać na niewielkie zainteresowanie ze strony podmiotów gospodarczych rozwojem własnej kadry naukowej.

2.1.4. Najważniejsze osiągnięcia będące wynikiem badań prowadzonych w zakresie metrologii elektrycznej

W tym rozdziale przedstawiono główne osiągnięcia naukowe w obszarze metrologii spośród zgłoszonych przez poszczególne ośrodki. Wybrane osiągnięcia zaprezentowano w analogicznym podziale tematycznym, jaki przyjęto przy omawianiu obszarów badań naukowych, wyróżniając pięć kategorii:

1. badania o charakterze podstawowym, ukierunkowane na poszukiwanie metod pomiarowych i nowych narzędzi pomiarowych przeznaczonych do pomiaru wybranych wielkości,
2. prace badawcze i rozwojowe, mające na celu rozwiązanie ściśle zdefiniowanego problemu, ukierunkowane na bezpośrednią aplikację wyników badań,
3. prace badawcze i rozwojowe w obszarze elektroenergetyki, ze szczególnym uwzględnieniem rozwoju odnawialnych źródeł energii oraz energetyki rozproszonej,
4. prace badawcze i rozwojowe w zakresie nowych rozwiązań czujników pomiarowych,
5. prace badawcze i rozwojowe w zakresie pomiaru wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi.

Badania o charakterze podstawowym, ukierunkowane na poszukiwanie metod pomiarowych i nowych narzędzi pomiarowych przeznaczonych do pomiaru wybranych wielkości obejmują:

- opracowanie metod interpolowanego DFT, opracowanie stabilnego algorytmu SDFT, opracowanie algorytmów przetwarzania sygnałów dla urządzeń PMU, opracowanie metody Prony’ego o zwiększonej odporności na szum, opracowanie okien czasowych o płaskiej charakterystyce widmowej,
- opracowanie oryginalnej metody „napięcia przerywanego” CPD (ang. *chopped partial discharges*), rozpoznanie efektu migracji

atomów metali w silnym polu elektrycznym, zbliżonego do mechanizmu drzewienia elektrycznego oraz opracowanie metody oceny zmian powierzchniowej struktury dielektryka na podstawie punktowych pomiarów rezystywności powierzchniowej, umożliwiającej utworzenie „mapy erozji powierzchni”,

- opracowanie ultraszybkiego (nanosekundowego) obrazowania (ang. *discharge imaging*) propagacji strimerów elektrycznych w układach modelowych z uwzględnieniem oddziaływania ładunków przestrzennych,
- prowadzenie unikalnych pomiarów koncentracji ładunku powierzchniowego w mikroinkluzjach gazowych, powstałych wskutek występowania WNZ,
- opracowanie nowych metod i technik, umożliwiających prowadzenie na poziomie pojedynczych nanostruktur badań systemów do pozyskiwania energii, takich jak: maty włókien piezoelektrycznych, matryc emiterów polowych czy mikroreaktorów elektrochemicznych.

Prace badawcze i rozwojowe, mające na celu rozwiązanie ściśle zdefiniowanego problemu, ukierunkowane na bezpośrednią aplikację wyników badań

Prace badawcze i rozwojowe, mające na celu rozwiązanie ściśle zdefiniowanego problemu, ukierunkowane na bezpośrednią aplikację wyników badań obejmują:

- zbudowanie drogowego stanowiska WIM (ang. *weigh-in-motion*) wyposażonego w osiem linii czujników nacisku, czujniki do pomiaru wielu parametrów środowiskowych, kamery pogładowe oraz umożliwiające odczyt tablicy rejestracyjnej (w bezpośrednim sąsiedztwie została wybudowana waga wolnoprzejazdowa, posiadająca świadectwo legalizacji),
- zaprojektowanie, wybudowanie i badania wieloczujnikowego systemu WIM, wyposażonego w 16 linii czujników nacisku,
- konstrukcja modułów pomiarowo-kontrolnych systemu diagnostycznego do szybkiego oznaczania biomarkerów w płynach fizjologicznych,

- konstrukcja autonomicznych systemów pomiarowych przeznaczonych do pomiarów środowiskowych (monitoring wód wokół wiertni poszukiwawczych, monitoring kanalizacji miejskiej),
- konstrukcja systemów pomiarowych do pomiarów wybranych parametrów fizjologicznych w czasie treningu/szkolenia (np. detekcja momentu tonięcia na basenach),
- opracowanie w ramach projektów unikalnej aparatury pomiarowej w postaci precyzyjnego wielofazowego generatora przebiegów sinusoidalnych, przeznaczonego do stosowania w cyfrowych automatycznych mostkach impedancji o wysokiej dokładności, pozwalających na porównywanie wzorców impedancji z niepewnością pomiarową na poziomie 10^{-6} ,
- wdrożenie do sprzedaży wielofunkcyjnego systemu do precyzyjnej metrologii czasu, zawierającego wielokanałowy licznik czasu i częstotliwości MTC 108, generator odcinków czasu TIG 101 oraz dystrybutor sygnałów czasu i częstotliwości PDA 0816,
- opracowanie przetwornika czasowo-cyfrowego o rozdzielczości 0,4 ps oraz precyzji lepszej niż 4 ps w szerokim zakresie pomiarowym,
- opracowanie serii przetworników czasowo-cyfrowych o ograniczonym zużyciu zasobów logicznych układu programowalnego.

Prace badawcze i rozwojowe w obszarze elektroenergetyki, ze szczególnym uwzględnieniem rozwoju odnawialnych źródeł energii oraz energetyki rozproszonej

Prace badawcze i rozwojowe w obszarze elektroenergetyki, ze szczególnym uwzględnieniem rozwoju odnawialnych źródeł energii oraz energetyki rozproszonej obejmują:

- opracowanie autorskich kryteriów i nowych definicji wskaźników jakości energii elektrycznej w okrętowych systemach elektroenergetycznych, a także procedur pomiarowych oraz odnośnych algorytmów do ich implementacji,
- opracowanie uczącego się modelu probabilistycznego dla wybranej klasy sieci inteligentnych oraz zweryfikowanej doświadczalnie metody śledzenia zmian topologii sieci nN,
- opracowanie, skonstruowanie i implementacja w praktyce przemysłowej specjalizowanych analizatorów/estymatorów jakości

energii elektrycznej, dopuszczonych do stosowania na podstawie właściwych certyfikatów wydanych przez Polski Rejestr Statków.

Prace badawcze i rozwojowe w zakresie nowych rozwiązań czujników pomiarowych

Prace badawcze i rozwojowe w zakresie nowych rozwiązań czujników pomiarowych obejmują:

- zaprojektowanie i wytworzenie nowej struktury Bragga w światłowodzie, tzw. struktury pochyłonej skręconej, do zastosowań w charakterze czujników optycznych nieczułych na zmiany polaryzacji światła wejściowego,
- prace badawcze nad strukturą higrometru punktu rosy (przetwornika MEMS), który integruje w swojej obudowie zarówno czujniki (temperatury oraz detektor impedancyjny), a także aktuator w postaci grzejnika.

Prace badawcze i rozwojowe w zakresie pomiaru wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi

Prace badawcze i rozwojowe w zakresie pomiaru wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi obejmują:

- opracowanie sposobu i układu pomiaru stężenia kationów wodorowych H^+ do zastosowań w medycynie,
- opracowania koncepcji układu opto-mechanicznego wykorzystującego struktury Bragga do pomiaru temperatury oraz wydłużenia przewodu napowietrznej linii elektroenergetycznej,
- opracowanie głowic pomiarowych do pomiarów współczynnika załamania światła, naprężenia oraz temperatury,
- opracowanie metody pomiaru wartości współczynnika załamania medium, w sposób umożliwiający minimalizację wpływu zmian mocy źródła światła, wpływu temperatury oraz wpływu pola elektromagnetycznego (metoda opatentowana),
- opracowanie układu i metody równoczesnego pomiaru temperatury oraz siły działającej w dwóch osiach,
- opracowanie metody pomiaru zwisu linii energetycznych wykorzystującej nieczułe na pole elektromagnetyczne czujniki optyczne,

- opracowanie układu i metody pozwalającej na wykrywanie defektów w materiałach o znanym współczynniku Younga,
- opracowanie i weryfikacja doświadczalna oryginalnych metod pomiaru parametrów cieplnych wybranych przyrządów półprzewodnikowych mocy, elementów indukcyjnych i modułów LED oraz modułów mocy.

2.1.5. Unikalna aparatura będąca na wyposażeniu zespołów badawczych

Wykaz unikalnej aparatury pomiarowej, będącej na wyposażeniu ankietowanych ośrodków, został przedstawiony z podziałem na 9 kategorii wynikających z obszaru jej zastosowań:

- aparatura do pomiarów elektroenergetycznych oraz badania odnawialnych źródeł energii (OZE),
- stanowiska technologiczne,
- spektroskopia impedancyjna,
- analizatory parametrów fizykochemicznych,
- fotometria,
- termometria i pomiary termowizyjne,
- aparatura do pomiarów precyzyjnych,
- kompatybilność elektromagnetyczna,
- wyposażenie specyficzne.

Aparatura do pomiarów elektroenergetycznych oraz badania odnawialnych źródeł energii (OZE)

Aparatura do pomiarów elektroenergetycznych oraz badania odnawialnych źródeł energii (OZE) obejmuje:

- fazowo-rozdzielczy system pomiaru wyładowań niezupełnych, o poziomie szumów < 1 pC (klatka Faradaya z własnym uziemem głębokim 30 m),
- system do pomiaru ładunku przestrzennego PEA (ang. *pulsed electroacoustic*) do badań na próbkach milimetrowych i submilimetrowych, przy natężeniu pola elektrycznego do 50 kV/mm, z rozdzielczością przestrzenną kilkudziesięciu mikrometrów,

- system do szerokopasmowych pomiarów parametrów dielektrycznych próbek materiałowych (zespolona przenikalność elektryczna w zakresie od 10 mHz do 10 MHz),
- analizator jakości energii elektrycznej PQ BOX 300 – klasa A, pomiar supraharmonicznych do 150 kHz, kalibrator Fluke 5500A, generator mocy (Chroma 61502 w połączeniu z generatorem arbitralnym),
- stanowisko do badań charakterystyk statycznych termoemisyjnych przetworników energii cieplnej w elektryczną: komora wysokiej próżni, emiter elektronów, kolektor elektronów, precyzyjny manipulator jednoosiowy, kontroler temperatury elektrod, pompa rotacyjna, pompa turbomolekularna, próżniomierz jonizacyjny, jednostka PXI, karta kontrolno-pomiarowa, karta oscyloskopowa, wersja komercyjna oprogramowania LabVIEW,
- urządzenie do pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych ogniw słonecznych (I-V ang. *Curve Tracer for Solar Cells Qualification*), które umożliwia wykonywanie pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych krzemowych ogniw słonecznych o powierzchni od 25 cm² do 400 cm²,
- stanowisko do badań propagacji wahań napięcia,
- rzeczywisty symulator Elektrowni Okrętowej (rozdzielnica główna, rozdzielnica awaryjna, zestaw zespołów prądotwórczych 5 szt., zestaw obciążen, (100 kVA), (3,3 kV AC, 400 V AC, 230 V AC)).

Stanowiska technologiczne

Wśród stanowisk technologicznych można wymienić:

- technologiczno-pomiarowe stanowisko do wytwarzania i badań *in situ* nanostruktur sensorowych,
- układ do nanoszenia warstw metodą Langmuir-Blodgett, KSV NIMA, Biolin-Scientific,
- układy pomiarowe do badań odpowiedzi sensorowych w warunkach stacjonarnych i pod wpływem oświetlenia, przy modulacji temperatury i zmiennej koncentracji gazu oraz do pomiarów rezystancji i pracy wyjścia przy użyciu sondy Kelvina,
- system do trawienia i nanoszenia warstw, umożliwia nanoszenie (rozpylanie jonowe – *sputtering*) i trawienie jonowe warstw metalicznych i dielektrycznych do 2 μm,

- układ zapisu siatek Bragga metodą maski fazowej z laserem ekscymerowym,
- stanowisko do wytwarzania i charakteryzacji struktur periodycznych na włóknach standardowych, mikrostrukturalnych oraz polimerowych,
- stanowisko do wodorowania włókien światłowodowych,
- stanowisko do zapisu struktur periodycznych na światłowodach niestandardowych,
- laboratorium *clean room* przeznaczone do technologii druku strumieniowego (drukarka Dimatix, mikroskop Hirox, generator plazmy Diener, *spin coater*, suszarka IR i UV),
- stanowisko wraz z oprogramowaniem do modelowania działania i projektowania czujników i mikrosystemów (trzy skaningowe mikroskopy elektronowe, mikroskop elektronowy sprzężony z kolumną jonową, zestaw 4 nanomanipulatorów – rozdzielczość przesuwu 10 nm, zakres przesuwu ok. 2 mm,
- pełne wyposażenie dla techniki światłowodowej umożliwiające konstrukcję zaawansowanych układów optycznych Coventor, COMSOL.

Spektroskopia impedancyjna

Spektroskopia impedancyjna obejmuje:

- stanowisko pomiarowe do badań metodą spektroskopii impedancyjnej, analizator impedancji Modulab XM-MTS, Solartron Analytical – układ pozwala na pomiary zarówno materiałów litych, jak i cienkich warstw,
- elektryczny tomograf pojemnościowy EVT4 wraz z oprogramowaniem do symulacji i rekonstrukcji w elektrycznej tomografii pojemnościowej, przy czym system do akwizycji danych oparty jest na szybkich, programowalnych układach FPGA, a architektura tomografu jest modułowa i umożliwia łatwą wymianę wszystkich elementów, łącznie z płytami analogowymi realizującymi pomiar (zastosowana w tomografii metoda pomiaru pojemności *single-shot high-voltage* pozwala na uzyskiwanie od 300 (32 elektrody) do 1200 (8 elektrod) obrazów na sekundę, w zależności od liczby elektrod pomiarowych).

Analizatory parametrów fizykochemicznych

Do analizatorów parametrów fizykochemicznych zaliczono:

- matrycę 16 sensorów do rozróżniania składników mieszanin gazowych i ciekłych, tzw. nos elektroniczny, Alpha MOS, Fox 4000,
- spektrofotometr optyczny do pomiarów spektralnej zależności współczynnika transmisji i odbicia, UV – VIS Lambda 19 Perkin Elmer, pozwalający wyznaczać spektralną zależność współczynnika absorpcji próbek proszkowych i cienkich warstw, co prowadzi do określenia przerwy energetycznej tych materiałów,
- spektrofotometr optyczny FTIR do pomiarów w paśmie (400–5000) nm^{-1} firmy Bruker Omega 5,
- spektrometr masowy HPR-20 Hiden Analytical,
- stanowisko pomiarowe do badania szumów w zakresie od 2 Hz do 10 MHz na poziomie podłoża krzemowego,
- stanowisko do badań jonizacji gazu wiązką termoelektronową w warunkach wysokiej i ultra wysokiej próżni: trójkolektorowy spektrometr mas ze skanowaniem elektrycznym, pompa rotacyjna, pompa jonowa, pompa getterowa, próżniomierz jonizacyjny, układ sterowania źródłem jonów, wysokonapięciowy zasilacz napięcia, łącznie światłowodowe z impulsową modulacją częstotliwości, detektory prądów jonowych, system akwizycji i analizy danych pomiarowych,
- mikroskopy bliskich oddziaływań do pomiaru topografii powierzchni, właściwości termicznych, elektrycznych (przewodność, lokalny rozkład pracy wyjścia, poziomu domieszkowania, temperatury i przewodności cieplnej w mikro- i nanoskali), mikroskopy tunelowe.

Fotometria

W fotometrii uwzględniono:

- laboratorium do fotometrii z wyposażeniem: kule całkujące, stanowiska goniometryczne, spektrometry z oprogramowaniem do obliczania parametrów światła stosowanych w miernictwie promieniowania optycznego,
- 16-kanałowy stałoprądowy zasilacz diod LED, rozdzielczość regulacji prądu 0,01 mA,

- stanowisko do badań spektralnych w zakresie telekomunikacyjnym – analizator widma optycznego,
- szerokopasmowe źródło światła Super Continuum,
- stanowisko do badania przełączników fotonicznych,
- stanowisko do badań spektralnych w rozszerzonym zakresie pomiarowym (podczerwieni),
- reflektometr Luna OBR4600.

Termometria i pomiary termowizyjne

Wśród aparatury do termometrii i pomiarów termowizyjnych należy wymienić:

- cztery długofalowe (ang. *long wave band* – LWB) kamery termowizyjne firmy FLIR z niechłodzonymi, matrycowymi detektorami mikrobolometrycznymi: ThermaCAM PM 595 (320×240) pikseli, FLIR T1020 (1024×768) pikseli, dwie kamery FLIR E5xt (120×90) pikseli,
- dedykowane oprogramowanie do przetwarzania termogramów jako plików pomiarowych: ThermaCAM Reporter, ThermaCAM Researcher, FLIR Tools+, FLIR Research IR, FLIR Thermal Studio oraz przyborek Software Development Kit,
- stanowisko do badań termowizyjnych pomiarów temperatury.

Aparatura do pomiarów precyzyjnych

Aparatura do pomiarów precyzyjnych obejmuje:

- laboratorium wzorcowania (kalibrator Fluke 5500A, multimetry Keithley 2002 i 2000, ogniwo wzorcowe Fluke 732B),
- najnowsze modele przenośnych układów przeznaczonych do kalibracji czujników drgań i ciśnienia,
- stanowisko do precyzyjnego pomiaru prądu zasilającego silnik indukcyjny wraz z osprzętem, które umożliwia regulację obciążenia silnika,
- stanowisko do wzorcowania częstotściomierzy/czasomierzy, wyposażone w atomowy, rubidowy wzorzec częstotliwości dyscyplinowany sygnałem z systemu GPS (sygnał z ok. 10 satelitów),
- komparator fazy i częstotliwości umożliwiający badanie stabilności źródeł sygnałów o częstotliwości w zakresie (3–919) MHz

- (zestawienie komparatora i wzorca rubidowego pozwala na badanie stabilności oscylatorów z dokładnością na poziomie 10^{-12}Hz/Hz),
- pierwotny wzorzec napięcia przemiennego o parametrach metrologicznych porównywalnych z parametrami wzorców pierwotnych państw wysokorozwiniętych (komparacje realizowane są w zakresie napięcia od 0,5 V do 1000 V oraz w paśmie częstotliwości 10 Hz–1 MHz),
 - wzorzec napięcia przemiennego o paśmie częstotliwości do 100 MHz, posiadający jedną z najniższych niepewności pomiarowych na świecie, przy czym obecnie trwają prace mające na celu poszerzenie pasma częstotliwości pracy wzorca do 1 GHz,
 - cyfrowy komparator impedancji, umożliwiający porównywanie impedancji wzorców rezystancji, pojemności i indukcyjności w paśmie od 10 Hz do 20 kHz z niepewnością pomiarową sięgającą 10^{-6} , wzorce impedancji, komparator wzorców indukcyjności własnej umożliwiający komparację wzorców o jednakowych wartościach nominalnych przy częstotliwości 1000 Hz i 1592 Hz z błędem nie przekraczającym $10\text{ }\mu\text{H/H}$,
 - wzmacniacz *lock-in* Stanford Research SR-865, który jest wykorzystywany do pomiarów kalibracyjnych, np. do wzorcowania wzorców pojemności: 0.1, 1, 10, 100 i 1000 fF oraz do pomiarów zespolonej podatności magnetycznej nanocząstek superparamagnetycznych,
 - kalibrator napięcia Kithley, kalibrator ciśnienia, stanowisko do wzorcowania czujników chemicznych ISFET, system do budowy sieci czujnikowych w standardzie *LonWorks*, KNX, stanowisko do wzorcowania czujników przyspieszenia (wirówka), stanowisko do wzorcowania przepływomierzy cieczy i gazów, moduł do badań termooanemometrycznych pola prędkości, wzorcowy wzбудnik drgań (Bruel & Kjaer Typ 4294-002), kalibrator mocy i energii Rotek 8000, uniwersalny kalibrator wielkości elektrycznych Transmille 4010, precyzyjny miernik kąta przesunięcia fazowego Kron-Hite 6620, wzorcowy higrometr punktu rosy Mitchell, wzorce pojemności i indukcyjności General Radio serii 1404 i 1409, wzorce rezystancji Tinsley, dwa generatory rubidowe SRS FS725, serwer czasu Meinberg LANTIME M200, dwustrumieniowy generator wilgotności,

- generatory odcinków czasu, w tym BNC Model 745, Agilent 81130A, Grennfield Technology GFT1004,
- wibrometry pracujące z rozdzielczością pm w zakresie do 2 MHz, stanowisko do rejestracji przyrządów MEMS/NEMS w temperaturach kriogenicznych,
- źródła prądowo-napięciowe dla rejestracji stałoprądowych charakterystyk prądowo-napięciowych mikro i nanostruktur,
- aparatura dla rejestracji charakterystyk impedancyjnych w zakresie od 0,1 Hz do 100 MHz.

Kompatybilność elektromagnetyczna

W kategorii kompatybilność elektromagnetyczna wymienić należy:

- aparaturę umożliwiającą m.in. realizację testów odporności urządzeń elektrycznych i elektronicznych na zaburzenia ESD, BURST, SURGE i zmian parametrów zasilania PQ,
- prototyp miernika PM-HPM1 mierzący natężenia impulsowych pól elektromagnetycznych do 500 kV/m w zakresie częstotliwości 10 MHz–12 GHz,
- miernik Narda 520 z sondą EF 1891 (zakres pomiaru pól stacjonarnych 3 MHz–18 GHz, (0,6–1000) V/m),
- zestaw aparatury do generacji i pomiarów mikrofalowych pól impulsowych i niemodulowanych w zakresie częstotliwości 1 MHz–18 GHz o natężeniach: do 1 kV/m w komorach TEM (zakres częstotliwości 1 MHz–1 GHz) oraz do 40 V/m w komorze bezechowej (zakres częstotliwości 700 MHz–18 GHz),
- wysokiej klasy aparatura do badań EMC oraz hala do badań wysokonapięciowych, wyposażona w niezbędny sprzęt,
- komory TEM, komora półbezechowa, komora bezechowa przystosowana do generacji i pomiarów bardzo silnych elektromagnetycznych pól impulsowych o natężeniach do 100 kV/m.

Wyposażenie specyficzne

Należy także wspomnieć o wyposażeniu specyficznym, takim jak:

- stanowisko drogowe do badania systemów *weigh-in-motion*, wyposażone w 8 linii czujników nacisku, wykonanych w dwóch technologiach: płytowe tensometryczne oraz kwarcowe, kamery

poglądowe oraz do odczytu tablic rejestracyjnych, pomiar parametrów środowiskowych, pomiar temperatury drogi na różnej głębokości,

- certyfikowane stanowisko do ważenia pojazdów samochodowych z wagą dynamiczną wolnoprzejazdową (*low-speed*, LS-WIM),
- stanowisko do badania parametrów elektrycznych magnesów nadprzewodnikowych SIS-100, w tym rzeczywiste uzwojenie elektromagnesu nadprzewodnikowego na rdzeniu.

2.1.6. Plany/perspektywa naukowa badań w obszarze metrologii

Plany badawcze, przedstawione przez ankietowane ośrodki metrologiczne, zaprezentowano w analogicznym podziale tematycznym, jaki przyjęto przy omawianiu prowadzonych w nich obszarów badań naukowych, wyróżniając pięć kategorii:

- w zakresie prac badawczych o charakterze podstawowym,
- w zakresie prac badawczych i rozwojowych, mających na celu rozwiązanie ściśle zdefiniowanego problemu i ukierunkowanych na bezpośrednią aplikację wyników badań,
- w zakresie prac badawczych i rozwojowych w obszarze elektroenergetyki, ze szczególnym uwzględnieniem rozwoju odnawialnych źródeł energii oraz energetyki rozproszonej,
- w zakresie prac badawczych i rozwojowych dotyczących nowych rozwiązań czujników pomiarowych,
- w zakresie prac badawczych i rozwojowych dotyczących pomiaru wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi.

W zakresie prac badawczych o charakterze podstawowym

W zakresie prac badawczych o charakterze podstawowym wymieniono:

- praktyczną implementację procedur oceny niepewności w zakresie szeroko pojętych systemów pomiarowych,
- prowadzenie działań mających na celu uzyskanie akredytacji przez Laboratorium Badań i Kalibracji Politechniki Rzeszowskiej,
- zintensyfikowanie współpracy z Głównym Urzędem Miar w zakresie doskonalenia wzorców oraz budowy aparatury służącej do ich komparacji, zwłaszcza w ramach programu „Polska Metrologia”,

- rozwój metod i technik wzorcowania przewodności elektrycznej i termicznej nanostruktur, budowanie wzorców wychylenia i siły na bazie przyrządów MEMS,
- opracowanie następnej generacji urządzeń metrologicznych, zapewniających subpikosekundową rozdzielczość, posiadających wiele kanałów pomiarowych, zwiększoną szybkość wykonywania pomiarów oraz rozszerzony wachlarz funkcji pomiarowych, zintegrowanych w jednym układzie scalonym (FPGA, ASIC),
- badania nad adaptacyjną kalibracją precyzyjnych liczników czasu.

W zakresie prac badawczych i rozwojowych mających na celu rozwiązanie ściśle zdefiniowanego problemu i ukierunkowanych na bezpośrednią aplikację wyników badań

W zakresie prac badawczych i rozwojowych mających na celu rozwiązanie ściśle zdefiniowanego problemu i ukierunkowanych na bezpośrednią aplikację wyników badań wymieniono:

- weryfikację właściwości metrologicznych systemów dynamicznego ważenia pojazdów (systemy WIM) oraz opracowanie metody oceny w czasie rzeczywistym wiarygodności wyników ważenia,
- opracowanie i wdrożenie metod autodiagnostyki systemów WIM i automatycznego wykrywania różnorodnych dysfunkcji, opracowanie i zweryfikowanie procedur zatwierdzenia typu, legalizacji pierwotnej i ponownej systemów WIM,
- prace nad modyfikacją impulsowej metody pomiaru pojemności elektrycznej oraz konduktancji,
- opracowanie metod umożliwiających dwumodalne obrazowanie zarówno przenikalności elektrycznej, jak i przewodności elektrycznej właściwej, w szczególności w zastosowaniu tej techniki pomiarowej w tomografii elektrycznej klatki piersiowej, do monitorowania płuc,
- prowadzenie badań mających na celu weryfikację mierzonych wartości zespolonej podatności magnetycznej na drodze pomiarów kalorymetrycznych, z wykorzystaniem termometru światłowodowego oraz zaprojektowanego specjalnie w tym celu kalorymetru,
- konstruowanie torów pomiarowych do przewodowej i bezprzewodowej akwizycji sygnału z czujników (np. służących do rejestrowania parametrów silników lotniczych poddawanych testom długookresowym na stanowiskach laboratoryjnych),

- budowę autonomicznych systemów pomiarowych przeznaczonych do pracy w terenie (np. stacja do pomiarów skażeń wód powierzchniowych, autonomiczna łódź pomiarowa),
- prace rozwojowe nad zastosowaniem przyrządów MEMS na potrzeby nanometrologii,
- prace rozwojowe w kierunku pomiaru właściwości mikro- i nanostruktur prowadzonych techniką szybkiej mikroskopii SPM,
- prace rozwojowe w kierunku pomiaru właściwości elektrycznych, termicznych i mechanicznych pojedynczych komórek biologicznych, prace rozwojowe nad infrastrukturą metrologiczną do zastosowania w obszarze akustyki badań podwodnych,
- prace rozwojowe nad metodami pomiarowymi i procedurami diagnostycznymi dla potrzeb sterowania i monitoringu parametrów krytycznych w systemach okrętowych, infrastrukturze portowej i systemach OZE,
- prowadzenie badań nad poprawą jakości transmisji informacji analogowej i cyfrowej w okrętowych systemach pomiarowo-kontrolnych, jako elementu wspomagającego odporność morskiej infrastruktury krytycznej,
- opracowanie i realizację miernika do pomiarów impulsowych nie-stacjonarnych pól EM w zakresie częstotliwości 100 MHz–18 GHz i natężeniu pól do 7 kV.

W zakresie prac badawczych i rozwojowych w obszarze elektroenergetyki, ze szczególnym uwzględnieniem rozwoju odnawialnych źródeł energii oraz energetyki rozproszonej

W zakresie prac badawczych i rozwojowych w obszarze elektroenergetyki, ze szczególnym uwzględnieniem rozwoju odnawialnych źródeł energii oraz energetyki rozproszonej wymieniono:

- prace rozwojowe nad nowymi technikami pomiarowymi, metodami detekcji i akwizycji sygnałów zarówno w obszarze wyładowań niezupełnych, jak i ładunku przestrzennego,
- pomiary diagnostyczne i techniczne związane z magazynami energii oraz z niespokojnymi odbiornikami,
- pomiary związane z odnawialnymi źródłami energii i oceną zaburzeń,
- opracowanie propozycji nowych miar i nowych norm pomiarowych,

- prace konstrukcyjne podejmowane w celu opracowania nowych przyrządów i systemów pomiarowych ukierunkowanych na odnawialne źródła energii,
- rozwój technik pomiarowych dla potrzeb pojazdów elektrycznych i napędów przemysłowych, nowoczesne rozwiązania związane z oceną efektywności ich pracy,
- opracowanie metod i kryteriów oceny metrologicznej inteligentnych liczników energii elektrycznej AMI, rozwój metod badań liczników dla stanów występujących w rzeczywistej sieci elektroenergetycznej,
- badanie miar jakości energii elektrycznej: kontynuacja badań właściwości miar dla stanów występujących w rzeczywistej sieci elektroenergetycznej, poszukiwanie miar o większych możliwościach diagnostycznych, ocena przydatności aktualnych miar normatywnych w diagnostyce jakości napięcia w sieci elektroenergetycznej,
- ocenę metrologiczną miar jakości energii elektrycznej oraz analizatorów jakości energii elektrycznej pracujących w warunkach występujących w rzeczywistej sieci elektroenergetycznej.

W zakresie prac badawczych i rozwojowych dotyczących nowych rozwiązań czujników pomiarowych

W zakresie prac badawczych i rozwojowych dotyczących nowych rozwiązań czujników pomiarowych wymieniono:

- poszukiwanie rozwiązania problemu braku selektywności czujników rezystancyjnych poprzez konstrukcję matryc wyposażonych w cienkowarstwowe tlenki metali o różnym poziomie i rodzaju domieszek z grupy lantanowców,
- prace rozwojowe w zakresie technik pomiarowych w układach *organ-on-a-chip* – badania *in-vitro* stosowane w nowoczesnej farmakologii,
- prace rozwojowe nad poprawą metrologicznych właściwości czujników fotonicznych, poprawą rozdzielczości i dokładności pomiaru, opracowanie nowych struktur optycznych i algorytmów oraz układów demodulacji sygnałów z tych czujników, badanie dryftów czasowych i długoterminowych procesów zmiany parametrów czujników światłowodowych,

- prace badawcze prowadzone w celu zmniejszenia czasochłonności i wyeliminowania konieczności wykonywania procesów kalibracji i rekalkibracji fotonicznych czujników wielkości chemicznych,
- opracowanie technologii wytwarzania struktur Bragga na światłowodach fluorkowych, nietlenkowych oraz fotonicznych,
- prace konstrukcyjne związane z budową układu lasera na zakres bliskiej oraz średniej podczerwieni,
- prace nad opracowaniem źródeł promieniowania NIR oraz MIR, wykorzystujących specjalne włókna optyczne oraz zwierciadła braggowskie,
- prace konstrukcyjne nad czujnikami i systemami do pomiarów fizjologicznych (np. elektronika systemu diagnostycznego do szybkiego oznaczania biomarkerów w płynach fizjologicznych),
- prace konstrukcyjne nad narzędziami technologiczno-pomiarowymi wspomagającymi wytwarzanie tkanek za pomocą druku (druk 3D narządów),
- prace konstrukcyjne nad czujnikami pomiarowymi do pomiaru przepływu cieczy i gazów oraz wilgotności (przepływomierze, liczniki ciepła, wzorcowe higrometry i generatory wilgotności), ich wzorcowanie,
- symulacje numeryczne zjawisk występujących w czujnikach (np. analiza pola prędkości w przepływomierzu wirowym, analiza gradientów cieplnych w detektorze punktu rosy),
- projektowanie struktur mikrosystemów w środowisku Coventor, COMSOL.

W zakresie prac badawczych i rozwojowych dotyczących pomiaru wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi

W zakresie prac badawczych i rozwojowych dotyczących pomiaru wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi wymieniono:

- opracowanie propozycji nowych kryteriów oceny źródeł światła (zamienników LED) stosowanych w oświetleniu ogólnym, propozycji nowych technik pomiarowych i urządzeń dedykowanych na potrzeby oświetlenia zintegrowanego,
- budowę stanowiska służącego do prowadzenia ciągłego monitoringu zmienności spektralnej światła dziennego,

- opracowanie prototypu półprzewodnikowego oświetlacza do zwiększenia kontrastu obrazowania tkanek,
- opracowanie procedury hiperspektralnej oceny świeżości produktów spożywczych przy wykorzystaniu multispektralnego półprzewodnikowego źródła,
- badania nad modelowaniem klimatu miejskiego i symulacją sprzężonej wymiany ciepła w złożonych geometriach miejskich i w złożonych warunkach atmosferycznych,
- badania nad możliwością detekcji dronów na podstawie ich widma radiowego,
- badania nad nowymi, bardziej jednoznacznymi, metodami i kryteriami oceny stanu obwodów elektrycznych magnesów nadprzewodnikowych,
- badania nad termowizyjnymi pomiarami temperatury: pomiary bliskie, termowizja aktywna oraz poprawa jakości symulacji rozkładów temperatury w elementach półprzewodnikowych,
- badania w zakresie udoskonalania metod charakteryzacji właściwości cieplnych nowoczesnych przyrządów półprzewodnikowych oraz poszukiwania efektywnych metod pomiaru parametrów charakteryzujących proces włączania i wyłączania rozważanych przyrządów, wykonanych z materiałów półprzewodnikowych o dużej wartości przerwy energetycznej.

2.1.7. Główne czynniki wskazane jako przeszkody ograniczające rozwój badań w obszarze metrologii

Podstawowym czynnikiem, który według respondentów ogranicza rozwój badań w obszarze metrologii, są niskie nakłady na naukę. Negatywny wpływ tego czynnika ujawnia się w różnych aspektach. Po pierwsze metrologia jest nauką eksperymentalną, dlatego wszelkie badania, zwłaszcza prowadzone w naturalnej skali, są kosztowne. Prowadzenie badań na wysokim poziomie merytorycznym wymaga w wielu przypadkach dysponowania laboratoriami wyposażonymi w aparaturę wysokiej jakości, umożliwiającą przeprowadzanie pomiarów z bardzo wysoką dokładnością. Taka aparatura dla zachowania swoich właściwości metrologicznych musi być okresowo wzorcowana w wyspecjalizowanych laboratoriach. Wiele tematów badawczych realizowanych w obszarze metrologii wymaga dysponowania terenowymi poligonami, wyposażonymi w odpowiednią aparaturę, na których mogą

być przeprowadzane eksperymenty pomiarowe. Wymienione czynniki powodują, że badania naukowe prowadzone w obszarze metrologii są bardzo kosztowne. Ponadto należy pamiętać, że w wielu przypadkach badania te nie prowadzą bezpośrednio do wdrożenia ich wyników. Powoduje to, że podmioty komercyjne nie są zainteresowane ponoszeniem kosztów takich badań.

Po drugie niskie nakłady na naukę powodują, że wynagrodzenia młodych adeptów nauki pozostają daleko za wynagrodzeniami oferowanymi specjalistom-metrologom przez przemysł. W efekcie bardzo trudno jest znaleźć, a później zatrzymać młodego, zdolnego i dobrze wykształconego pracownika. Kadra naukowa działająca w obszarze metrologii bez trudu znajduje zatrudnienie w przemyśle, gdzie oferowane wynagrodzenia są kilkakrotnie wyższe niż możliwe do zaoferowania na wyższej uczelni. Powoduje to problemy kadrowe polegające na powstawaniu coraz szerszej luki pokoleniowej, która w konsekwencji może doprowadzić do zaburzenia funkcjonowania części jednostek naukowych. Bariera kadrowa dotyczy jednak nie tylko młodych pracowników naukowych i doktorantów, ale także osób zajmujących specjalistyczne stanowiska inżynierijsko-techniczne. Są to w szczególności informatycy, elektronicy, tokarze, specjaliści od obróbki materiałowej, bez których niemożliwe staje się przygotowywanie prototypów wzorców i aparatury, jak również utrzymanie i rozwój zautomatyzowanych systemów pomiarowych. To negatywne zjawisko jest niestety obserwowane nie tylko w obszarze metrologii, ale we wszystkich dyscyplinach o charakterze inżynierijsko-technicznym.

W następnej kolejności jako czynnik ograniczający rozwój metrologii został wymieniony brak instytucji w sposób systemowy finansujących badania w obszarze metrologii. Narodowe Centrum Nauki (NCN) nie finansuje badań stosowanych, a badania w zakresie metrologii przeważnie mają silny pierwiastek aplikacyjny, ale zagwarantowanie wdrożenia nie jest jednak w wielu przypadkach możliwe. Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBR) natomiast jako warunek finansowania stawia wdrożenie wyników projektu. Brakuje możliwości finansowania etapu pośredniego badań.

Jako kolejne ograniczenie został wymieniony brak lub zbyt mała liczba interdyscyplinarnych zespołów badawczych, integrujących zasoby kadrowe i aparaturowe, rozlokowane w różnych ośrodkach krajowych. Analizując ten czynnik, należy wziąć pod uwagę, że metrologia

jest nauką interdyscyplinarną. Łączy ona zagadnienia specyficzne dla różnych dyscyplin naukowych. Rozwiązanie problemu metrologicznego wymaga często współpracy wielu specjalistów, reprezentujących różne obszary wiedzy. Niestety obecnie agencje finansujące naukę w Polsce nie proponują grantów, które powinny takie działania wspierać. Dodatkowo zasady ewaluacji dyscyplin naukowych wykluczają w praktyce wartościowe publikacje uzyskiwane w ramach badań interdyscyplinarnych. Publikacje takie uznaje się z reguły jako niewpisujące się w zakres ewaluowanych dziedzin. W opinii autora zmiana ustawy Prawo o Miarach (Dz. U. z 2022 r. poz. 2063) i nadanie Głównemu Urzędowi Miar (GUM) statusu jednostki prowadzącej działalność naukowo-badawczą oraz budowa kampusu laboratoryjnego GUM w Kielcach mogą w znaczącym stopniu ułatwić tworzenie interdyscyplinarnych zespołów badawczych działających w obszarze metrologii oraz integrację zespołów prowadzących badania w różnych ośrodkach akademickich i przemysłowych, a także znacząco zwiększyć dostęp do wysokospecjalizowanej aparatury pomiarowej.

Z problemami finansowymi polskiej nauki jest związane istotne ograniczenie finansowania udziału polskich naukowców w konferencjach zarówno międzynarodowych, jak również krajowych. W konsekwencji ogranicza to możliwość wymiany poglądów oraz upowszechnienia wyników badań. Swoją wkład w to niepożądane zjawisko wnoszą również obowiązujący w Polsce system oceny naukowców, polegający na przypisaniu, na ogół arbitralnie, punktowej miary do każdego osiągnięcia naukowego. Praktycznie zrezygnowano z oceny merytorycznej, a na pewno taka ocena stała się tylko jednym z kryteriów. Udział w konferencji naukowej często nie powiększa dorobku punktowego ani uczestnika konferencji, ani reprezentowanej przez niego jednostki. W efekcie uzyskanie finansowania staje się jeszcze trudniejsze. Skutkiem ubocznym tego zjawiska jest obniżenie rangi krajowych konferencji naukowych, w tym również konferencji z zakresu metrologii. Znaczącemu ograniczeniu uległa redukcja forów wymiany informacji naukowej działających w trybie konferencji lub seminarium, utrudniając tym samym wymianę informacji i integrację środowiska metrologów. Próbę przeciwdziałania temu niekorzystnemu zjawisku podejmuje Komitet Metrologii i Aparatury Naukowej, działający w Wydziale IV Polskiej Akademii Nauk. Pod egidą Komitetu są organizowane dwie krajowe konferencje naukowe. Jest to Kongres Metrologii oraz Krajowa

Konferencja Metrologii. Obie konferencje są organizowane w cyklu trzyletnim, ze wzajemnym przesunięciem o półtora roku. Jednak również ich organizatorzy obserwują zmniejszenie liczby uczestników, co jest również spowodowane niskim finansowaniem nauki.

Dla rozwoju metrologii w Polsce konieczne jest uruchomienie programów w obszarze metrologii, finansujących badania w tym obszarze oraz pozwalających na finansowanie współpracy z naukowcami z ośrodków zagranicznych, w szczególności finansowanie wymiany pracowników, pokrycie kosztów delegacji oraz krótko- i długoterminowych staży naukowych. W jakimś stopniu ten postulat spełnia program Polska Metrologia, uruchomiony po raz pierwszy w 2022 r. Program ten może przynajmniej częściowo zredukować problem finansowania badań naukowych w obszarze metrologii. Warunkiem koniecznym jest jednak jego cykliczne powtarzanie, z określoną i znaną częstotliwością, w okresie sięgającym co najmniej dziesięciu lub nawet kilkunastu lat.

W kontekście programu „Polska Metrologia” trzeba zwrócić uwagę na jeszcze jeden ważny aspekt związany z jego funkcjonowaniem. Obecnie obserwowany jest duży nacisk podmiotów finansujących badania w obszarze metrologii na zadania o typowo inżynierskim charakterze, mające potencjał szybkiego i bezpośredniego wdrożenia. Niewystarczające jest natomiast szersze, strategiczne spojrzenie i finansowanie badań w zakresie perspektywicznych potrzeb metrologicznych kraju. Ten program, kontynuowany dostatecznie długo i koordynowany przez GUM mógłby przyczynić się do rozwiązania również tego ważnego problemu. Wydaje się, że był to brakujący element w systemie finansowania nauki w Polsce, który pozwala na realizację badań podstawowych i stosowanych w metrologii oraz sprzyja współpracy pomiędzy GUM i jednostkami prowadzącymi badania w obszarze metrologii na terenie całego kraju. Warunkiem powodzenia jest jednak cykliczność i regularność finansowania, która umożliwia odpowiednio długookresowe planowanie działań badawczych i rozwoju.

W dalszej kolejności, ale jako równie ważne, respondenci jako przeszkody w rozwoju badań w obszarze metrologii wymienili:

- nadmiernie scentralizowany system ubiegania się zespołów badawczych o krajowe środki na prowadzenie badań (NCN, NCBR), w połączeniu z małym zainteresowaniem finansowania badań przez przemysł, co ogranicza możliwość podejmowania nowych zadań badawczych,

- niską świadomość instytucji rządowych i samorządowych w zakresie ważności metrologii dla różnych gałęzi gospodarki, przy czym dotyczy to również poziomu świadomości ogółu społeczeństwa oraz instytucji finansujących naukę,
- marginalizację mniejszych ośrodków naukowych wspierających lokalny przemysł oraz przedsiębiorców, często wywodzących się z tych ośrodków,
- zmniejszającą się liczbę specjalistów i kadry kierunkowej działającej w zakresie metrologii,
- ograniczoną możliwość współpracy, a także wymiany wiedzy i doświadczeń między krajowymi ośrodkami naukowymi z uwagi na utratę znaczenia krajowych konferencji i sympozjów metrologicznych oraz polskich czasopism naukowych poświęconych pomiarom,
- stale rozwijającą się „punktozę” skutkującą odpłatnym publikowaniem prac w wydawnictwach drapieżnych,
- zaniżoną i nieproporcjonalną wobec czasopism z pokrewnych dyscyplin punktację dla krajowych i międzynarodowych czasopism naukowych z zakresu metrologii,
- biurokrację przy zakupie jakiegokolwiek aparatury, kłopotliwe procedury przetargowe oraz, po zakupie aparatury, uciążliwe przygotowywanie sprawozdań i konieczność wypełniania odpowiednich „tabelek” dotyczących wykorzystania tej aparatury,
- niewystarczające finansowanie inwestycji aparaturowych, ponieważ podejmowanie nowych zadań badawczych wymaga częstych inwestycji aparaturowych, a krajowe agencje finansujące naukę nie proponują wsparcia w tym zakresie, co często utrudnia lub wręcz uniemożliwia przystąpienie do konsorcjów projektowych,
- brak perspektywicznego programu badań, co powoduje trudności w utrzymaniu jednolitego profilu badań, przy czym zespoły obecnie mają charakter zadaniowy, tworzone są do realizacji kolejnych projektów, których tematyka nie zawsze znajduje się w głównym zakresie badawczym ich członków,
- specyfikę badań w obszarze metrologii, która powoduje, że osiągnięcie odpowiedniego poziomu technicznego realizacji pomiarów o dużej dokładności i precyzji wymaga eksperymentów z użyciem prototypowych urządzeń lub układów pomiarowych – problemy praktyczne często uniemożliwiają realizację teoretycznie opracowanej metody i często ujawniają się dopiero na etapie realizacji

- układu, przy czym koszty prac prototypowych w elektronice są nieporównywalnie wysokie w porównaniu do produkcji seryjnej, a uzyskanie finansowania na takie prace badawcze jest trudne, gdyż w NCN nie są one traktowane jako prace badawcze, naukowe,
- brak elastyczności typowych schematów finansowania projektów badawczych, co istotnie utrudnia szybkie reagowanie na naturalnie pojawiające się trudności.

2.2. Charakterystyka przemysłowych ośrodków prowadzących badania i prace rozwojowe w zakresie metrologii elektrycznej

Autorowi opracowania zostały udostępnione wyniki ankiety przeprowadzonej przez dr inż. Magdalenę Zawadę-Michałowską (Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska). Ankieta została skierowana do 1 732 podmiotów przemysłowych i naukowych prowadzących działania w zakresie metrologii. Uzyskano 198 odpowiedzi, co daje ponad 11 % responsywność. Poniżej zostały omówione wyniki tej ankiety w zakresie ogólnym oraz w jakim dotyczą one metrologii elektrycznej.

Wszyscy respondenci zadeklarowali wykorzystywanie w swojej działalności metod i narzędzi pomiarowych, a 47 % potwierdziło, że w ramach swojej działalności nie tylko wykorzystuje narzędzia oferowane przez metrologię, ale również samodzielnie prowadzi badania w zakresie metrologii. Ten wynik koreluje ze strukturą organizacyjną grupy respondentów. Mianowicie 36,9 % stanowiły jednostki naukowe, a 39,4 % to akredytowane laboratoria badawcze. Oceniając ten wynik, trzeba uwzględnić fakt, że nie wszystkie jednostki naukowe przeprowadzające różnego rodzaju pomiary (jest to działalność w zakresie metrologii), prowadzą równocześnie badania w tym zakresie. Taki wniosek wynikał również z ankiety przeprowadzonej przez autora pracy. Działalność w zakresie metrologii elektrycznej zadeklarowało 51 podmiotów, co stanowi 25,8 % uzyskanych odpowiedzi. Aż 83,3 % respondentów ponosi koszt związany z wzorcowaniem przyrządów i maszyn pomiarowych. Głównie korzystają z usług Głównego Urzędu Miar (64,2 % odpowiedzi), Okręgowych Urzędów Miar (58,8 % odpowiedzi) oraz akredytowanych laboratoriów wzorcujących

(80 % odpowiedzi). Odpowiadając na to pytanie, respondenci mieli możliwość wielokrotnego wyboru, stąd przedstawione wyniki nie sumują się do 100 %.

Pozytywnym zjawiskiem jest fakt, że ankietowane podmioty w znacznej liczbie (81,8 %) ponoszą koszty inwestycyjne związane z zakupem aparatury pomiarowej. Kwoty przeznaczane na ten cel są bardzo zróżnicowane. W pojedynczych przypadkach sięgają one kilku, a nawet kilkunastu milionów. Pomimo to, jak wskazują odpowiedzi udzielone na dalsze pytania, taki poziom inwestycji jest uznawany przez poszczególne podmioty za niesatysfakcjonujący.

Ponad połowa ankietowanych podmiotów (54,5 %) wskazała na potrzebę wsparcia w rozwiązywaniu ich problemów metrologicznych. Wskazuje to na potrzebę zintensyfikowania działalności naukowej, prowadzonej w zakresie metrologii w Polsce. Jako główne podmioty, od których jest oczekiwana taka pomoc, wskazany został GUM (60,2 % – uruchomienie kampusu laboratoryjnego w Kielcach oraz uzyskanie statusu jednostki naukowej przez GUM powinny przynajmniej częściowo zaspokoić te oczekiwania) oraz polskie akredytowane laboratoria wzorcujące (50 %). Bardzo niepokojące jest natomiast to, że tylko 1,8 % respondentów korzysta z pomocy uczelni wyższych. Taki wynik może wskazywać na brak skorelowania tematyki badawczej rozwijanej na wyższych uczelniach z zapotrzebowaniem przemysłu oraz na brak przepływu informacji pomiędzy tymi dwiema grupami podmiotów.

Wśród problemów, które napotykają ankietowane podmioty w zakresie swojej działalności, na pierwszym miejscu został wskazany niedobór środków finansowych na zakup i utrzymanie nowoczesnej aparatury pomiarowej oraz na zatrudnienie specjalistycznej kadry. Pozostałe problemy, mające charakter merytoryczny, są bardzo zróżnicowane, co wynika ze specyfiki prowadzonej działalności. Z udzielonych odpowiedzi wynika jednak, że brakuje przede wszystkim wsparcia merytorycznego (szkolenia dla kadry, rozwiązywanie specyficznych problemów metrologicznych, opracowywanie nowych metod pomiarowych itp.). Być może rozwiązanie tego problemu ułatwiłaby ogólnokrajowa platforma wymiany informacji pomiędzy jednostkami przemysłowymi potrzebującymi konkretnego wsparcia a laboratoriami badawczymi i jednostkami naukowymi prowadzącymi badania w zakresie metrologii. Być może taką rolę będzie wypełniać, powołana niedawno Polska Unia Metrologiczna (<https://pum.pollub.pl/>).

Istotna większość ankietowanych podmiotów dysponuje przyrządami pomiarowymi z aktualnymi certyfikatami i świadectwami wzorcowania (88,4 %) oraz przyrządami wzorcowymi (73,2 %). Na podstawie wyników ankiety nie można jednak ocenić, czy nasycenie tymi narzędziami pomiarowymi jest wystarczające. W zakresie metrologii elektrycznej ankietowane podmioty dysponują następującymi wzorcami i przyrządami wzorcowymi: termometrami rezystancyjnymi, higrometrami punktu rosy, kalibratorami ciśnienia, miernikami przepływu prądu oraz temperatury, kalibratorami wielkości elektrycznych, ciśnieniomierzami wzorcowymi, kalibratorami dźwięku, drgań mechanicznych, przepływomierzami, przyrządami wzorcowymi do pomiaru długości, kąta, siły, twardości, wielkości akustycznych, czasu i częstotliwości, objętości, wzorcami długości, kąta, masy, siły, komparatorami masy, wzorcami czasu, kalibratorami i wzorcami: rezystancji, indukcyjności, pojemności, wzorcami napięcia, prądu i mocy.

Tylko 10 % ankietowanych podmiotów zadeklarowało wytwarzanie aparatury pomiarowej. W zakresie metrologii elektrycznej są wytwarzane: dedykowane przyrządy do pomiarów wielkości nieelektrycznych, aparatura do pomiaru wielkości elektrycznych, czujniki, przyrządy do pomiarów i rejestracji temperatury, wilgotności, ciśnienia, przepływu powietrza, szerokopasmowe wzorce napięcia przemienne, szerokopasmowe boczniki prądowe, precyzyjne mostki do pomiaru impedancji na podstawie kwantowego efektu Halla, wysokostabilne źródła napięcia i prądu. Układy *system-on-chip* są wytwarzane tylko w 1,5 % ankietowanych podmiotów.

Poziom zatrudnienia kadry metrologicznej w ankietowanych podmiotach jest bardzo zróżnicowany. Liczba pracowników zajmujących się pomiarami lub badaniami w obszarze metrologii waha się od pojedynczych osób do ok. 100. Również proporcje pomiędzy pracownikami badawczymi i technicznymi są bardzo zróżnicowane.

2.3. Podsumowanie diagnozy stanu metrologii elektrycznej w Polsce

W dokumencie Strategia EURAMET 2030 [3] zostały określone główne kierunki, w jakich jest oczekiwany/konieczny rozwój metrologii. Są nimi: cyfrowa transformacja, diagnostyka medyczna, nowoczesne systemy energetyczne, w tym systemy energetyki rozproszonej, ochrona

środowiska, komplementarność i samowystarczalność metrologiczna Europy oparta na krajowych kompetencjach w zakresie metrologii oraz na krajowej specjalizacji metrologicznej. W każdym z tych obszarów przed metrologią stoją ważne zadania.

Następująca obecnie oraz planowana w nadchodzącej przyszłości cyfrowa transformacja społeczeństw i gospodarek stawia przed metrologią nowe zadania, do których w pierwszej kolejności można zaliczyć wykorzystanie sztucznej inteligencji oraz uczenia maszynowego do rozwiązywania problemów z obszaru metrologii. Oczekiwany kierunek rozwoju dotyczy nie tylko narzędzi pomiarowych wykorzystujących tę technologię, ale przede wszystkim dotyczy on rozwoju i wdrożenia metod wykorzystujących tę technologię do oceny wiarygodności danych pomiarowych. W kontekście przedstawionego powyżej przeglądu tematyki prac badawczych podejmowanych w różnych krajowych ośrodkach metrologicznych trzeba stwierdzić, że obecnie w Polsce ten kierunek w metrologii jest słabo rozwijany.

Nowoczesna diagnostyka medyczna oraz nowoczesne metody leczenia powinny być oparte na metodach pomiarowych nieinwazyjnych lub minimalnie inwazyjnych, swoistych, o dużej czułości oraz dających wiarygodne wyniki w czasie rzeczywistym. Dodatkowo powinna zostać zapewniona powszechna dostępność do tych metod, co jest uwarunkowane przede wszystkim ich niskim kosztem. Spełnienie tych oczekiwań jest możliwe pod warunkiem zapewnienia rozwoju technologii czujników, opracowania nowych metod pomiarowych oraz nowych metod przetwarzania i walidacji wyników pomiarowych, opartych również w dużej mierze na sztucznej inteligencji. Rozwój metrologii warunkuje również zapewnienie dostępu do wysokiej jakości wyrobów medycznych. Oceniając stan krajowej metrologii w tym aspekcie, trzeba zauważyć, że istnieją w Polsce ośrodki zajmujące się rozwojem technologii czujników pomiarowych, przeznaczonych dla potrzeb szybkiej, małoinwazyjnej i taniej diagnostyki. Należy również podkreślić, że rozwój metod diagnostyki medycznej, w tym metod wykorzystujących metody i narzędzia sztucznej inteligencji, wirtualnej rzeczywistości, rozszerzonej rzeczywistości są domeną inżynierii biomedycznej. Dlatego tematyka prac badawczych prowadzonych w tym kierunku wykracza poza ramy tego opracowania, co może wywoływać błędne wrażenie braku aktywności krajowych ośrodków w tym zakresie.

Rozwój metrologii w obszarze nowoczesnej energetyki, ze szczególnym uwzględnieniem energetyki rozproszonej oraz odnawialnych źródeł energii i elektromobilności jest widoczny w aktywności naukowej niektórych krajowych ośrodków metrologicznych. W dużej mierze prowadzone prace badawcze dotyczą oceny jakości energii elektrycznej, pomiaru parametrów sieci elektroenergetycznych oraz badań nad nowymi materiałami izolacyjnymi. W ocenie autora opracowania obserwowana aktywność badawcza w tym obszarze nie jest jednak tak intensywna, jak należałoby oczekiwać, biorąc pod uwagę intensywność rozwoju nowoczesnej energetyki oraz rozległość problemów, które oczekują na rozwiązanie. Konieczne jest zacieśnienie współpracy naukowych ośrodków metrologicznych z ośrodkami zajmującymi się eksploatacją sieci energetycznych oraz z ośrodkami badawczymi prowadzącymi swą działalność w zakresie rozproszonych systemów energetycznych, odnawialnych źródeł energii, zasobników energii (również rozproszonych) oraz elektromobilności.

Z przedstawionego przeglądu wynika, że stosunkowo małą aktywność ośrodki wykazują w zakresie rozwoju metrologii dla potrzeb ochrony środowiska. Zgromadzony materiał nie pozwala wskazać przyczyn niskiego zainteresowania środowiska tym obszarem badawczym. Wydaje się uzasadnione przejęcie przez GUM inicjatywy w tym zakresie, poprzez wytyczenie strategicznych kierunków badań i ich koordynowanie, być może np. w ramach programu „Polska Metrologia”.

Na podkreślenie zasługuje względnie wysoka aktywność ośrodków w zakresie pomiarów precyzyjnych, szczególnie pomiaru odcinka czasu. Wiele ośrodków jest dobrze wyposażonych w sprzęt pomiarowy umożliwiający prowadzenie precyzyjnych pomiarów oraz wzorcowanie czujników i torów pomiarowych.

Liczność zespołów prowadzących badania w poszczególnych ośrodkach akademickich jest bardzo zróżnicowana. Tylko w siedmiu ośrodkach liczba członków zespołu przekracza 10. Dominują zespoły kilkusobowe, co należy uznać za zjawisko niekorzystne. Potencjał takich zespołów utrudnia podejmowanie dużych projektów badawczych oraz uzyskiwanie istotnych wyników badań w krótkim czasie, a takich właśnie efektów oczekuje na ogół przemysł, który pod tym warunkiem byłby być może skłonny sfinansować takie badania. Jednak trzeba zauważyć, że utrzymanie „w gotowości” licznego zespołu badawczego, w warunkach bardzo niskiego poziomu finansowania polskiej nauki

z budżetu państwa, jest praktycznie niemożliwe. Niektórzy respondenci podkreślali, że zespoły badawcze są tworzone *ad hoc* dla potrzeb realizacji uzyskanego projektu. Z wielu względów nie jest to zjawisko korzystne i należy je uznać za jeden z czynników ograniczających rozwój metrologii w Polsce.

Zadowalająca jest liczba doktorantów (jest ich 59 w 22 ośrodkach – to nie jest mało) prowadzących badania w zakresie metrologii. W jakimś stopniu jest to nawet zaskakujące (pozytywnie), biorąc pod uwagę opisane powyżej niekorzystne zjawiska. Stwarza to dobre perspektywy w odniesieniu do możliwości odtwarzania kadry metrologicznej w najbliższej przyszłości. Znacząca liczba doktorantów specjalizujących się w zakresie metrologii w pewnym stopniu może mieć również korzystny wpływ na funkcjonowanie kampusu laboratoryjnego GUM w Kielcach. Niewątpliwie dla jego potrzeb wymagane jest przygotowanie znaczącej liczby specjalistów-metrologów.

Ze względu na bardzo duże nakłady finansowe oraz kadrowe, jakich wymaga rozwój nowoczesnej metrologii, dążenie do samowystarczalności poszczególnych krajów w tym zakresie nie jest uzasadnione, o ile w ogóle pełna samowystarczalność jest możliwa do osiągnięcia. Dlatego, zgodnie z zaleceniami zawartymi w międzynarodowych dokumentach, należy dążyć do osiągnięcia samowystarczalności metrologicznej w ramach Unii Europejskiej (UE), która powinna być oparta na krajowych specjalizacjach metrologicznych oraz na świadczeniu wzajemnych usług w tym zakresie. Konieczne jest oczywiście określenie obszarów metrologii, które mogą być „obsługiwane” w ramach międzynarodowej współpracy, biorąc pod uwagę bezpieczeństwo zdrowotne, energetyczne i technologiczne każdego społeczeństwa.

3.1. Wprowadzenie

Zanim przejdziemy do bardziej szczegółowego omawiania tendencji rozwojowych metrologii elektrycznej, w powiązaniu z różnymi działaniami aktywności społecznej i gospodarczej człowieka, spójrzmy na to zagadnienie z bardziej odległej perspektywy.

Dosyć powszechnie uważa się w środowisku metrologów, że rozwój metrologii, nie tylko elektrycznej, będzie następował głównie w kilku podstawowych kierunkach, które są powiązane ze spodziewanym lub koniecznym rozwojem technik wytwarzania, ochroną środowiska oraz ochroną zdrowia. Perspektywy rozwoju metrologii elektrycznej są stymulowane przez dwa czynniki. Po pierwsze następuje stały postęp technologiczny umożliwiający z jednej strony rozwój narzędzi pomiarowych, a przede wszystkim wzorców, przyrządów pomiarowych oraz czujników, a z drugiej strony ten obserwowany rozwój technologiczny generuje coraz bardziej złożone zadania, których rozwiązaniem musi zająć się metrologia elektryczna. Bez wątpienia podstawowym kierunkiem rozwoju metrologii jest zwiększenie dokładności pomiarów. Dążenie do osiągnięcia tego celu jest realizowane poprzez rozwój wzorców wielkości mierzonych, technologiczny rozwój przyrządów pomiarowych oraz opracowywanie nowych metod pomiarowych. Zwiększenie dokładności pomiarów jest niezbędne w dziedzinach, takich jak np.: przemysł wytwórczy, telekomunikacja (zapewnienie integralności transmisji danych), przemysł zbrojeniowy (wytwarzanie oraz zapewnienie zaplecza serwisowego dla nowoczesnych środków pola walki), ochrona zdrowia (zwiększenie wnikliwości metod diagnostycznych).

Drugim kierunkiem rozwoju metrologii w ogóle, a metrologii elektrycznej w szczególności jest normalizacja i standaryzacja metod

pomiarowych. Są to działania niezbędne dla zapewnienia spójności i możliwości porównywania wyników pomiarów, również w skali międzynarodowej.

Rozwój technologiczny powala z jednej strony na poszerzenie zbioru mierzalnych wielkości elektrycznych, a równocześnie potrzeby zaawansowanych technologii wymagają od metrologii jej rozwoju w tym kierunku. Obserwowane jest specyficzne sprzężenie pomiędzy techniką i technologią pomiarów, a technologią wytwarzania. W tym obszarze działania są ukierunkowane przede wszystkim na rozwój czujników pomiarowych oraz technologię budowy rozległych systemów pomiarowych.

W trakcie przygotowywania opracowania dotyczącego kierunków rozwoju metrologii elektrycznej zastosowane zostały trzy metody badawcze. Po pierwsze przeprowadzony został przegląd literatury ze szczególnym uwzględnieniem dokumentów publikowanych przez światowe i europejskie organizacje metrologiczne. Po drugie osobom kierującym krajowymi ośrodkami metrologicznymi (tab. 1), w ramach przeprowadzonej ankiety, zadane zostało pytanie dotyczące ich opinii nt. prognoz rozwoju obszarów metrologii specyficznych dla tych ośrodków. Po trzecie kilku uznanych ekspertów zostało poproszonych o wyrażenie swojej opinii dotyczącej perspektyw rozwoju metrologii w ich obszarach kompetencji.

Perspektywy rozwoju metrologii można analizować w odniesieniu do poszczególnych obszarów zastosowań metrologii, np.: transport, energetyka, ochrona zdrowia i środowiska naturalnego, transformacja cyfrowa i bezpieczeństwo społeczeństwa lub w odniesieniu do poszczególnych narzędzi i metod wykorzystywanych przez metrologię, np.: czujniki, wzorce, metody pomiarowe itd. Te dwa podejścia nie są rozdzielne, a wręcz przeciwnie przenikają się. Pisząc o rozwoju technologii czujników, nie można przecież przesądzić, w jakim obszarze znajdą one zastosowanie. W tym opracowaniu zastosowano podejście mieszane. Przedstawione zostały np. perspektywy rozwoju czujników pomiarowych, które mogą znaleźć zastosowanie w różnych obszarach, wywołując w nich rozwój metrologii. Opinie zaproszonych ekspertów dotyczą natomiast perspektyw rozwoju metrologii w wybranych obszarach zastosowań.

Nie we wszystkich z wyżej wymienionych obszarów metrologia elektryczna odgrywa pierwszoplanową rolę. Dlatego też w odniesieniu

do niektórych obszarów, w których rola metrologii elektrycznej wydaje się być ograniczona, wskazano jedynie podstawowe problemy, będące przedmiotem zainteresowań metrologii. Obszarom takim jak transport drogowy i elektroenergetyka poświęcono natomiast odrębne rozdziały, gdyż rola metrologii elektrycznej wydaje się być w tych obszarach szczególnie istotna.

3.2. Perspektywy rozwoju metrologii elektrycznej w powiązaniu ze strategicznymi kierunkami rozwoju społeczeństw: Europejski Zielony Ład, transformacja cyfrowa, opieka zdrowotna, bezpieczeństwo cyfrowe

Spodziewane i planowane kierunki rozwoju społeczeństw wymuszone są przede wszystkim wzrostem liczby ludności zamieszkującej Świat. Jego konsekwencją jest narastające obciążenie dla środowiska, pogłębiający się deficyt zasobów naturalnych, wody, gleby, konieczność zapewnienia szerokiego dostępu do taniej i zdrowej żywności, opieki zdrowotnej, a równocześnie konieczne jest zapewnienie zachowania bioróżnorodności flory i fauny. Zapobieganie wynikającym stąd zagrożeniom wymaga opracowania spójnej i kompleksowej strategii zrównoważonego rozwoju społeczeństw. Kierunki i działania wspierające realizację celów wskazanych w takiej strategii mają bezpośrednie przełożenie na wszystkie obszary życia człowieka, w tym również definiują one kierunki badań naukowych oraz kierunki rozwoju technologii i techniki. Rolą metrologii jest dostarczanie wiedzy niezbędnej dla realizacji wskazanych kierunków rozwoju i podejmowanych działań. Dlatego ocena perspektyw rozwoju metrologii musi brać pod uwagę strategiczne kierunki rozwoju opracowywane i publikowane przez międzynarodowe organizacje, takie jak np. Organizacja Narodów Zjednoczonych (ONZ) i Unia Europejska.

Poniżej, na podstawie dostępnych dokumentów, zostały krótko omówione strategiczne kierunki, w których w perspektywie najbliższych kilku lat jest spodziewany lub powinien następować rozwój społeczeństw. Równocześnie wskazane zostały główne zadania, jakie staną przed metrologią jako dziedziną nauki, ale również jako obszarem działalności eksperymentalnej, technicznej oraz technologicznej i które wynikają bezpośrednio z przedstawianej strategii rozwoju społeczeństw.

W Strategii EURAMET 2030 [3] wskazano, że zrównoważony rozwój społeczeństw wymaga dysponowania m.in. wiarygodną informacją na temat stanu środowiska, opracowania ulepszonych leków i postępu w rolnictwie. Potrzebny jest postęp technologiczny w produkcji, wytwarzaniu, przesyłaniu i magazynowaniu energii, w technologiach komunikacyjnych i w infrastrukturze transportowej. Rewolucja cyfrowa powoduje wzrost zapotrzebowania na dane pomiarowe dostępne w czasie rzeczywistym, niezależnie od tego, jakiego obszaru działalności człowieka one dotyczą. We wszystkich tych obszarach zadaniem metrologii jest zapewnienie niezbędnej jakości danych pomiarowych. Takie wyzwania wymagają podejmowania szeregu działań, z których podstawowym wydaje się być rozwój i upowszechnianie osiągnięć metrologii w kierunku poszerzania zakresu mierzonych wielkości, zwiększenia dokładności i szybkości pomiaru, w kierunku opracowania nowych czujników, wyróżniających się niezawodnością, trwałością, niskim kosztem, niską inwazyjnością, w kierunku opracowywania nowych wzorców wielkości mierzonej, umożliwiających zmniejszenie niepewności wyników pomiarowych, budowania systemów pomiarowych zdolnych do pozyskiwania, przetwarzania i przesyłania dużych strumieni danych, udostępniania wyników pomiarowych w czasie rzeczywistym szerokiej grupie odbiorców. Realizacja tych zadań będzie możliwa tylko przy ścisłej międzynarodowej współpracy w zakresie metrologii oraz współpracy ze wszystkimi stronami zainteresowanymi wykorzystaniem danych pomiarowych.

Komisja Europejska określiła perspektywiczne zadania stawiane przed metrologią w związku z przemianami następującymi w społeczeństwach zrzeszonych krajów. Należą do nich trzy strategiczne obszary. Są to: Europejski Zielony Ład, transformacja cyfrowa oraz opieka zdrowotna [4].

Europejski Zielony Ład obejmuje następujące zadania, w których istotną rolę będzie odgrywać metrologia. Są to: rozwój technologii przyjaznych dla środowiska, wprowadzanie innowacji w procesach wytwarzania, rozwój zrównoważonego transportu osób i towarów, wytwarzanie, dystrybucja i wykorzystanie energii, budowa i eksploatacja budynków zeroemisyjnych, wydobywanie surowców, przetwarzanie odpadów i wdrożenie gospodarki o obiegu zamkniętym, wprowadzenie globalnych norm dotyczących ochrony środowiska, zapewnienie utrzymania różnorodności biologicznej i dążenie do redukcji zanieczyszczeń

we wszystkich środowiskach: w powietrzu, w lasach, w zasobach słodkiej wody i w oceanach.

Transformacja cyfrowa spowoduje, że instytuty metrologiczne będą musiały dostosować swoją działalność do zmieniających się wymagań, wynikających z wprowadzania nowych technologii pomiarowych, wykorzystujących np. sztuczną inteligencję i uczenie maszynowe. Nowe regulacje i rozwiązania techniczne są potrzebne nie tylko w przypadku sprzętu pomiarowego charakteryzującego się zaawansowanym przetwarzaniem danych, ale także w celu oceny jakości pozyskiwanych danych.

Dążenie do zapewnienia opieki zdrowotnej powszechnie dostępnej i na wysokim poziomie spowoduje, że metrologia będzie odgrywać kluczową rolę w zapewnianiu wiarygodnych pomiarów na potrzeby diagnostyki i leczenia, jakości wyrobów medycznych oraz przy opracowywaniu nowych, innowacyjnych metod pomiarowych i sprzętu dla sektora ochrony zdrowia. Jakość stosowanych metod pomiarowych, sprzętu oraz materiałów powinna być weryfikowana w skali międzynarodowej przy zastosowaniu uznanych metod i w odniesieniu do odpowiednich materiałów referencyjnych.

W cytowanym dokumencie wymienione zostały strategiczne kierunki badań naukowych na lata 2021–2024, wśród których ważne miejsce zajmuje dążenie do osiągnięcia zrównoważonego rozwoju i neutralności klimatycznej w Europie, przystosowanie gospodarek i społeczeństw do transformacji cyfrowej oraz zapewnienie transferu wiedzy i innowacyjnych rozwiązań do szerokiego spektrum obszarów. Do tych kierunków zaliczono:

- prowadzenie badań nad kluczowymi technologiami, które mogą przyspieszyć transformację cyfrową i ekologiczną oraz pozwolą sterować tą transformacją w taki sposób, aby przyniosła ona jak największe korzyści człowiekowi i społeczeństwom,
- odbudowa europejskich ekosystemów i różnorodności biologicznej oraz zrównoważone zarządzanie zasobami naturalnymi w celu zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego oraz czystego i zdrowego środowiska,
- uczynienie Europy obszarem, w którym zostanie wdrożona gospodarka o obiegu zamkniętym, neutralnym dla klimatu i wyposażonym w technologię cyfrową poprzez transformację systemu transportowego, sektora energetycznego i przemysłu wytwórczego,

- budowanie demokratycznego społeczeństwa europejskiego, przygotowanego i reagującego na zagrożenia i katastrofy, eliminującego nierówności społeczne i zapewniającego wysokiej jakości opiekę zdrowotną.

W zakresie każdego z tych strategicznych celów zostały wyróżnione podstawowe obszary, w których powinny być prowadzone intensywne badania, również obejmujące swoim zasięgiem zagadnienia pozostające w obszarze zainteresowań szeroko rozumianej metrologii. Skuteczne wdrożenie efektów tych badań warunkuje osiągnięcie wskazanych celów strategicznych. Wyróżnionymi obszarami są:

- ochrona zdrowia,
- bezpieczeństwo obywateli,
- rozwój technologii cyfrowych, wytwórczych i kosmicznych,
- ochrona klimatu, rozwój technologii energetycznych oraz transportowych,
- zrównoważony rozwój rolnictwa i przemysłu spożywczego, gospodarowanie zasobami naturalnymi, zapewnienie bioróżnorodności.

Celem badań podejmowanych w obszarze ochrony zdrowia jest zwiększenie dostępności i poziomu świadczenia opieki zdrowotnej. Planuje się, że zostanie to osiągnięte poprzez tworzenie bezpieczniejszych, wiarygodnych, skuteczniejszych i wydajnych, przystępnych cenowo narzędzi, technologii i rozwiązań na rzecz lepszej (np. spersonalizowanej) opieki zdrowotnej, profilaktyki, diagnostyki medycznej, terapii i lepszego nadzoru medycznego. Szczególnej uwagi wymagają takie zagadnienia jak: rozwój medycyny spersonalizowanej, zwalczanie chorób przewlekłych, prowadzenie populacyjnych badań klinicznych, rozwój metod diagnostyki i leczenia chorób neurodegeneracyjnych i psychicznych, poprawa dostępności do usług medycznych.

Ponadto konieczne jest podniesienie świadomości skutków degradacji środowiska oraz czynników ryzyka zawodowego i stylu życia dla zdrowia ludzi. Niezbędne jest zapobieganie chorobom związanym ze spożywaniem nieodpowiedniej żywności, co wymusza rozwój systemów monitorowania szeroko rozumianego bezpieczeństwa żywności i procesów technologicznych w systemach produkcji żywności. Trzeba zapewnić, aby rozwój sektora ochrony zdrowia był zrównoważony pod względem środowiskowym. Oznacza to konieczność rozwoju czystych technologii i usług zdrowotnych, tak aby zarówno systemy opieki zdrowotnej, jak i gałęzie przemysłu związane z ochroną zdrowia stały

się zrównoważone, opłacalne i konkurencyjne. Konieczny jest rozwój metod i środków radzenia sobie z zagrożeniami dla zdrowia powodowanymi zmianami klimatycznymi.

Podstawowym zadaniem związanym z zapewnieniem bezpieczeństwa obywateli jest ustanowienie, wdrożenie i zarządzanie odporną, krytyczną infrastrukturą cyfrową i fizyczną zarówno prywatną, jak i publiczną. Oczekiwanym efektem jest skuteczna obrona, w epoce cyfrowej, norm i wymagań UE dotyczących prawa do prywatności, ochrony danych osobowych i ochrony innych praw podstawowych. Badania naukowe i innowacje mające na celu zwiększenie poziomu cyberbezpieczeństwa, również przyczynią się do zwiększenia odporności infrastruktur cyfrowych oraz ich zdolności do dostarczania i świadczenia usług.

W cytowanym dokumencie [4] postawiono tezę, że rozwój technologii cyfrowych, wytwórczych i kosmicznych zwiększy zdolność adaptacji społeczeństw do zmieniających się warunków. Celem podejmowanych działań jest zwiększenie zdolności do przeprowadzenia zmian w zakresie produkcji, żywienia gospodarczego i gotowości do realizacji zielonej, cyfrowej i uczciwej transformacji. Badania naukowe prowadzone w tym obszarze będą wspierać wykorzystywanie możliwości w kluczowych elementach łańcucha dostaw usług cyfrowych, konsolidacji zasobów informatycznych i technologicznych (np.: systemów wbudowanych, telekomunikacji, technologii przemysłowych) oraz rozwijaniu brakujących segmentów o charakterze kluczowym, w tym bezpiecznych, zrównoważonych i odpowiedzialnych źródeł dostaw surowców, a szczególnie surowców krytycznych. Rozwój tego obszaru przyczyni się do zwiększenia bezpieczeństwa żywnościowego społeczeństw i ochrony środowiska. Zostanie to osiągnięte poprzez opracowanie i wdrożenie nowych technologii zastosowanych w rolnictwie, rybołówstwie, akwakulturze, systemach żywnościowych, leśnictwie i monitorowaniu środowiska. Przykładami takich zastosowań są monitorowanie upraw, rolnictwo precyzyjne lub kontrola rybołówstwa poprzez łączenie obrazów i danych pomiarowych z różnych źródeł, rozwój systemów monitorowania, zastosowanie inteligentnych robotów lub dronów oraz pozyskiwanie informacji pochodzącej z satelitów. Wszystkie wymienione działania i technologie wymagają odpowiedniego zabezpieczenia metrologicznego, a to będzie w najbliższej przyszłości stymulować rozwój i poszerzenie stosowania rozległych,

wielowymiarowych i wielomodalnych systemów pomiarowych, pozyskujących duże strumienie danych pomiarowych pochodzących z rozległych obszarów i udostępniających te dane szerokiej grupie odbiorców. Końcowym wynikiem działania takich systemów pomiarowych powinny być łatwo interpretowalne wskaźniki, zrozumiałe dla osób niebędących metrologami, a w wielu przypadkach niemających przygotowania technicznego. Przewiduje się, że podejmowane działania przyczynią się do przekształcenia tej gałęzi przemysłu, tak aby do 2050 r. stała się ona neutralna dla klimatu, nie emitująca zanieczyszczeń, energooszczędna i konkurencyjna w skali globalnej. W znaczący sposób powinno się to przyczynić do zwiększenia efektywności energetycznej oraz zmniejszenia śladu węglowego.

Celem badań naukowych podejmowanych w obszarze ochrony klimatu i rozwoju technologii energetycznych oraz transportowych jest wspieranie zielonej transformacji Europy, w szczególności w sektorze energii i mobilności. Wdrożenie wyników badań umożliwi stosowanie czystszych i bardziej konkurencyjnych rozwiązań w zakresie wytwarzania i odbioru energii, mobilności oraz usług cyfrowych o kluczowym znaczeniu dla konkurencyjnej gospodarki. Podejmowane działania przyczynią się do powstania czystszej i zdrowszego środowiska poprzez ograniczenie negatywnego wpływu mobilności oraz wytwarzania i wykorzystania energii na jakość powietrza, ekosystemy i różnorodność biologiczną.

Wiele wyzwań stojących przed sektorami transportu i energetyki jest ze sobą ściśle powiązanych. W związku z rozwojem elektromobilności należy spodziewać się, że prowadzone badania pozwolą opracować bardziej wydajne, zrównoważone technologie wytwarzania akumulatorów przy równoczesnym zapewnieniu pełnej kontroli nad procesem dystrybucji, eksploatacji i utylizacji zużytych akumulatorów. Duże nadzieje są związane z rozwojem technologii wodorowych w celu poprawy wydajności, obniżenia kosztów, podniesienia poziomu bezpieczeństwa oraz zapewnienia zrównoważonego wpływu technologii wodorowych i ogniw paliwowych na środowisko. Powinny zostać zapewnione współpraca oraz dążenie do międzysektorowego koordynowania prowadzonych badań i wykorzystania opracowanych rozwiązań w dziedzinie energii, transportu i przemysłu, skutkujące zwiększeniem efektywności wykorzystania zasobów, prowadzące do obiegu zamkniętego i możliwości recyklingu. Ponadto spodziewane jest powstawanie

przełomowych technologii zmierzających do zapewnienia neutralności klimatycznej w obszarze energetyki i transportu. Rozwój tych technologii będzie generował nowe wyzwania dla metrologii zarówno w zakresie czujników pomiarowych, metod pomiarowych, jak i budowy rozległych systemów akwizycji i przetwarzania danych pomiarowych.

Wdrożenie wyników badań prowadzonych w obszarze zrównoważonego rozwoju rolnictwa i przemysłu spożywczego umożliwi odbudowę zdegradowanych ekosystemów, zatrzymanie i odwrócenie utraty różnorodności biologicznej i powiązanych z nią funkcji ekosystemów, ograniczenie ryzyka klęsk żywiołowych oraz łagodzenie skutków zmian klimatu i lepszego przystosowania się do nich. Celem jest również zrównoważone zarządzanie zasobami naturalnymi o obiegu zamkniętym na lądzie i na morzu. Badania naukowe i innowacje w tym obszarze będą wspierać przejście na neutralną dla klimatu, zrównoważoną i produktywną gospodarkę, w tym akwakulturę, rybołówstwo i wschodzące sektory, takie jak biotechnologia morska.

Zaspokojenie potrzeb żywnościowych społeczeństw, przy równoczesnym zapewnieniu neutralności środowiskowej rolnictwa wymaga przekształcenia go w gospodarkę o obiegu zamkniętym, przy równoczesnym zapewnieniu wysokiej wydajności zarówno w obszarze produkcji roślinnej, zwierzęcej gospodarki morskiej, efektywnego zarządzania istniejącymi zasobami wody, gleby oraz składnikami odżywczymi i środkami ochrony roślin stosowanymi w procesie produkcji. Rolnictwo cyfrowe i precyzyjne pozwoli osiągnąć trzy podstawowe cele. Poprzez zapewnienie metrologicznego oprzyrządowania całego procesu produkcji roślin, wykorzystanie technologii satelitarnej oraz zintegrowanych systemów cyfrowych możliwe jest obniżenie kosztów produkcji rolniczej, zwiększenie wydajności oraz zmniejszenie obciążenia dla środowiska naturalnego. Osiągnięcie wymienionych celów wymaga jednak dysponowania bardzo bogatą i aktualną wiedzą dotyczącą warunków agrotechnicznych, klimatycznych oraz meteorologicznych. Źródłem tej wiedzy mogą być jedynie rozległe, wielowymiarowe systemy pomiarowe, zintegrowane z ośrodkami meteorologicznymi, obejmujące swym zasięgiem znaczne obszary terenu.

W przytoczonym dokumencie [4] przewiduje się, że dane pomiarowe staną się nowym „surowcem” dla gospodarki. Pozyskiwanie i szerokie udostępnianie danych pomiarowych pochodzących z różnych podsystemów otaczającego nas środowiska naturalnego, gospodarczego

i społecznego wpłynie na zmiany następujące w przemyśle wytwórczym, ale również na życie każdego obywatela. Dostęp do danych pomiarowych spowoduje powstawanie wielu nowych produktów i usług, zwiększenie efektywności wykorzystania istniejących zasobów w różnych sektorach gospodarki. Ilość pozyskiwanych danych pomiarowych szybko rośnie. Ich powszechne udostępnienie i umożliwienie ich wykorzystania, w tym wykorzystania ponownego lub wielokrotnego przez różnych odbiorców, agregowania, budowania modeli i przetwarzania dużych zbiorów wymaga opracowania nowych technologii inżynierii danych. Realizacja tych zagadnień oraz osiągnięcie opisanego stanu wygeneruje zupełnie nowe zadania i określi spodziewane kierunki rozwoju również dla metrologii. Badania podejmowane w ramach metrologii muszą wychodzić naprzeciw opisanym powyżej celom strategicznym i dostarczać rozwiązań wspierających ich realizację. Szczególnie istotne wydaje się być przeciwdziałanie dyskryminacji w zakresie dostępu do danych pomiarowych i możliwości ich swobodnego wykorzystania, z równoczesnym zachowaniem ograniczeń i zapewnienia bezpieczeństwa w odniesieniu do danych pomiarowych pochodzących z infrastruktury krytycznej.

3.3. Perspektywy rozwoju czujników pomiarowych

Czujniki są podstawowym elementem każdego układu pomiarowego. Technologia ich wykonania, parametry metrologiczne oraz dostępność są podstawowymi czynnikami decydującymi o dokładności wyników pomiarowych, a często w ogóle o mierzalności określonej wielkości fizycznej. Równocześnie nie jest możliwe powiązanie określonego czujnika z konkretnym obszarem zastosowań. Ten sam czujnik może być zastosowany z powodzeniem do pomiarów prowadzonych na różnych obiektach i w różnych obszarach działalności człowieka. Jakkolwiek niektóre technologie wykonywania czujników powstały na zapotrzebowanie ściśle określonych zastosowań, to w późniejszych okresach następuje ich upowszechnienie również w innych, często zaskakujących obszarach. Poniżej przedstawione zostały spodziewane w najbliższej przyszłości kierunki rozwoju technologii wytwarzania czujników pomiarowych niezależnie od obszaru ich potencjalnych zastosowań.

W raporcie Raghu Dasa [5] przedstawiona została perspektywa rozwoju rynku drukowanych i elastycznych czujników, sięgająca do 2030 r. Dotyczy ona różnorodnych typów czujników wytwarzanych przy zastosowaniu zróżnicowanych technologii. Z punktu widzenia niniejszego opracowania interesujące są, opisane w dokumencie [5], perspektywy rozwoju czujników piezorezystancyjnych i piezoelektrycznych, czujników temperatury, pojemnościowych czujników naprężenia, czujników gazu i wilgotności oraz bioczujników.

Na potwierdzenie powyższej tezy o różnorodnych zastosowaniach czujników pomiarowych należy wskazać, że piezorezystancyjne czujniki siły nanoszone na podłoże metodą drukowania są obecnie szeroko stosowane w układach wykrywania obecności w przemyśle *automotive*, w instrumentach muzycznych, w urządzeniach technicznych codziennego użytku oraz w urządzeniach medycznych. Przykładem zastosowania takich czujników są panele dotykowe 3D, które mogą mierzyć przyłożoną siłę w funkcji współrzędnych geometrycznych. Takie rozwiązanie jest stosowane np. w urządzeniach umożliwiających rozpoznawanie gestów. Połączenia czujników pojemnościowych/piezorezystancyjnych mogą pełnić zarówno funkcję detektorów zbliżenia, jak również przełączników aktywowanych naciśnięciem na czujnik. Znajdują one zastosowanie w zabezpieczeniach stosowanych np. w różnych typach elektronarzędzi.

Czujniki piezoelektryczne, podobnie jak piezorezystancyjne, mogą być wykorzystywane do pomiaru siły. Ich produkcja jest jednak znacznie droższa. Z przytoczonego raportu wynika, że z tego właśnie powodu producenci tych czujników dążą do ich wykorzystania w takich zastosowaniach, w których posiadają one przewagę nad czujnikami piezorezystancyjnymi i które pozwalają wykorzystać ich unikalne właściwości. Tą właściwością jest duża wrażliwość na wibracje mechaniczne o wysokiej częstotliwości. Rozwijane jest zastosowanie dwóch materiałów, nadających się do wytwarzania tych czujników metodą druku. Są to polimery i kompozyty z zawartością substancji nieorganicznych. Niemniej konkurencja ze strony niedrogich czujników piezorezystancyjnych powoduje, że zastosowania czujników piezoelektrycznych są niszowe. Szansą na ich rozwój jest budowa czujników z własnym zasilaniem. Przykładowym zastosowaniem czujników piezoelektrycznych, wykorzystującym ich unikalne właściwości są elastyczne siłowniki pracujące przy wysokiej częstotliwości. Znajdują one

zastosowanie np. jako przenośne generatory ultradźwięków w urządzeniach terapeutycznych.

Czujniki temperatury mogą być drukowane atramentem kompozytowym zawierającym nanocząsteczki krzemu lub nanorurki węglowe. Takie czujniki – nadrukowane na powłokach konformalnych, czyli powłokach charakteryzujących się idealną ciągłością, o jednorodnej i kontrolowanej grubości – pozwalają osiągnąć dodatkowy efekt, ważny przy pomiarach temperatury. Mianowicie zapewniają one bardzo dobry kontakt termiczny z podłożem. Tym samym zapewnione są warunki przepływu ciepła pomiędzy obiektem pomiarów i czujnikiem, co przekłada się bezpośrednio na skrócenie czasu pomiaru oraz poprawę dokładności. Rozwój drukowanych czujników temperatury jest jednak ograniczony przez „konkurencję” ze strony już obecnie stosowanych czujników, takich jak: rezystancyjne czujniki temperatury metalowe i półprzewodnikowe.

W ciągu ostatnich lat opracowano wiele różnych rozwiązań elastycznych czujników odkształcenia, które częściowo lub w całości są wytwarzane metodą drukowania. Ich wytwarzanie w skali wielkoseryjnej przy równoczesnym zapewnieniu niskich kosztów wytwarzania okazało się jednak problemem trudnym do rozwiązania. Jednocześnie okazało się, że to nowe rozwiązanie nie jest konkurencyjne w stosunku do produktów już istniejących na rynku, co oznacza konieczność poszukiwania dla nich nowych zastosowań, w których ta technologia mogłaby uzyskać przewagę. Niewątpliwie takim segmentem rynku czujników jest elektronika ubieralna oraz urządzenia wykorzystywane do ciągłego monitorowania starszych osób żyjących samotnie oraz pacjentów przebywających w domu, a wymagających ciągłego nadzoru medycznego. Ciągłe są poszukiwane nowe obszary zastosowań dla tych czujników, w których mogłyby one wykazać swoją przewagę nad innymi rozwiązaniami.

Zgodnie z cytowanym raportem [5] technologię drukowania można również wykorzystać przy produkcji czujników gazu i wilgotności. Jako materiału używa się wówczas ceramiki, a czujniki są drukowane w postaci grubej folii. Po wydrukowaniu ceramika jest utwardzana w wysokiej temperaturze, co ogranicza możliwość drukowania takich czujników na elastycznym podłożu. W nowszej odmianie tej technologii jako materiał wykorzystuje się półprzewodniki organiczne. Technologia umożliwia łączenie czujników różniących się czułością na różne

substancje (selektywnych), co w efekcie prowadzi do wytworzenia tzw. elektronicznego nosa. Większą wagę przywiązuje się obecnie do ochrony środowiska, w tym do monitorowania jakości powietrza, co otwiera nowe możliwości stosowania czujników gazu. Technologia drukowania czujników gazu stwarza szerokie możliwości ich stosowania w nietypowy sposób. Dobrym przykładem mogą być czujniki drukowane bezpośrednio na opakowaniach produktów spożywczych, w celu monitorowania stopnia degradacji produktu. Takie zastosowanie pociągnie prawdopodobnie za sobą konieczność opracowania elastycznych, hybrydowych układów elektronicznych, współdziałających z czujnikiem.

Technologia druku najszerzej rozwinęła się w odniesieniu do biosensorów. Znaczący udział mają w tym obszarze paski testowe służące do pomiaru glukozy. Spodziewane jest jednak, że ich udział w rynku czujników będzie malał ze względu na upowszechnianie się urządzeń do ciągłego monitorowania poziomu glukozy. Ta tendencja będzie się co najmniej utrzymywać na obecnym poziomie. Zastosowanie drukowanych biosensorów nie ogranicza się tylko do pomiaru glukozy. Pojawiają się również inne czujniki wykorzystywane do ciągłego monitorowania parametrów życiowych u osób przewlekle chorych, a pozostających w warunkach domowych: czujniki EKG, detektory oddechu, czujniki ruchu, tętna, temperatury ciała, stopnia saturacji hemoglobiny itp. Takie czujniki są również wdrukowywane w ubrania ochronne pracowników różnych służb ratowniczych oraz wykonujących pracę w warunkach ekstremalnych, a także znajdują zastosowanie w mundurach i ubiorach wojskowych. W najbliższej przyszłości należy liczyć się z istotnym wzrostem zapotrzebowania na biosensory wykonane techniką drukowania oraz rozwojem technologii układów pomiarowych umożliwiających akwizycję, przetwarzanie i transmisję danych pomiarowych pochodzących z takich czujników.

Rozwój technologii czujnikowych umożliwia poszerzenie zakresu pomiarowego wielkości elektrycznych. Przykładem jest rozwój nanoczujników, który pozwolił na rozszerzenie zakresu pomiarowego wielkości elektrycznych do nanoskali. Również integracja metrologii elektrycznej z innymi dziedzinami, takimi jak metrologia kwantowa, otwiera nowe możliwości pomiaru wielkości elektrycznych. Metrologia kwantowa wykorzystuje zasady mechaniki kwantowej, aby umożliwić pomiary wykraczające poza granice pomiarów klasycznych.

Istotnym czynnikiem stymulującym rozwój technologii czujników i metod pomiarowych, również w zakresie pomiarów elektrycznych jest branża *automotive*. W szczególności rozwój pojazdów autonomicznych oraz wynikająca stąd konieczność równoczesnego pomiaru i przetwarzania wielu wielkości jest wyzwaniem przyczyniającym się do rozwoju metrologii. Obok pomiaru klasycznych parametrów opisujących ruch pojazdu, takich jak: prędkość i przyspieszenie liniowe, prędkość i przyspieszenie kątowe, następuje ciągły rozwój metod pozwalających ilościowo opisać warunki ruchu pojazdu autonomicznego oraz parametry zmieniającego się środowiska, w jakim taki pojazd się porusza. Rozwiązanie problemu zapewnienia bezpiecznej trajektorii i parametrów ruchu pojazdu autonomicznego wymusiło rozwój wizyjnych, radarowych i lidarowych technik pomiarowych. Przykładowymi parametrami będącymi przedmiotem pomiaru są śledzenie położenia pojazdu względem pasa ruchu, odległość od pojazdu poprzedzającego, śledzenie pojazdów poruszających się sąsiednimi pasami, rozpoznawanie obiektów nieruchomych w otoczeniu pojazdu, rozpoznawanie znaków drogowych, rozpoznawanie i śledzenie ruchu pieszych w otoczeniu pojazdu, śledzenie przebiegu drogi, monitorowanie warunków pogodowych, pomiar parametrów niezbędnych dla autonomicznego parkowania pojazdu. Istotną grupę mierzonych parametrów tworzą parametry opisujące zachowania kierowcy (w przypadku pojazdów autonomicznych niższego poziomu, w których systemy pomiarowe jedynie wspomagają kierowcę w podejmowaniu decyzji).

Ważną rolę w pojazdach autonomicznych odgrywają systemy percepcyjne [6]. Ich podstawowymi elementami są czujniki wizyjne: kamery jednosoczewkowe pracujące w systemie 2D lub dwusoczewkowe pracujące w systemie 3D, radary oraz lidary wykorzystujące promieniowanie laserowe. Stosowane są również kamery termowizyjne pozwalające na generowanie map termicznych otoczenia pojazdu. Są to jednak rozwiązania drogie, a rozdzielczość mapy termicznej jest mniejsza w porównaniu z obrazem RGB generowanym przez tradycyjną kamerę.

Lokalizacja pojazdu jest określana na podstawie danych z systemu GNSS (ang. *Global Navigation Satellite Systems*). Dane pomiarowe pozyskane z tego systemu są podstawą do planowania trasy pojazdu. Dokładność określenia lokalizacji pojazdu wynosi ok. 1 m. Główną przyczyną ograniczającą dokładność jest wpływ atmosfery ziemskiej.

Błąd ten można wyeliminować, jeżeli nieruchomy odbiornik GNSS zostanie ustawiony w punkcie o znanych współrzędnych (stacja referencyjna). Przez porównanie wyniku pomiaru odległości odbiornika GNSS od satelity z odległością wyliczoną teoretycznie na podstawie znajomości orbity satelity i współrzędnych lokalizacji odbiornika GNSS można określić poprawkę korygującą błąd pomiaru GNSS. Taki system jest znany pod nazwą RTK (ang. *Real-Time Kinematic*). Wyliczana poprawka jest wysyłana drogą radiową lub z wykorzystaniem transmisji GSM ze stacji referencyjnej do odbiornika zainstalowanego w pojeździe. Rozwiązanie to pozwala zmniejszyć błąd lokalizacji do pojedynczych centymetrów.

Systemy GPS-RTK mogą być uzupełnione o czujnik IMU, który integruje akcelerometr, żyroskop i magnetometr. Czujnik IMU pozwala zmierzyć przyspieszenie pojazdu, położenie katowe i prędkość katową.

W pracy Leona Prochowskiego i in. [6] przedstawiony został przegląd pomiarowego wyposażenia pojazdów autonomicznych. Zwrócono również uwagę na istotny czynnik stymulujący rozwój metrologii, jakim jest oprzyrządowanie pomiarowe konieczne w procesach testowania poszczególnych podzespołów w pojazdach autonomicznych. Przebieg każdej procedury testującej musi zostać szczegółowo zarejestrowany w celu dalszej analizy zgromadzonych danych pomiarowych. Przedmiotem rejestracji są zarówno czasowe przebiegi sygnałów, jak również wartości liczbowe mierzonych wielkości.

Pojazdy autonomiczne to oczywiście nie tylko samochody i transport drogowy. Technologia ta znalazła również zastosowanie w pojazdach latających oraz w pojazdach rolniczych [7]. Należy spodziewać się rozwoju czujników monitorujących otoczenie pojazdu i położenie oraz zachowanie innych uczestników ruchu. Rozwój ten będzie następował w kierunku zwiększenia dokładności pomiaru, obniżenia granic wykrywalności, zwiększenia odporności czujników na czynniki zakłócające (inteligentna infrastruktura drogowa, warunki środowiskowe, wibracje itp.), zwiększenia niezawodności ich działania, obniżenia ich ceny oraz obniżenia energochłonności. Będzie się dążyć do wyposażenia czujników i układów pomiarowych w funkcjonalności autodiagnostyki i autokalibracji. Należy się również spodziewać rozwoju algorytmów przetwarzania danych pomiarowych z tych czujników, a szczególnie algorytmów inteligentnych, których zadaniem będzie dalsze podniesienie dokładności pomiaru i skorygowanie ograniczonych właściwości

stosowanych czujników i układów pomiarowych. Rozwijane będą i stosowane na szerszą skalę algorytmy fuzji danych. Stosowane będą różne techniki fuzji: komplementarna, redundantna i kooperatywna, realizowane zarówno na poziomie czujników, cech, jak i decyzji.

Równocześnie następuje rozwój metod diagnostyki systemów autonomicznych, metodologii testów oraz ich oprzyrządowania pomiarowego. Ten kierunek rozwoju będzie kontynuowany. Ze względu na niezwykle dużą liczbę możliwych scenariuszy przebiegu jazdy autonomicznej, eksperymentalne przeprowadzenie testów z uwzględnieniem tej różnorodności, jest praktycznie niemożliwe. Istotnym uzupełnieniem badań eksperymentalnych wydają się więc być badania symulacyjne, realizowane jako symulacja fizyczna warunków jazdy lub/i testy wirtualne. Rozwój tych metod testowania pojazdów autonomicznych wywoła konieczność rozwoju symulacyjnych modeli czujników i układów pomiarowych, budowanych na wysokim poziomie dokładności i odzwierciedlających ich zachowanie we wszystkich okolicznościach, jakie mogą wystąpić w rzeczywistości. Będzie to wymagać wirtualnego odtworzenia możliwych scenariuszy poruszania się pojazdu autonomicznego, a równocześnie zdefiniowania granicznych scenariuszy, w których systemy autonomiczne gwarantują akceptowalny poziom bezpieczeństwa uczestników ruchu.

Ze względu na międzynarodowy charakter transportu zarówno drogowego, jak również lotniczego, konieczne wydaje się również opracowanie zunifikowanych metod i kryteriów testowania systemów autonomicznych oraz systemów wspomagających kierowcę.

3.4. Transport i mobilność

Sektor transportu odpowiada za 23 % emisji CO₂ w UE i w 92 % swojego zapotrzebowania na energię wykorzystuje ropę naftową [4]. Uznaje się, że aby UE mogła osiągnąć zerową emisję gazów cieplarnianych do 2050 r. i znaczną redukcję innych substancji zanieczyszczających powietrze, konieczne jest zintensyfikowanie badań naukowych powiązanych ściśle ze wszystkimi rodzajami transportu. W odniesieniu do transportu drogowego działania badawczo-innowacyjne powinny przyczynić się do transformacji w kierunku mobilności zeroemisyjnej.

Również transport kolejowy powinien ulegać transformacji w kierunku neutralności klimatycznej, automatyzacji i cyfryzacji. Prace badawcze w zakresie transportu lotniczego powinny doprowadzić do opracowania technologii lotniczych umożliwiających jego dekarbonizację, ograniczenie wszelkich szkodliwych wpływów lotnictwa, w tym hałasu i emisji substancji zanieczyszczających powietrze.

W transporcie wodnym badania naukowe przyczynią się do rozwoju rozwiązań o zerowej emisji w sektorze żeglugi, poprawią wydajność tego systemu, udoskonalą technologie cyfrowe, w tym rozwiązania nawigacji satelitarnej oraz przyczynią się do wzrostu konkurencyjności tej modalności transportu.

Spodziewane zmiany w transporcie będą prowadzić przede wszystkim do utrzymania konkurencyjności europejskiej branży transportowej oraz transformacji transportu w kierunku bezpiecznego, neutralnego dla klimatu transportu pasażerskiego i towarowego.

Perspektywy rozwoju metrologii w obszarze transportu zostaną omówione tylko w odniesieniu do wybranych zagadnień, którymi są: systemy automatycznego monitorowania masy pojazdów samochodowych oraz zarządzanie ruchem drogowym. Szczegółowe omówienie wszystkich aspektów dotyczących transformacji systemów transportowych oraz mobilności obywateli, a także przedstawienie w tym kontekście perspektyw rozwoju metrologii, w znacznym stopniu przekroczyłoby ramy tego opracowania.

3.4.1. Systemy dynamicznego ważenia pojazdów (WIM)

Transport drogowy jest jedną z gałęzi gospodarki, która stawia metrologii szczególne wyzwania. Wymagane jest metrologiczne zabezpieczenie systemów chroniących infrastrukturę drogową przed nadmiernym niszczeniem oraz systemów zarządzania i systemów zapewnienia bezpieczeństwa wszystkim uczestnikom ruchu drogowego. Zapewnienie poprawnego działania wszystkich tych systemów jest uwarunkowane pozyskaniem wiarygodnych, dostępnych w czasie rzeczywistym danych pomiarowych.

Zabezpieczenie infrastruktury drogowej (drogi, mosty) wiąże się z kontrolą masy pojazdów samochodowych oraz nacisku, jakie ich osie wywierają na podłoże. Trzeba jednak podkreślić, że kontrola masy pojazdów samochodowych ma również inne cele. Są nimi, w równej

mierze co ochrona infrastruktury drogowej, dbałość o ochronę środowiska naturalnego, poprawa bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz zapewnienie warunków uczciwej konkurencji w transporcie drogowym.

Obserwowany obecnie rozwój systemów WIM (*weigh-in-motion*) jest przede wszystkim związany z dążeniem do administracyjnego wykorzystania tych systemów, w celu bezpośredniego egzekwowania obowiązujących przepisów. Konieczność ochrony infrastruktury drogowej i środowiska naturalnego, zapewnienia bezpieczeństwa uczestników ruchu drogowego i warunków uczciwej konkurencji w transporcie drogowym nakłada na zarządców dróg obowiązek kontroli masy pojazdów samochodowych. Obowiązek ten jest realizowany przez specjalistyczne służby. Efektywność tego działania jest jednak ograniczona w istotnym stopniu z powodu wykorzystywania wag statycznych lub wolnoprzejazdowych oraz „ręcznej” realizacji procedury ważenia pojazdów. Rozwój techniki i technologii przyrządów pomiarowych stosowanych do kontroli masy pojazdów umożliwia zastosowanie w warunkach drogowych systemów *weigh-in-motion*, pracujących w trybie *direct mass enforcement*. Takie systemy są nazywane administracyjnymi systemami WIM. W wielu krajach prowadzone są prace mające na celu wdrożenie systemów administracyjnych. Wymaga to jednak rozwiązania szeregu problemów. Dlatego obecnie systemy WIM pracują głównie jako systemy preselekcyjne, wspomagające ważenie statyczne pojazdów. Podstawowym problemem, który wymaga rozwiązania jest minimalizacja prawdopodobieństwa błędów, jakie mogą być popełnione podczas kontroli masy pojazdów. Możliwe jest popełnienie dwóch rodzajów błędów. Błąd pierwszego rodzaju polega na tym, że pojazd, który w rzeczywistości jest przeciążony, nie zostanie wyeliminowany z ruchu. Powoduje to ograniczenie efektywności procesu kontroli. Błąd drugiego rodzaju oznacza, że pojazd normatywny zostanie uznany za przeciążony. Wydaje się, że ze społecznego punktu widzenia błąd drugiego rodzaju jest krytyczny, gdyż w jego konsekwencji zostają podjęte działania administracyjne, mające na celu ukaranie przewoźnika lub załadowcy. Taka kara byłaby w rażącej sprzeczności ze społecznym poczuciem sprawiedliwości.

Minimalizacja prawdopodobieństwa wystąpienia błędu drugiego rodzaju jest możliwa tylko poprzez zapewnienie stabilności dokładności ważenia w systemach WIM. Ze względu na wpływ wielu czynników zewnętrznych na dokładność tych systemów, zapewnienie stabilności

tej dokładności, szczególnie w dłuższym okresie eksploatacji systemu, nie jest zagadnieniem łatwym. Poszukiwanie rozwiązania tego problemu będzie wytyczać kierunki badań i rozwoju systemów WIM w najbliższych latach.

Zagadnienie pomiaru masy pojazdów samochodowych jest opisywane w wielu publikacjach. Można w nich znaleźć szerokie omówienie podstawowych zagadnień składających się na problem ogólnie nazywany dynamicznym ważeniem pojazdów. Do zagadnień tych należą: budowa i eksploatacja systemów WIM instalowanych zarówno w pasach ruchu, jak również w strukturze mostów i wiaduktów, rozwój technologii czujników nacisku wykorzystywanych w systemach WIM, kalibracja systemów WIM oraz algorytmy analizy danych pochodzących z systemów WIM, ilościowa analiza wpływu czynników ograniczających dokładność pomiaru w systemach WIM, badania prowadzone w kierunku rozwoju technologii WIM, analiza efektywności kosztowej takich systemów, a także praktyka wykorzystania systemów WIM [8].

Z punktu widzenia celu niniejszego opracowania zostaną przedstawione jedynie wybrane zagadnienia z tej listy. W szczególności dla perspektyw rozwoju metrologii elektrycznej istotne są takie zagadnienia jak: rozwój technologii czujników nacisku wykorzystywanych w systemach WIM, kalibracja systemów WIM, algorytmy analizy danych pochodzących z systemów WIM oraz ilościowa analiza wpływu czynników ograniczających dokładność pomiaru w systemach WIM.

Rozwój technologii czujników nacisku wykorzystywanych w systemach WIM

Ze względu na miejsce instalacji systemu WIM wyróżnia się systemy mostowe oraz systemy instalowane w nawierzchni pasa ruchu. Obydwa rozwiązania różnią się zarówno technologią zastosowanych czujników, jak również algorytmami przetwarzania danych pomiarowych, których celem jest estymacja masy całkowitej pojazdu oraz nacisku statycznego jego osi.

W systemach mostowych (B-WIM) stosowane są światłowodowe lub tensometryczne czujniki siły instalowane w wybranych punktach konstrukcji mostu [9]. Przedmiotem bezpośredniego pomiaru są siły poprzeczne występujące w pobliżu podpór mostów. Dodatkowo mierzony jest rozstaw osi ważonego pojazdu, gdyż ten parametr ma wpływ na powiązanie zmierzonych wartości sił z naciskiem osi.

Idea pomiaru nacisku osi w systemach WIM instalowanych w pasie drogi jest odmienna. Czujniki nacisku liniowe lub płytowe są instalowane prostopadłe do kierunku ruchu pojazdów, w taki sposób, aby koła każdej osi ważonego pojazdu przetaczały się przez czujnik nacisku. Czujnik obejmuje całą szerokość pasa ruchu. Przedmiotem bezpośredniego pomiaru jest chwilowy nacisk wywierany na czujnik przez wszystkie koła danej osi. Tak zmierzona wartość nacisku jest interpretowana jako jedna próbka zmiennego w czasie sygnału nacisku, który zawiera zarówno składową stałą (nacisk statyczny) oraz składową zmienną (nacisk dynamiczny). Stosowane algorytmy przetwarzania pozwalają estymować nacisk statyczny, równocześnie tłumiąc zakłócający wpływ nacisku dynamicznego.

Obecnie najczęściej stosowane są czujniki polimerowe wykorzystujące efekt piezoelektryczny, kwarcowe również wykorzystujące ten efekt oferowane przez firmę Kistler, płytowe czujniki tensometryczne firmy PAT oraz czujniki pojemnościowe [10]. Stosowane są również czujniki liniowe oferowane przez firmę Intercomp [11]. Czujniki liniowe firmy Intercomp są zbudowane z wykorzystaniem technologii tensometrycznej i zapewniają dokładne pomiary masy pojazdu przy prędkości do 130 km/h. Tensometryczny czujnik firmy Intercomp posiada certyfikat OIML określający osiągalną dokładność ważenia do 5 % w odniesieniu do pomiaru masy całkowitej pojazdów ciężkich, poruszających się z prędkością autostradową.

Do użycia wchodzi również czujniki światłowodowe oferowane przez firmę Cross [12], pod nazwą OptiWIM®. Jest to nowy czujnik wykorzystujący proces pomiarowy oparty na detekcji zmian w propagacji światła w zaciśniętym światłowodzie. Zgodnie z informacją producenta zastosowane rozwiązanie pozwala na dokładny pomiar masy pojazdów na całej szerokości drogi, niezależnie od położenia kół podczas przetaczania się przez czujnik. Dodatkowo umożliwia on detekcję kół podwójnych, opon, w których panuje niskie ciśnienie oraz bezpośredni pomiar rozstawu kół danej osi. Czujnik jest wyposażony w wewnętrzny układ kompensacji temperaturowej.

Firma Kistler oferuje cyfrowe czujniki WIM, występujące pod nazwą KiTraffic Digital [13]. Zgodnie z informacją zawartą na stronie producenta czujnik KiTraffic Digital zapewnia dokładność ważenia na poziomie 1 % w warunkach testów laboratoryjnych, 2 % przy pomiarze masy całkowitej w idealnych warunkach drogowych oraz 5 %

masy całkowitej w rzeczywistych warunkach drogowych. Czujnik umożliwia lokalizację miejsca nacisku koła na czujnik oraz wykrycie kół z niskim ciśnieniem. Poprawny wynik ważenia może być uzyskany również w przypadku zmiany pasa ruchu przez ważony pojazd.

W związku z dążeniem do zwiększenia dokładności ważenia pojazdów w systemach WIM należy się spodziewać również rozwoju technologii czujników nacisku przeznaczonych do takich systemów. Podstawowym kierunkiem tego rozwoju będzie poszukiwanie rozwiązań odpornych na oddziaływanie czynników środowiskowych oraz czynników definiujących warunki pomiaru. Pierwszoplanowymi czynnikami należącymi do wskazanych grup są temperatura oraz prędkość ważonego pojazdu.

Kalibracja systemów WIM

W procesie kalibracji systemów WIM najczęściej stosowaną metodą jest wykorzystanie pojazdów wstępnie zważonych, które pełnią rolę wzorca. Wiąże się to z wykorzystaniem pojazdów ciężarowych należących do wybranych klas, o znanej masie całkowitej pojazdu i nacisku statycznym na każdą oś. Pojazdy te wielokrotnie przejeżdżają przez stanowisko ważące kalibrowanego systemu WIM. Wartości referencyjne masy całkowitej pojazdu i nacisku na osie wyznaczane są na dokładnych wagach statycznych lub wagach LS-WIM (*Low-Speed WIM*), posiadających świadectwo legalizacji. Porównanie wartości referencyjnych z wynikami uzyskanymi z kalibrowanego systemu WIM pozwala na określenie błędów ważenia i jest podstawą adjustacji systemu WIM. Opisano przykładowy scenariusz wdrożenia takiej procedury [14]. Podstawową wadą tej metody jest to, że nie pozwala ona na ciągłe monitorowanie dokładności systemu WIM, która ulega zmianie pod wpływem zmiennych warunków eksploatacji systemu. Jest to metoda kosztowna, czasochłonna i wymaga dysponowania rozbudowaną infrastrukturą pomiarową (waga platformowa, waga wolnoprzejazdowa).

Alternatywnym rozwiązaniem jest metoda pojazdów charakterystycznych, która nie jest obciążona wadami metody pojazdów wstępnie zważonych. Umożliwia ona ciągłą kontrolę dokładności systemu WIM. Metoda opiera się na wykorzystaniu pojazdów ciężarowych, wybranych z normalnego ruchu drogowego. W wyniku przeprowadzonych badań wykazano, że klasa samochodów ciężarowych 5-osiowych

o ściśle określonej konstrukcji (liczba i rozstaw osi) charakteryzuje się stabilnym naciskiem statycznym na pierwszą oś. Obciążenie tej osi jest słabo skorelowane z masą całkowitą pojazdu i charakteryzuje się małą zmiennością. Dlatego nacisk statyczny tej osi może służyć jako wartość referencyjna. Ze względu na różne rozwiązania konstrukcyjne pojazdów poruszających się po drogach w różnych krajach, określenie pojazdu charakterystycznego, wybór wielkości wzorcowej oraz określenie wartości referencyjnej powinno zostać przeprowadzone z uwzględnieniem tej specyfiki. Dodatkowy warunek, jaki muszą spełniać pojazdy charakterystyczne, to ich znaczący udział w strukturze ruchu, tak aby zapewnić ciągłe monitorowanie dokładności systemu WIM. Zdefiniowanie tak rozumianej wielkości wzorcowej i określenie jej wartości referencyjnej jest realizowane w dwóch etapach. Etap I to analiza zbiorów danych z różnych lokalizacji systemów WIM. Jego celem jest określenie struktury ruchu oraz wyodrębnienie klasy charakterystycznych pojazdów. W Polsce rolę pojazdów charakterystycznych mogą pełnić samochody ciężarowe klasy 2-osiowy ciągnik + 3-osiowa naczepa. W etapie II przeprowadzana jest analiza wyników ważenia wyodrębnionych pojazdów charakterystycznych na dokładnych wagach statycznych i wolnoprzejazdowych. Efektem tego etapu jest określenie wartości referencyjnej. Idea praktycznej realizacji metody pojazdów charakterystycznych jest prosta. System WIM, który z natury posiada funkcjonalność zliczania osi ważonego pojazdu oraz pomiaru ich wzajemnych odległości, wykrywa przejazd każdego pojazdu charakterystycznego. Wynik pomiaru nacisku jego pierwszej osi jest porównywany z wartością referencyjną wyznaczoną w etapie II. Ich różnica jest miarą dokładności systemu. Ze względu na losową zmienność wyników pomiarowych celowe jest uśrednienie wyników uzyskanych dla kilku lub kilkunastu pojazdów charakterystycznych.

Metoda pojazdów charakterystycznych w naturalny sposób prowadzi do metody autokalibracji systemów WIM. Metodę tę po raz pierwszy zaproponowano w 1999 r. [15], jednak jej rozwój oraz praktyczne zastosowanie miało miejsce kilkanaście lat później [16, 17]. Autokalibracja systemu WIM polega na dostrojeniu nachylenia charakterystyki statycznej układu (wzmocnienia) w taki sposób, aby uzyskać prawidłowy wynik pomiaru wielkości referencyjnej.

Ilościowa analiza wpływu czynników ograniczających dokładność pomiaru w systemach WIM

Systemy dynamicznego ważenia pojazdów samochodowych (systemy *weigh-in-motion*) stanowią specyficzny rodzaj systemów pomiarowych [18]. Ich specyfika wynika z faktu zainstalowania czujników nacisku w nawierzchni drogi. W efekcie, ten fragment nawierzchni staje się elementem systemu pomiarowego, mającym istotny wpływ na jego właściwości metrologiczne. Wynik ważenia pojazdów uzależniony jest od wielu czynników, do których należą: czynniki środowiskowe (w pierwszym rzędzie temperatura), czynniki związane z pojazdem (liczba i konfiguracja osi, prędkość i sposób przejazdu przez stanowisko ważące, rodzaj i stan zawieszenia) oraz czynniki związane z samym systemem WIM (liczba i technologia wykonania czujników nacisku, częstotliwość kalibracji, jakość i rodzaj nawierzchni, w której zostały zamontowane te czujniki) [19].

Badanie właściwości metrologicznych, w tym dokładności systemu WIM jest trudne ze względu na brak wzorca nacisku osi, brak możliwości przeprowadzenia kalibracji statycznej (w przypadku większości stosowanych czujników nacisku), czy też brak możliwości sterowania natężeniem czynników środowiskowych wpływających na wynik ważenia. Stała kontrola dokładności systemów WIM jest natomiast konieczna, szczególnie w kontekście ich zastosowania w systemach *direct mass enforcement*. Z tych powodów ciągle poszukuje się nowych eksperymentalnych metod oceny dokładności takich systemów. Jednym z możliwych rozwiązań jest opisana powyżej metoda pojazdów charakterystycznych.

Rozwój algorytmów analizy danych pochodzących z systemów WIM

Ze względu na opisany powyżej wpływ wielu czynników zewnętrznych na dokładność systemów WIM, zapewnienie stabilności tej dokładności, szczególnie w dłuższym okresie eksploatacji systemu, nie jest zagadnieniem łatwym, o ile w ogóle możliwym do rozwiązania. Poszukiwane są więc rozwiązania, których celem nie jest stabilizacja warunków, w jakich jest eksploatowany system WIM i poprzez to stabilizacja jego dokładności, ale zabezpieczenie się przed skutkami zmienności tej dokładności. Dzięki takim rozwiązaniom minimalizowane jest prawdopodobieństwo wystąpienia, wspomnianego wcześniej,

błędu drugiego rodzaju, tj. zakwalifikowania pojazdu normatywnego jako przeciążony.

Jednym z takich rozwiązań jest koncepcja map dokładności [20]. Pod pojęciem mapy dokładności systemu WIM rozumiany jest obszar wyznaczony w wielowymiarowej przestrzeni czynników wpływających na wyniki ważenia pojazdów (temperatura, prędkość, wiatr, opady atmosferyczne, oblodzenie itp.). Wewnątrz tego obszaru błąd ważenia nie przekracza wartości przyjętej jako dopuszczalna dla ważenia pojazdów. Innymi słowy, mapa dokładności wyznacza dopuszczalne przedziały zmienności czynników wpływowych, dla których błąd ważenia pojazdów ma wartości akceptowalne.

Podjęmowane są również działania o charakterze sprzętowym (w zakresie struktury i konfiguracji czujników instalowanych na stanowisku WIM), których celem jest również minimalizacja prawdopodobieństwa nieuzasadnionego nałożenia kary administracyjnej [21, 22].

Opracowane zostały również liczne dokumenty mające charakter legislacyjny [23, 24, 25, 26]. Zostały one przygotowane przez Narodowe Instytuty Metrologiczne (NMI) w różnych krajach. Celem dokumentów jest umożliwienie metrologicznej legalizacji systemów WIM, pracujących w trybie *direct mass enforcement*, czyli administracyjnych systemów WIM. Liczny zbiór krajów wprowadzających takie uregulowania wskazuje na dużą wagę problemu ciągłej i efektywnej kontroli masy pojazdów samochodowych.

W najbliższych latach należy spodziewać się kontynuacji opisanych powyżej prac badawczych i realizacji opisanych kierunków rozwoju konstrukcji systemów WIM, aż do osiągnięcia wyznaczonego celu, tj. wprowadzenia do powszechnego stosowania systemów WIM pracujących w trybie administracyjnym. Nacisk będzie położony przede wszystkim na rozwój technologii czujników oraz algorytmów przetwarzania danych pomiarowych. Prace w tym kierunku są prowadzone również w Polsce we współpracy pomiędzy Głównym Urzędem Miar oraz uczelniami technicznymi.

3.4.2. Zarządzanie ruchem drogowym

Jednym z wielu obszarów, w którym metrologia odgrywa kluczową rolę, są systemy zarządzania ruchem drogowym. Do głównych zadań metrologii jest zapewnienie pomiaru różnych parametrów związanych

z przepływem pojazdów: prędkość, liczba, klasyfikacja, odległość pomiędzy pojazdami, gęstość ruchu, masa i nacisk osi, przepływ ładunku, parametry środowiskowe w otoczeniu szlaków komunikacyjnych, stan nawierzchni itd. W celu pomiaru wymienionych wielkości i zapewnienia wymaganej dokładności stosowane są różne czujniki oraz współpracujące z nimi układy pomiarowe. Dla przykładu pomiar przepływu pojazdów odbywa się za pomocą indukcyjnych czujników pętlowych zainstalowanych w nawierzchni drogi. Mają one różny kształt i wymiary. Ich zadaniem jest wykrywanie obecności pojazdów, a niekiedy zliczanie osi oraz klasyfikacja pojazdów na podstawie ich profilu magnetycznego. Kierunkiem rozwoju w tym obszarze jest jednak stosowanie systemów obrazowania (kamery), systemów radarowych oraz lidarowych. Technologie te służą do nieinwazyjnego pomiaru prędkości pojazdów i natężenia ruchu. Systemy obrazowe są często wykorzystywane również do odczytu numerów rejestracyjnych. Ich poprawne działanie wymaga ciągłej konserwacji, kontroli właściwości metrologicznych i adjustacji. Pewnym ograniczeniem są trudne warunki pogodowe oraz oświetleniowe (kamery). Pomiar prędkości jest przede wszystkim realizowany za pomocą fotoradarów. Następuje jednak upowszechnienie stosowania odcinkowego pomiaru prędkości. Rozwiązanie to posiada istotne zalety w porównaniu z fotoradarami (pomiar prędkości średniej na długim odcinku drogi, a nie pomiar punktowy, w lepszym stopniu dyscyplinują kierowców), jednak wzorcowanie takich systemów nie jest proste pod względem technicznym, ale również w związku z ograniczeniami o charakterze formalnym. Coraz szersze zastosowanie znajdują drony, wykorzystywane nie tylko do kontroli prędkości pojazdów, ale również monitorowania innych wykroczeń uczestników ruchu drogowego, związanych z łamaniem obowiązujących przepisów. Wykorzystanie wyników pomiarowych do egzekwowania obowiązującego prawa drogowego wymaga rejestracji zarówno ewentualnego wykroczenia, jak również jednoznacznej identyfikacji pojazdu oraz kierowcy. W tym celu są wykorzystywane różnego rodzaju kamery. Ich regularna konserwacja i wzorcowanie są podstawowymi warunkami uzyskania wiarygodnych wyników. Szybki rozwój następuje w obszarze radarów ręcznych (pistolety radarowe). Do użytku zostały wprowadzone radary mikrofalowe oraz radary laserowe, umożliwiające dokładne wskazanie pojazdu, którego prędkość jest mierzona oraz pozwalające na automatyczne dokumentowanie wykroczenia. Ważnym elementem infrastruktury drogowej, zapewniającym

bezpieczeństwo jego uczestnikom, jest sygnalizacja drogowa. Główne zadania metrologii w tym obszarze wiążą się z optymalizacją i wzorcowaniem synchronizacji sygnalizacji świetlnej w celu poprawy płynności ruchu i zmniejszenia zatorów. Stosowane są do tego adaptacyjne systemy sygnalizacji drogowej. Ich działanie wymaga wykrywania pojazdów oraz pomiaru długości kolejki pojazdów oczekujących na przejazd. Jest to realizowane w systemach obrazowania lub z wykorzystaniem pętli indukcyjnych. Dostosowanie długości cyklu przełączania światła drogowych odbywa się na podstawie wyników pomiaru parametrów charakteryzujących warunki ruchu drogowego w czasie rzeczywistym (systemy adaptacyjne). Inteligentne systemy transportowe (ITS) wymagają integracji danych pomiarowych pochodzących z różnych systemów i precyzyjnej synchronizacji tych danych w czasie. Stosowane rozwiązania metrologiczne zapewniają, że dane zebrane z różnych czujników i systemów (takich jak: GPS, kamery i detektory) są dokładne i zintegrowane, co zapewnia uzyskanie kompleksowego obrazu warunków ruchu drogowego. Transport drogowy ma zasięg międzynarodowy, dlatego konieczne jest opracowanie norm międzynarodowych obowiązujących w zakresie metrologicznego zabezpieczenia ruchu drogowego. Niezbędne jest więc przestrzeganie krajowych i międzynarodowych norm dotyczących systemów zarządzania ruchem. Metrologia gwarantuje, że stosowane systemy spełniają te normy, zapewniając spójność i interoperacyjność danych pomiarowych.

3.5. Elektroenergetyka

Na zaproszenie autora tego opracowania, swoją opinię dotyczącą rozwoju metrologii, widzianą z perspektywy współczesnych systemów elektroenergetycznych przedstawił Prof. Zbigniew Hanzelka z Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej). Została ona przedstawiona poniżej z niewielkimi tylko zmianami o charakterze redakcyjnym, wprowadzonymi przez autora niniejszego opracowania.

Konsekwencją postępującego rozwoju rozproszonych źródeł energii (RZE) i sieci typu *smart* jest wzrost liczby danych pozyskiwanych z różnych przyrządów, np.: liczników AMI (ang. *advanced metering infrastructure*), falowników, rejestratorów jakościowych, przekazników,

sterowników, układów energoelektronicznych, detektorów meteorologicznych itp. Taka jest rzeczywistość współczesnej elektroenergetyki. Jednak rosnące zbiory danych nie przekładają się w wystarczającym stopniu na wzrost informacji o systemie i wzrost jego obserwowalności. Problemem staje się nie co zmierzyć, lecz jak wykorzystać wyniki pomiaru. Widać to wyraźnie, gdy obserwujemy brak pomysłów, jak wykorzystać, szerzej niż tylko dla potrzeb automatyki zabezpieczeniowej i badania stabilności w sieciach NN/WN, dane z PMU (ang. *phasor measurement unit*). Problemem staje się nie tylko ich archiwizowanie, lecz przede wszystkim przetwarzanie oraz trudność w znalezieniu użytecznej i wartościowej informacji, bez potrzeby gromadzenia wszystkich danych i bez konieczności ich przeszukiwania, przy podejmowaniu każdej próby ich wykorzystania. Istnieje pilna potrzeba rozwijania zdalnych metod analizy. Jeżeli to nie nastąpi rosnące bazy danych mogą stać się barierą dla dalszego rozwoju sprzętu pomiarowego i jego aplikacji.

W swojej opinii Profesor Z. Hanzelka wskazał kilka kierunków rozwoju systemów elektroenergetycznych i na tym tle sformułował zadania, jakie ten spodziewany albo następujący rozwój stawia przed metrologią. Są to:

- rozwój i integracja inteligentnych sieci elektroenergetycznych i technologii umożliwiających rozproszoną generację, elektryfikację transportu oraz dynamiczne reagowanie na zapotrzebowanie ze strony popytowej,
- zwiększenie wydajności dużych elektrowni poprzez poprawę zabezpieczenia metrologicznego procesów monitorowania i kontroli krytycznych parametrów,
- opracowanie narzędzi metrologicznych niezbędnych do poprawy i pomiaru sprawności obecnych urządzeń fotowoltaicznych oraz w celu umożliwienia produkcji ogniw słonecznych nowej generacji,
- rozwój infrastruktury metrologicznej wymaganej dla pomyślnego wdrożenia inteligentnych sieci elektrycznych i linii przesyłowych wysokiego napięcia DC, aby sprostać rosnącej decentralizacji wytwarzania energii i potrzebie niskostratnego przesyłania energii elektrycznej na duże odległości,
- przeciwdziałanie utracie stabilności sieci elektroenergetycznych i zapewnienie zarówno bezpieczeństwa, jak i jakości dostaw energii elektrycznej, w warunkach ograniczonej przewidywalności w dobowych, a nawet krótkookresowych wahaniach OZE,

w połączeniu z dużą liczbą nowych obciążeń, takich jak np. pojazdy elektryczne,

- opracowanie nowych narzędzi do monitorowania w czasie rzeczywistym i kontroli parametrów sieci, takich jak: lokalizacja źródła/przyczyny pogorszenia jakości energii lub niestabilności sieci,
- opracowanie specjalnego oprzyrządowania do monitorowania i optymalizacji wykorzystania energii z użyciem zaawansowanej technologii pomiaru energii, takiej jak inteligentne liczniki energii.

Rozwój i integracja inteligentnych sieci elektroenergetycznych i technologii umożliwiających rozproszoną generację, elektryfikację transportu oraz dynamiczne reagowanie na zapotrzebowanie ze strony popytowej

Rozwój inteligentnych sieci elektroenergetycznych będzie jednym z wielu czynników stymulujących rozwój w obszarze metrologii. Wynikające stąd potrzeby dobrze ilustruje cytat:

W polskich warunkach słabością jest również niewystarczający poziom obserwowalności sieci elektroenergetycznych, tzn. monitorowanie ich stanu, szczególnie »w głębi sieci« i na niższych poziomach napięć. W ramach prowadzenia ruchu sieci operatorzy pozyskują dane pomiarowe z układów sterowania stacjami WN/SN lub z niektórych urządzeń znajdujących się w głębi sieci SN. Sieć nN jest słabo opomiarowana. Dane są dostępne w systemach SCADA OSD. Ich charakter oraz źródła są różne oraz ściśle związane ze zbiorem podstawowych funkcjonalności narzędzi informatycznych oraz elementów wykonawczych, stosowanych do zarządzania przepływami energii. Nie służą one do rozliczeń, lecz do monitorowania stanu i prowadzenia ruchu sieci. Wraz ze wzrostem liczby rozproszonych zasobów energetycznych oraz urządzeń przynależnych do platformy technologicznej smart grid będzie znacząco rosła liczba i rodzaj danych, skróceniu ulegnie wymagany okres ich agregacji oraz czas dostępu, w granicznym przypadku dane będą musiały być dostępne w czasie prawie rzeczywistym. Spełnienie tych oczekiwań, w dużym stopniu w sieciach nN, to czynnik warunkujący rozwój sieci typu smart i upowszechnienie ER (Energetyki Rozproszonej)[27].

Rozwój energetyki rozproszonej (ER) jest uwarunkowany wyposażeniem sieci elektroenergetycznej w urządzenia pomiarowe (liczniki)

zapewniające bezzwłoczny dostęp do danych pomiarowych oraz wykorzystujące różne technologie komunikacyjne: „Osobnym zagadnieniem są układy pomiarowe służące do rozliczeń. W Polsce rozpoczyna się proces masowej instalacji liczników zdalnego odczytu AMI (*Advanced Metering Infrastructure*), realizujących agregację w okresach 15 min. Jego ewentualne spowolnienie stanowi istotne zagrożenie dla rozwoju energetyki rozproszonej. Równie istotny jest bezzwłoczny dostęp do danych, najlepiej z liczników wykorzystujących różne technologie komunikacyjne. To warunek rozwoju usług świadczonych przez nowych graczy na rynku energii (w tym klastry energii i spółdzielnie energetyczne) oraz wzrostu elastyczności sieci. W wielu przypadkach potrzebne będą dane agregowane w krótszych okresach (np. sekund) w celu kształtowania pożądanych profili przepływów energii i sterowania (np. dostęp do danych poprzez interfejs HAN). Stosowane obecnie czasy agregacji danych oraz czas ich udostępniania przez operatorów sieciowych (raz na dobę) są dalekie od satysfakcjonujących. Wymaga to zmiany” [27].

Kolejnym zjawiskiem występującym we współczesnych sieciach elektroenergetycznych, stawiającym przed metrologią nowe zadania, jest nasycenie systemu nieliniowymi, niesymetrycznymi i niespokojnymi odbiornikami, co jest zagrożeniem dla jakości energii elektrycznej, a równocześnie stwarza konieczność stałego monitorowania tej jakości. Ten problem ilustruje kolejny cytat:

Rozwój energetyki rozproszonej (ER) – wraz z nieliniowymi, niesymetrycznymi i niespokojnymi odbiornikami – stwarza realne zagrożenie dla jakości dostawy energii elektrycznej. Jej degradacja jest już obecnie, a będzie w jeszcze w większym stopniu w przyszłości, jednym z głównych ograniczeń w upowszechnianiu tej formy energetyki. Rosnąca liczba jednostek ER wpływa negatywnie na sieć zasilającą, zwiększając zakres wolnych i szybkich zmian napięcia, wahań napięcia, asymetrii, odkształcenia i przepięć. Interfejsy energoelektroniczne ER, wprowadzając do sieci składowe łączeniowe prądu (9–150) kHz oraz zmieniając charakterystyki częstotliwościowe impedancji sieci, mogą także wpływać negatywnie na pracę układów rozliczeniowych, sygnalizacyjnych i sterowania, wykorzystujących sieć jako medium transmisji. Potrzebny jest szybki wzrost liczby rozproszonych źródeł energii (RZE) »przyjaznych« dla sieci zasilającej (»inteligentne« interfejsy energoelektroniczne) i stosowanie w polskich

sieciach urządzeń poprawiających warunki dostawy energii, tym samym zwiększających zdolności przyłączeniowe sieci dla nowych RZE [27].

Zwiększenie wydajności dużych elektrowni poprzez poprawę zabezpieczenia metrologicznego procesów monitorowania i kontroli krytycznych parametrów

Opinia w tym zakresie została opracowana przez autora rozdziału dotyczącego metrologii elektrycznej. Zmiany następujące w systemach elektroenergetycznych związane z rozwojem energetyki rozproszonej (ER) oraz z gwałtownie zwiększającą się liczbą rozproszonych źródeł energii (RZE), a także z pojawieniem się na rynku energii nowych graczy wymuszają konieczność dostosowania systemów sterowania elektrowniami [28]. Konwencjonalne podejście do systemów sterowania zostało zbudowane na zbiorze podstawowych koncepcji, które były w dużej mierze jednolite w całym sektorze i szeroko przyjęte przez różne firmy. Sterowanie było realizowane za pomocą jednego, scentralizowanego systemu znanego jako Rozproszony System Sterowania (ang. *Distributed Control System* – DCS), który konsolidował całą logikę działania elektrowni. System DCS składa się z kart I/O do pomiaru sygnałów obiektowych, procesorów lub procesorów CPU do wykonywania logiki sterującej oraz stacji operacyjnych umożliwiających obsługę różnych systemów składowych. Wskazuje się na dwie główne przyczyny zmian wprowadzanych w systemach automatyki elektrowni, a mianowicie są to [28]:

- wzrost liczby projektów dotyczących wprowadzenia i upowszechnienia energii odnawialnej, który wynika z tego, że technologie fotowoltaiczne i wiatrowe charakteryzują się prostszymi i łatwiejszymi do kontrolowania procesami w porównaniu z konwencjonalnymi elektrowniami cieplnymi, np. morskie turbiny wiatrowe automatycznie uruchamiają się i zatrzymują w zależności od warunków wiatrowych, co wymaga tylko minimalnej ingerencji operatora,
- nowe technologie w sektorze energii odnawialnej wprowadziły istotne zmiany, które stopniowo są uwzględniane również przez tradycyjnych operatorów.

Te dwa wyżej wymienione czynniki spowodowały istotne zmiany w podejściu do systemów sterowania elektrowni, które są oparte na danych pomiarowych z obiektu. Do najważniejszych zalicza się:

- dane pomiarowe są traktowane jako cenny zasób, który jest równie ważny jak sama elektrownia, a takie podejście wymaga zapewnienia dostępności do danych pomiarowych dla różnych użytkowników, co z kolei wiąże się z łączeniem różnych systemów pozyskiwania danych pomiarowych i ich przesyłania – chmura może okazać się technologią przydatną do przechowywania danych pomiarowych z zakładów przemysłowych i zarządzania tymi danymi, przy czym sektor energetyczny wolniej adaptuje się do zastosowań tej technologii w zakresie działalności operacyjnej,
- technologie operacyjne (OT) i technologie informacyjne (IT) są obecnie zintegrowane z centrami zdalnego sterowania,
- systemy sterowania wykorzystują także technologię bezprzewodową, inteligentne przyrządy pomiarowe i sprzęt mobilny, taki jak tablety i smartfony, co umożliwia dostęp do danych pomiarowych, monitorowanie instalacji, a nawet zdalną obsługę instalacji z dowolnego miejsca,
- modernizacja systemów sterowania doprowadziła także do ich integracji z innymi systemami, takimi jak np. CMMS (ang. *computerized maintenance management system*) oraz pakietami optymalizacji wydajności systemu online, która pozwala na bardziej efektywne planowanie prac serwisowych instalacji i optymalizację jej wydajności, gdyż dane pomiarowe z systemu sterowania mogą być wykorzystywane do informowania o harmonogramach prac serwisowych i innych działaniach podejmowanych w celu poprawy wydajności,
- stosowane są złożone algorytmy i sieci neuronowe do realizacji tzw. konserwacji predykcyjnej, przy czym do nauczania tych systemów konieczne są duże zbiory danych pomiarowych zebrane podczas normalnej pracy systemu i poszczególnych jego elementów,
- cyfryzacja systemów sterowania doprowadziła do stworzenia współpracy klient-dostawca, w której obie strony mają dostęp do danych pomiarowych w celu jej optymalizacji, w taki sposób, aby korzyść odnosiły obie strony (realizacja tych zadań wymaga odpowiedniego zabezpieczenia metrologicznego).

Podsumowując, należy podkreślić, że opisane powyżej zmiany w systemach sterowania elektrowniami oraz ich znacznie ściślejsza współpraca, zarówno z odbiorcami energii elektrycznej, jak również z prosumentami, spowodowała wygenerowanie nowych zadań dla metrologii. Należy do nich zaliczyć przede wszystkim wielokrotne zwiększenie objętości i strumieni danych pozyskiwanych z różnych elementów rozproszonego systemu wytwarzania energii, zapewnienie dostępności tych danych praktycznie w czasie rzeczywistym, udostępnienie danych pomiarowych dla szerokiego zbioru podmiotów działających w układzie klient-dostawca, zapewnienie dostępu do archiwalnych danych pomiarowych.

Opracowanie narzędzi metrologicznych niezbędnych do poprawy i pomiaru sprawności obecnych urządzeń fotowoltaicznych oraz w celu umożliwienia produkcji ogniw słonecznych nowej generacji

Ten aspekt został zilustrowany kilkoma przykładami dotyczącymi oddziaływania źródeł fotowoltaicznych oraz generatorów wiatrakowych na sieć elektroenergetyczną.

Przykład 1 dotyczy zmienności mocy generowanej przez kilka elektrowni PV zlokalizowanych blisko siebie, w odpowiedzi na zmienność zachmurzenia. Spowoduje to analogiczną zmianę napięcia w punkcie przyłączenia elektrowni. Powstaje pytanie: jaką miarą liczbową ocenić szkodliwość tego zaburzenia? Gdyby bowiem stosować standardowe metody oceny jakości napięcia, to zaburzenie byłoby niezauważalne. Jest zbyt „szybkie”, aby mieć wpływ na wartości agregowane w czasie 10 min. Równocześnie jest zbyt „wolne”, aby wpływać na wskaźniki wahań napięcia. Rozwiązanie tego problemu wymaga zaproponowania nowych miar liczbowych dla oceny szkodliwości takich zaburzeń oraz eksperymentalnego (pomiarowego) sposobu wyznaczania ich wartości liczbowych.

Przykład 2 dotyczy monitorowania skutków zmienności mocy generowanej przez odnawialne źródła energii (OZE). Duża zmienność warunków nasłonecznienia i/lub prędkości wiatru powoduje w konsekwencji szybkie zmiany napięcia. Ilościowe (pomiarowe) określenie wielkości tego zaburzenia powinno być włączone do podstawowych funkcjonalności rejestratorów wskaźników opisujących jakość energii elektrycznej.

Przykład 3 dotyczy problemu pomiaru zmiany fazy napięcia podczas zapadu. Jest to kolejne zaburzenie, które w nieodległym czasie powinno zostać włączone do zbioru mierzonych parametrów jakości napięcia, co wymaga uwzględnienia takiej potrzeby podczas projektowania oprzyrządowania pomiarowego.

Przykład 4 wiąże się z koniecznością podjęcia prac nad modernizacją miernika wahań napięcia. Obecnie istniejący miernik jest oparty na modelu reakcji tradycyjnej żarówki na zmiany wartości napięcia. Takich źródeł światła (odbiorników energii elektrycznej) praktycznie już się nie stosuje. Często duża wartość zmierzonych wskaźników Pst (krótkoterminowy wskaźnik migotania) i Plt (długookresowy wskaźnik migotania) nie przekłada się na skargi odbiorców. Z pewnością będzie to proces długi, bowiem kilkudziesięcioletnia normalizacja oparta jest na wskaźnikach mierzonych za pomocą obecnego miernika wahań. Obowiązujące obecnie wymagania odnośnie metrologicznego wyposażenia stosowanego do pomiaru migotania są określone w normie IEC 61000-4-15 (PN-EN 61000-4-15 – Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 4-15: Metody badań i pomiarów. Miernik migotania światła. Specyfikacja funkcjonalna i projektowa). Prace nad zmianą miernika wahań napięcia trwają już obecnie. Istnieje jednak uzasadniona potrzeba ich intensyfikacji.

Rozwój infrastruktury metrologicznej wymaganej dla pomyślnego wdrożenia inteligentnych sieci elektrycznych i linii przesyłowych wysokiego napięcia DC, aby sprostać rosnącej decentralizacji wytwarzania energii i potrzebie niskostratnego przesyłania energii elektrycznej na duże odległości

Systemy HVDC (*high voltage direct current*) są dobrze rozpoznany źródłem harmonicznych, ponieważ są zwykle wyposażone w filtry, to filtrują także harmoniczne innych odbiorników i stwarzają groźbę rezonansów. Na to zjawisko ma także wpływ pojemność kabli w sieciach przesyłowych, która powoduje przesunięcie częstotliwości rezonansowych w obszar harmonicznych niższych rzędów. Sytuację może pogorszyć zwiększony udział generacji z dużych farm wiatrowych i elektrowni PV, które nie wpływają na podniesienie mocy zwarciovych. W Polsce rozpoczyna się proces „kablowania” sieci elektroenergetycznych, co dodatkowo pogłębi problem i zwiększy zapotrzebowanie na pomiar i analizę częstotliwościową impedancji.

Przeciwdziałanie utracie stabilności sieci elektroenergetycznych i zapewnienie bezpieczeństwa oraz jakości dostaw energii elektrycznej, w warunkach ograniczonej przewidywalności w dobowych, a nawet krótkookresowych wahaniami odnawialnych źródeł energii, w połączeniu z dużą liczbą nowych obciążeń, takich jak np. pojazdy elektryczne

Rosnąca obecność OZE w sieciach dystrybucyjnych zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia nieplanowanej pracy wyspowej na obszarach, na których lokalne wytwarzanie jest bliskie zbilansowania z lokalną konsumpcją. W takim przypadku, po zadziałaniu układu zabezpieczeń, „wyspa” może pozostać w stanie „energetycznej równowagi” z nowymi, często zmieniającymi się wartościami częstotliwości i napięcia. Oznacza to brak bezpieczeństwa dla użytkowników sieci oraz pracowników służb utrzymania ruchu, a także degradację jakości napięcia (wartości i częstotliwości). Sytuacja ta jest prawdopodobna w sieciach nN ze względu na brak kontroli pracy wyspowej. Jeżeli jednak OZE są w stanie pracować w kontrolowanym trybie wyspowym, może to zwiększyć niezawodność zasilania odbiorców i obniżyć koszty braku dostaw energii. Ta możliwość nie jest obecnie wykorzystywana przez europejskich operatorów. Instrukcje ruchu i eksploatacji sieci oraz normy opisują środki techniczne (w tym oprzyrządowanie pomiarowe) niezbędne do detekcji pracy wyspowej, będące tym samym zabezpieczeniem źródeł przed tym stanem pracy. Dokumenty te opisują także procedury testowania takich zabezpieczeń podczas badania pojedynczego źródła, co jest wyidealizowanym scenariuszem, nieuwzględniającym występującego często w praktyce, wzajemnego oddziaływania wielu równoległe pracujących źródeł. Potrzebne są badania nad metodami detekcji (pomiaru) pracy wyspowej w sieci z dużą liczbą rozproszonych źródeł/magazynów energii oraz nad skutecznym bilansowaniem mikrosieci w czasie prawie rzeczywistym.

Opracowanie nowych narzędzi do monitorowania w czasie rzeczywistym i kontroli parametrów sieci, takich jak: lokalizacja źródła/przyczyny pogorszenia jakości energii lub niestabilności sieci

Wraz z postępującym rozwojem rynku energii, zarówno dostawcy, jak i odbiorcy energii w coraz większym stopniu są zainteresowani jednoznaczną oceną odpowiedzialności za złą jakość napięcia. Nabiera to szczególnego znaczenia w okresie formułowania kontraktów

na dostawę energii i egzekwowania, poprzez taryfy, opłat za pogarszanie jakości zasilania. W tym obszarze występują dwa zagadnienia szczegółowe. Pierwsze dotyczy lokalizacji źródła zaburzenia. Miernik rejestruje napięcia i prądy w punkcie wspólnego połączenia (PWP) i na tej podstawie formułowany jest wniosek, po której stronie: dostawcy czy odbiorcy energii zlokalizowane jest źródło zaburzenia. W literaturze opisano wiele metod pomiarowych, szczególnie w odniesieniu do źródeł harmoniczných, lecz nie tylko, ale także wahań napięcia i asymetrii. Wszystkie metody mają wspólną wadę, a mianowicie wskazują jedynie, po której stronie rozważanego węzła sieci znajduje się dominujące źródło zaburzenia i czynią to z ograniczoną pewnością wnioskowania, szczególnie jeżeli brak jest wyraźnie dominującego źródła. To nie może być podstawą rozstrzygnięcia sporu pomiędzy odbiorcą i dostawcą energii w zakresie wypłacania rekompensaty przez jedną ze stron, za ewentualne skutki zaburzeń.

Drugie zagadnienie, znacznie ważniejsze, dotyczy ilościowej oceny (pomiaru) stopnia udziału dostawcy i odbiorcy energii w całkowitym poziomie zaburzenia zmierzonego w punkcie ich wspólnego połączenia (PWP). Przykładowo, jeżeli w rozważanym węźle przyjmujemy poziom wyróżnionej harmoniczných za 100 %, to powstaje pytanie, jaki jest w tych 100 % udział odbiorcy (jego indywidualna emisja), a ile wynosi „tło”, za które ponosi odpowiedzialność dostawca energii. To obecnie jeden z fundamentalnych problemów, przed którym staje elektroenergetyka, także polska. Jak ocenić koszty degradacji jakości dostawy energii na podstawie indywidualnej emisji zmierzonej w sposób niebudzący wątpliwości? Dotyczy to w szczególności zawartości harmoniczných, wahań napięcia, niekiedy także asymetrii.

Osobnym problemem istniejącym w elektroenergetyce od lat jest pomiar częstotliwościowych charakterystyk impedancyjnych sieci „widzianej” z perspektywy wyróżnionego węzła. Istnieje bogata literatura przedmiotu, ale każda propozycja sprowadza się w praktyce do budowy niemal laboratorium badawczego w stacji transformatorowej. Ta trudność sprawia, że badanie charakterystyk częstotliwościowych impedancji sieci przeprowadza się prawie wyłącznie symulacyjnie. Ten problem dotyczy głównie (niewyłącznie) sieci NN i WN, tam bowiem skutki niepoprawnie dobranego kondensatora, filtru, czy dławika i wywołanego tym stanu wzmocnienia rezonansowego są najkosztowniejsze.

Opracowanie specjalnego oprzyrządowania do monitorowania i optymalizacji wykorzystania energii z zastosowaniem zaawansowanej technologii pomiaru energii, taką jak inteligentne liczniki energii

W tym punkcie niezmiennie od ponad dekady wymienić należy wiarygodność pomiaru składowych harmoniczných napięcia, mierzonych w sieciach WN i SN. Powyżej harmoniczných 11. rzędu praktycznie nie wiemy, co mierzymy. Polska (nie tylko) energetyka potrzebuje łatwych w zastosowaniu przyrządów do pomiaru widma napięcia w paśmie do ok. 50. harmoniczných. Rozpoznanie w zakresie dostępności takich przyrządów robiono na Politechnice w Dreźnie i prowadzone były w tej sprawie rozmowy z Polskimi Sieciami Elektroenergetycznymi S.A. (PSE). Warto wrócić do tematu. Dotyczy to także pomiarów harmoniczných w sieciach DC, zarówno po stronie AC, jak i DC. Takie potrzeby zostaną wymuszone rozwojem morskiej energetyki wiatrowej oraz budowy trakcji w Centralnym Porcie Komunikacyjnym.

Warto w przypadku nowych instalacji odbiorczych i generacyjnych już na etapie projektowania rozważyć użycie przetworników szerokopasmowych nie tylko do pomiarów harmoniczných lub stanów przejściowych, ale także do celów diagnostycznych, takich jak: wykrywanie wyładowań niezupełnych i implementacja metod lokalizacji uszkodzeń.

3.6. Opinie przedstawicieli ankietowanych ośrodków metrologicznych w Polsce

Jedno z pytań sformułowanych w ankiecie przeprowadzonej wśród jednostek metrologicznych działających w strukturach polskich uczelni (tab. 1) dotyczyło perspektyw rozwoju metrologii w obszarach rozwijanych w tych jednostkach. Opinie te dotyczą wybranych obszarów zaliczanych do metrologii elektrycznej. Poniżej przedstawione zostały odpowiedzi udzielone przez respondentów. Udzielenie odpowiedzi na to pytanie ankietowe nie było obowiązkowe.

Opinia dotycząca rozwoju metrologii w zakresie termowizji i pomiarów termowizyjnych przedstawiona przez Prof. Waldemara Minkinę z Politechniki Częstochowskiej (Wydział Elektryczny, Katedra Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki)

Pomiary termowizyjne (pomiary termograficzne, termografia komputerowa) to dyscyplina, która obecnie na świecie bardzo dynamicznie się rozwija, a kamery termowizyjne stanowią bardzo zaawansowane technicznie przyrządy pomiarowe. Trudno jest opisać wszystkie zastosowania pomiarów termowizyjnych: wojsko, medycyna, budownictwo, diagnostyka maszyn, ochrona środowiska, energetyka, elektronika, automatyka, nauki techniczne, rolnicze itd. Ważną aplikacją termowizji była diagnostyka medyczna, stosowana również w okresie pandemii COVID-19.

O jakości wykonanych pomiarów termowizyjnych decyduje detektor promieniowania. Rozróżnia się detektory termiczne i fotonowe. Wszystkie używane detektory promieniowania powinny posiadać określone cechy charakteryzujące ich właściwości metrologiczne, tj.: czułość, szybkość odpowiedzi, wartość szumów, pobór mocy, rozmiary, trwałość i koszty wytwarzania. Zastosowania militarne oraz badawcze będą wymuszały minimalizację większości tych parametrów przy jednoczesnym wzroście rozdzielczości detektorów [29].

Duża ilość danych wymusza tworzenie komputerowych systemów pomiarowych. Tworzenie odpowiedniego oprogramowania to następny trend rozwojowy w tej dziedzinie pomiarów. Czołowi producenci piroometrów, kamer termowizyjnych oraz oprogramowania to: FLIR (USA + Szwecja + Francja), Fluke + Raytek (USA), InfraTec GmbH Infrarot Sensorik und Meßtechnik (Niemcy), IRCAM GmbH (Niemcy), AMETEK Land (dawny Land Instruments, Wielka Brytania), NEC (Japonia), Telops (Kanada), VIGO (Polska), Sonel S.A. (Polska) i wiele innych. Oprócz detektorów w pomiarach temperatury metodami bezstykowymi ważną rolę odgrywają też układy optyczne, które wspólnie wyznaczają pasmo pomiarowe przyrządu.

Jednym z obecnych głównych kierunków rozwoju bezstykowych technik pomiarów temperatury jest tzw. „aktywna termografia dynamiczna” wchodząca w zakres badań nieniszczących NDT-NDE (ang. *Non Destructive Testing-Non Destructive Evaluation*). W przeciwieństwie do termografii pasywnej, do realizacji termografii aktywnej jest

wymagane dostarczenie energii do obiektu i rejestracja odpowiedzi na takie wymuszenia. Dlatego w niektórych opracowaniach używa się pojęcia termografia dynamiczna. Najczęściej stosuje się napromienienie obiektu, jego podgrzanie przez kontakt ze źródłem ciepła lub przemianę energetyczną energii mechanicznej drgań w energię wewnętrzną. Fale cieplne są generowane i wykrywane po tej samej stronie (ang. *reflection*) badanego materiału lub na jego przeciwnych stronach (ang. *transmission*). Dlatego niekiedy używa się pojęć metoda odbiciowa i transmisyjna w kontekście wzajemnego położenia źródła ciepła i urządzenia do rejestracji temperatury. W termografii aktywnej wygenerowane zaburzenie cieplne zazwyczaj nie ma związku ze stanem energetycznym obiektu, jaki występowałby podczas jego normalnej pracy.

Do najważniejszych zalet aktywnej termografii należą względnie krótki czas inspekcji dużych powierzchni (zależny od właściwości cieplnych materiału), nieinwazyjność (brak zmian właściwości fizycznych i mechanicznych obiektu), podstawowa lub jedyna metoda w niektórych zastosowaniach (np. powłoki ceramiczne) oraz bezpieczeństwo personelu i sprzętu.

Mimo szeregu cech pożądanых metoda ta nie jest wolna od wad, takich jak: znaczny koszt aparatury (dzięki pojawieniu się dużej liczby producentów obserwowany jest ciągły spadek cen systemów termowizyjnych), konieczność zapewnienia jednorodnego przestrzennego i wysoko energetycznego pobudzenia cieplnego badanego obiektu czy wpływ wielu czynników, m.in. strat ciepła związanych z konwekcją i przewodzeniem, emisyjnością materiału, stanu powierzchni materiału na wytworzone rozkłady temperatury. Ponadto wykrywalność defektów jest uzależniona od stopnia zróżnicowania właściwości cieplnych materiałów – jest to podstawowy czynnik określający stosowalność metody. Z kolei silne tłumienie amplitudy fali cieplnej w materiale ogranicza możliwość wykrywania defektów leżących jedynie w warstwach podpowierzchniowych.

Oprócz wykrywania coraz częściej spotykanym problemem staje się ilościowe oszacowanie parametrów defektów (takich jak: głębokość, kształt, opór cieplny itp.), czyli identyfikacja ich parametrów zwana charakteryzacją. Dużym wyzwaniem stojącym przed termografią aktywną, są ciągle wzrastające wymagania dotyczące zwiększenia

dokładności charakteryzacji oraz szybkości przeprowadzanych procedur eksperymentalnych.

Najważniejszym problemem związanym z dokładnością tak pasywnych, jak i aktywnych metod pomiaru temperatury w podczerwieni jest zagadnienie wyznaczania emisyjności. W związku z tym, wydaje się, że bardzo ważną dziedziną badań w przyszłości będą metody pomiaru emisyjności powierzchni wraz z metodami szacowania dokładności tych pomiarów. W przypadku niemożności przeprowadzenia pomiaru emisyjności powierzchni z wystarczającą dokładnością, niezbędne jest opracowanie nowych metod wykrywania i charakteryzacji defektów, umożliwiających zmniejszenie wpływu wartości emisyjności na wyniki badań. Wymusza to poszukiwanie zarówno nowych metod eksperymentalnych, jak i algorytmów przetwarzania danych. Taką właściwość posiada m.in. technika kontrastu filtrowanego.

Osobnym problemem o charakterze metrologicznym, związanym z aktywną termografią w podczerwieni, a w szczególności charakteryzacją defektów, jest rozwój metod oceny dokładności. Pierwszym elementem toru pomiarowego jest najczęściej kamera termowizyjna. To tu powstają błędy pomiaru temperatury, które następnie są propagowane w trakcie stosowania specjalizowanych procedur przetwarzania danych. Z uwagi na ciągły rozwój procedur przetwarzania, niezbędne okazuje się opracowywanie coraz to nowych metod oceny dokładności oparte na uznanym przez środowisko metrologiczne pojęciu błędów i niepewności [30]. Problemy oceny dokładności wykrywania i charakteryzacji defektów za pomocą termografii aktywnej ściśle wiążą się z zagadnieniem normalizacji tej metody badawczej. Jak dotąd nie doczekała się ona niestety odnośnej normy europejskiej czy światowej.

Opinia nt. perspektyw rozwoju elektrycznej tomografii komputerowej opracowana przez Prof. Waldemara Smolika z Politechniki Warszawskiej (Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, Pracownia Systemów Akwizycji i Przetwarzania Informacji, Zakład Elektroniki Jądrowej i Medycznej, Instytut Radioelektroniki i Technik Multimedialnych)

Unia Europejska określiła obecne kierunki rozwoju europejskiej metrologii i sformułowała cele strategiczne. W dokumentach tych nadaje się szczególnie wysoki priorytet poprawie opieki zdrowotnej. W dziedzinie metrologii wyzwania strategiczne obejmują głównie badania na

rzecz innowacji w technologiach pomiarowych stosowanych w diagnostyce medycznej. Elektryczna tomografia komputerowa ma potencjał zastosowania w diagnostyce medycznej, w tym w długoterminowym monitorowaniu pacjentów, jednakże mała wrażliwość pomiarów, słaba rozdzielczość przestrzenna i problemy numeryczne w rekonstrukcji obrazów stanowią barierę w zastosowaniu tej techniki w medycynie. Tomografia elektryczna wymaga przełomowego poszerzenia wiedzy i możliwości technicznych w zakresie realizacji pomiarów małych wartości wielkości elektrycznych. Technika o największym potencjale zastosowania w medycynie jest elektryczna tomografia impedancyjna, która wymaga naklejania elektrod na skórę pacjenta. Alternatywą jest rozwój technik pomiarowych z użyciem tzw. suchych elektrod, bez kontaktu omowego. Badania mogą przyczynić się do postępu technicznego w tzw. elektronice ubraniowej (ang. *wearable electronics*), która mogłaby być stosowana w długoterminowym monitorowaniu pacjentów, jak również w medycynie sportowej. W tym obszarze znajdują zastosowanie czujniki drukowane, o których była mowa we wcześniejszym fragmencie opracowania.

Opinia dotycząca perspektyw rozwoju metrologii w obszarze pomiarów parametrów pól elektromagnetycznych, w tym impulsowych opracowana przez Prof. Marka Kuchtę z Wojskowej Akademii Technicznej (Wydział Elektroniki, Zespół Pomiarów Parametrów Pola Elektromagnetycznego)

Jedną z istotnych potrzeb jest monitorowanie pola elektromagnetycznego. Niebawem stanie się to koniecznością ze względu na szybko rosnącą liczbę i różnorodność urządzeń generujących pole elektromagnetyczne w różnych pasmach częstotliwości. Przyszłością są stały monitoring smogu elektromagnetycznego podobny do monitoringu jakości powietrza oraz indywidualne dozymetry natężenia pola dla personelu pracującego w polach o dużym natężeniu. Do przeszkód technicznych w budowie dozymetru należą m.in.: niejednorodność pól w strefie pomiarów (odbicia od ziemi, budynków itp.) oraz uwzględnienie oddziaływania ciała człowieka na wykonywane pomiary. Ciekawą perspektywą wydaje się zastosowanie w takich pomiarach czujników optoelektrycznych. Brakuje jednak prac badawczych na poziomie podstawowym w obszarze zastosowania tych czujników w metrologii pola elektromagnetycznego.

Opinia dotycząca perspektyw rozwoju metrologii w obszarze czujników światłowodowych opracowana przez prof. Piotra Kisałę z Politechniki Lubelskiej (Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Zakład Optoelektroniki i Sieci Teleinformatycznych)

Perspektywy rozwoju czujników światłowodowych są bardzo szerokie. Czujniki wykorzystujące włókna światłowodowe posiadają niewielkie rozmiary, są nieczułe na zakłócenia elektromagnetyczne, mogą być stosowane w środowiskach o zagrożeniach wybuchowych i w materiałach łatwopalnych. Nowe konstrukcje/struktury opracowywane w laboratoriach mogą być w przyszłości wykorzystywane jako czujniki wielkości chemicznych, środowiskowych i biologicznych. Mają szerokie perspektywy aplikacji w układach automatyki przemysłowej jako czujniki do pozycjonowania, czujniki kontroli ruchu, czujniki procesowe, np.: temperatury, ciśnienia, poziomu. Nowe struktury wytwarzane w Zakładzie Optoelektroniki i Sieci Teleinformatycznych są wrażliwe na zmiany współczynnika załamania światła, przez co mają potencjalne zastosowania do pomiaru właściwości cieczy, parametrów płynów eksploatacyjnych samochodu i ogólnie w przemyśle samochodowym. Istnieje również całe spektrum ich potencjalnych zastosowań w przemyśle spożywczym, rolniczym, hodowlanym, maszynowym (technologie przemysłowe), służbie zdrowia, lecznictwie weterynaryjnym, przemyśle naftowym itp.

3.7. Podsumowanie kierunków rozwoju metrologii elektrycznej

Przedstawiona praca wskazała podstawowe potrzeby, które powinny zostać zaspokojone poprzez podejmowanie prac badawczych i rozwój technologii w obszarze metrologii. Są one bardzo różnorodne i obejmują swym oddziaływaniem wiele różnych obszarów aktywności człowieka, poczynając od przemysłu wytwórczego, poprzez energetykę, transport, gospodarkę i ochronę środowiska, rolnictwo, ochronę zdrowia, transformację cyfrową aż po zapewnienie bezpieczeństwa na poziomie indywidualnym, jak również całych społeczeństw. Rozwój i realizacja celów strategicznych opisanych w przytoczonych dokumentach, publikowanych przez międzynarodowe organizacje są uwarunkowane

adekwatnym rozwojem metrologii. Brak odpowiedniego zabezpieczenia metrologicznego może być krytycznym zagrożeniem dla pomyślnej realizacji celów sformułowanych w tych dokumentach. Powiązanie występujące pomiędzy możliwością realizacji wymienionych celów i rozwojem metrologii zostało szczegółowo wykazane w odniesieniu do elektroenergetyki i transportu drogowego. W pozostałych obszarach ten związek został przedstawiony na bardziej ogólnym poziomie. Z przedstawionego przeglądu wynika jeden podstawowy wniosek. Mianowicie rozwój metrologii powinien być wszechstronny i dotyczyć zarówno rozwoju w sferze czujników, metod pomiarowych algorytmów przetwarzania danych pomiarowych, zwiększenia szybkości i objętości pozyskiwania danych pomiarowych, integracji systemów, wykorzystania sztucznej inteligencji w przyrządach i systemach pomiarowych, automatyzacji pomiarów i wreszcie obniżania kosztów związanych z oprzyrządowaniem pomiarowym i z wdrażaniem na szeroką skalę wyspecjalizowanych systemów pomiarowych.

W tym kontekście trzeba się jednak zastanowić, czy rzeczywiście rozwój metrologii powinien być rozpatrywany w skali krajowej, czy raczej w skali globalnej. W związku z istniejącą współpracą gospodarczą, istniejącym międzynarodowym podziałem pracy, również w zakresie kompetencji metrologicznych, wydaje się, że raczej powinien być preferowany rozwój krajowych specjalności metrologicznych. Oczywiście trzeba przy tym zapewnić bezpieczeństwo metrologiczne w obszarach strategicznych dla danego kraju i społeczeństwa. Wydaje się, że specjalizacja metrologiczna poszczególnych krajów np. w ramach UE jest uzasadniona zarówno względami ekonomicznymi, jak i efektywnością prowadzonych prac. Dlatego aby móc odpowiedzieć na pytanie, w jakich kierunkach powinna się rozwijać metrologia elektryczna w Polsce, trzeba przeanalizować istniejący już dorobek, zasoby kadrowe oraz istniejącą infrastrukturę badawczą. Konieczne jest również określenie potrzeb z zakresu metrologii formułowanych przez obszary strategiczne. Ten aspekt, jakkolwiek zdaniem autora opracowania niezwykle ważny, wykracza jednak poza ramy niniejszej pracy.

W opracowaniu całkowicie zostało pominięte zagadnienie metrologii wojskowej. Jest to obszar wrażliwy, a dostęp do informacji jest bardzo ograniczony. Niewątpliwie jednak rozwój uzbrojenia zarówno rodzimej produkcji, jak również wzrost udziału uzbrojenia pochodzącego z importu pociąga za sobą konieczność zapewnienia zabezpieczenia

metrologicznego sił zbrojnych i pola walki. Te zagadnienia również nie zostały uwzględnione w tej pracy.

Na zakończenie trzeba podnieść jeszcze jedną ważną kwestię związaną z rozwojem metrologii w Polsce. Jest nią rozwój kadr metrologicznych. Chodzi o to, abyśmy mogli/potrafili być aktywnymi udziałowcami w międzynarodowym podziale kompetencji metrologicznych, a nie tylko konsumentami nowoczesnych technologii importowanych do kraju. To zagadnienie wymaga większej uwagi, ale trzeba wyraźnie zaznaczyć, że nie będzie rozwoju metrologii bez zapewnienia wysoko wykwalifikowanej kadry metrologów. Pierwsze działania mające na celu opisanie istniejącego stanu w zakresie kształcenia metrologów zostały podjęte przez Komitet Metrologii i Aparatury Naukowej PAN, którego członkowie oraz zaproszeni eksperci opracowali w 2017 r. ekspertyzę [31].

Celem tej ekspertyzy było określenie stanu nauczania metrologii na różnych kierunkach, począwszy od fizyki, poprzez kierunki techniczne, a kończąc np. na technologii żywności i żywieniu człowieka, oraz wskazanie dobrych praktyk w procesie kształcenia i zaleceń dotyczących poprawy jakości kształcenia. Objęto nią studia I, II i III stopnia. Przeprowadzone analizy poszczególnych kierunków, zwłaszcza ośmiu kierunków technicznych, wskazują na dobre, a także na niepokojące elementy procesu kształcenia z przedmiotów metrologicznych i pokrewnych (związanych z metrologią). Wskazano dobre praktyki i niedoskonałości występujące w procesie kształcenia. Opracowanie tej ekspertyzy było koniecznym, ale jednak tylko pierwszym krokiem w kierunku opracowania strategii rozwoju kadr metrologicznych w Polsce, a także podniesienia świadomości metrologicznej w polskim społeczeństwie.

Literatura

1. BIPM, *The International System of Units (SI)*, <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure> (dostęp: 31.01.2023 r.).
2. IEEE/ASTM SI 10-2016 (Revision of IEEE/ASTM SI 10-2010), *American National Standard for Metric Practice*.
3. EURAMET e.V., EURAMET 2030 Strategy, Version 2.0, EURAMET, Braunschweig 2021.
4. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Horizon Europe Strategic Plan (2021–2024), Publications Office of the European Union, Luxembourg 2021.
5. Das R., *Printed and flexible sensors 2020–2030: technologies, players, forecasts*, <https://www.idtechex.com/en/research-report/printed-and-flexible-sensors-2020-2030-technologies-players-forecasts/755> (dostęp: 13.12.2023 r.).
6. Prochowski L., Szwajkowski P., Ziubinski M., *Research scenarios of autonomous vehicles, the sensors and measurement systems used in experiments*, „Sensors” 2022, vol. 22, no. 17, 6586.
7. EURAMET, *Harmonised metrology for autonomous vehicle sensors*, https://msu.euramet.org/current_calls/industry_2020/documents/SRT-i08.pdf (dostęp: 29.01.2024 r.).
8. Sujon M., Dai F., *Application of weigh-in-motion technologies for pavement and bridge response monitoring: state-of-the-art review*, „Automation in Construction” 2021, vol. 130, 103844.
9. Bao T., Babanajad S.K., Taylor T., Ansari F., *Generalized method and monitoring technique for shear-strain-based bridge weigh-in-motion*, „Journal of Bridge Engineering” 2015, vol. 21, no. 1, 4015029.

10. Sroka R., Burnos P., Gajda J., *Vehicle's axle load sensors in Weigh-in-Motion systems.*, [in:] *Physical and chemical sensors: design, applications & networks*, ed. S.Y. Yurish, International Frequency Sensor Association (IFSA) Publishing, Barcelona 2019, s. 49–67.
11. Intercomp, *Weigh-In-Motion (WIM) Strip Sensors*, <https://www.intercompcompany.com/its-enforcement-scales/in-ground-weigh-in-motion/strip-sensors> (dostęp: 10.01.2024 r.).
12. Optiwim, *New generation of dynamic Weigh-in-Motion*, <https://www.optiwim.com> (dostęp: 10.01.2024 r.).
13. Kistler, *KiTrafic Digital Weigh In Motion solution*, <https://www.kistler.com/CA/en/wim-reloaded-kitrafic-digital-the-unique-weigh-in-motion-solution/C00000084> (dostęp: 10.01.2024 r.).
14. Jacob B., O'Brien E., Jehaes, S., *Weigh-in-Motion of road vehicles. COST 323 final report (1993–1998). Appendix 1 European WIM Specification*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Paris 2002.
15. Stańczyk D., *New calibration procedure by axle rank*, [in:] *Weigh-in-motion of road vehicles: proceedings of the Final Symposium of the project WAVE (1996–99)*, ed. B. Jacob, Paryż 1999, s. 307–316.
16. Burnos P., *Autokalibracja systemów ważących pojazdy samochodowe w ruchu oraz analiza i korekcja wpływu temperatury na wynik ważenia*, rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Kraków 2009.
17. Burnos, P., Gajda, J., *Optimised autocalibration algorithm of weigh-in-motion systems for direct mass enforcement*, „Sensors” 2020, vol. 20, no. 11, 3049.
18. Sujon M., Dai F., *Application of weigh-in-motion technologies for pavement and bridge response monitoring: State-of-the-art review*, „Automation in Construction” 2021, vol. 130, 103844.
19. Burnos P., Gajda J., Sroka R., Wasilewska M., Dolega C., *High accuracy weigh-in-motion systems for direct enforcement*, „Sensors” 2021, vol. 21, no. 23, 8046.
20. Gajda J., Burnos P., Sroka R., Daniel M., *Accuracy maps of weigh-in-motion systems for direct enforcement*, „Electronics” 2023, vol. 12, no. 7, 1621.
21. Warscotte L., Boreux J., Antofie A., Corbaye D., *Direct enforcement in Belgium with high speed weigh-in-motion (HS-WIM)*, „Electronics” 2023, vol. 12, no. 3, 555.

22. Antofie A., Boreux J., Corbaye D., Geroudet B., Liautaud F., Bancel A., *Approach of the Walloon legal metrology (Belgium) for Weigh-In-Motion (WIM) free-flow direct enforcement*, [in:] *ICWIM8 – 8th International Conference on Weigh-in-Motion*, eds. B. Jacob, F. Schmidt, Prague 2019, s. 147.
23. Czech Metrology Institute (CMI), *Measure of a general nature. Stipulating metrological and technical requirements for specified measuring devices, including test methods for verifying specified measuring devices: high-speed weigh-in-motion road vehicle scales*, Brno 2010, https://www.unmz.cz/files/notifikace_WTO-TBT/2010/CZE140_EN_1_1.doc (dostęp: 9.03.2023 r.).
24. International Organization of Legal Metrology (OIML), *Automatic instruments for weighing road vehicles in motion and measuring axle loads. Part 1: Metrological and technical requirements – Tests*, Paris 2006, https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r134-1-e06.pdf (dostęp: 19.03.2023 r.).
25. ASTM E1318-09(2017), *Standard specification for highway weigh-in-motion (WIM) systems with user requirements and test methods*, ASTM International, West Conshohocken 2009.
26. Dutch Metrology Organization, *NMi international WIM standard-specifications and test procedures for weigh-in-motion systems*, v. 1.1, NMi Certin, Delft 2019.
27. KlastER, *Strategia rozwoju energetyki rozproszonej w Polsce do 2040 roku*, <https://www.energetyka-rozproszona.pl/media/ckeditor/2023/01/13/strategia-rozwoju-energetyki-rozproszonej-w-polsce-do-2040-roku.pdf> (dostęp: 30.04.2024 r.).
28. BOSLAN Engineering and Consulting, *The control of electricity generation plants. Past, present and future*, https://www.boslan.com/off-shore-wind-farms/the-control-of-electricity-generation-plants/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=20347502871&utm_content=150330906959&utm_term=power%20plant%20control%20system&gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIhNiLp6bhgwMVIJFoCR1UnQsyEAAYASAAEgJ2z_D_BwE (dostęp: 16.01.2024 r.).
29. Rogalski A., Bielecki Z., *Detection of optical signals*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York 2022.
30. Minkina W., Dudzik S., *Infrared thermography: errors and uncertainties*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester 2009.
31. Komitet Metrologii i Aparatury Naukowej PAN, *Stan nauczania metrologii i przedmiotów pokrewnych na wyższych uczelniach technicznych w Polsce: ekspertyza*, red. W. Miczulski, R. Sroka, Kraków 2017.

W rozdziale przedstawiono diagnozę stanu metrologii elektrycznej w Polsce oraz opisano strategiczne kierunki jej dalszego rozwoju. Przeprowadzono kompleksową analizę aktualnych wyzwań i możliwości, podkreślając mocne i słabe strony tego istotnego działu. W pierwszej części określono obszar merytoryczny, będący przedmiotem opracowania, a w kolejnej zaprezentowano podmioty (zarówno naukowe, jak i przemysłowe) zajmujące się metrologią elektryczną. W przypadku ośrodków akademickich rozważania oparto o wyniki ankiety, do której odpowiedzi udzielili kierownicy jednostek prowadzących badania w analizowanym zakresie. W tej części zawarto informacje dotyczące tematyki prowadzonych prac badawczych, zespołów badawczych, najważniejszych osiągnięć, aparatury pomiarowo-badawczej oraz planów naukowych. Dodatkowo zidentyfikowano przeszkody ograniczające działalność naukową. Charakterystykę ośrodków przemysłowych przeprowadzono na bazie ankiety skierowanej do przedsiębiorstw i podmiotów prowadzących działania w zakresie metrologii. Następnie skoncentrowano się na przyszłości metrologii elektrycznej w aspekcie perspektyw jej rozwoju w powiązaniu ze strategicznymi kierunkami rozwoju społeczeństw, a także w obszarze czujników pomiarowych. Uwzględniono również kierunki, takie jak: transport i mobilność oraz elektroenergetyka. W pracy ujęto opinie wybranych przedstawicieli ankietowanych ośrodków. Stwierdzono przede wszystkim, że rozwój metrologii powinien być wszechstronny i dotyczyć zarówno rozwoju w sferze czujników, metod pomiarowych, algorytmów przetwarzania danych pomiarowych, zwiększenia szybkości i objętości pozyskiwania danych pomiarowych, integracji systemów, wykorzystania sztucznej inteligencji w przyrządach i systemach pomiarowych, automatyzacji pomiarów i wreszcie obniżania kosztów związanych z oprzyrządowaniem pomiarowym i z wdrażaniem na szeroką skalę wyspecjalizowanych systemów pomiarowych. Podkreślono, że metrologia elektryczna jest kluczowym obszarem w dążeniu do umocnienia pozycji Polski w dziedzinie metrologii. Jej rozwój odgrywa istotną rolę w podnoszeniu konkurencyjności gospodarki, a także w zapewnieniu bezpieczeństwa i poprawie jakości życia obywateli.

Słowa kluczowe: metrologia elektryczna, „Polska Metrologia”, diagnoza stanu metrologii, strategiczne kierunki rozwoju metrologii

CZĘŚĆ CZWARTA

Metrologia fizyczna



Prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik

ORCID: 0000-0002-4139-4195

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

ROR: <https://ror.org/056xse072>

Uzyskał stopień magistra inżyniera na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Stopień doktora nauk technicznych otrzymał w 2001 r. na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej, stopień naukowy doktora habilitowanego uzyskał w 2010 r. na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa (WBMiL) Politechniki Rzeszowskiej, a w 2014 r. otrzymał tytuł profesora nauk technicznych. W latach 2012–2016 pełnił funkcję prodziekana ds. nauki i rozwoju WBMiL, a w kadencji 2016–2020 pełnił funkcję prorektora ds. nauki Politechniki Rzeszowskiej. Od 2015 r. kieruje Katedrą Konstrukcji Maszyn Politechniki Rzeszowskiej. Jest współautorem i autorem ponad 400 opracowań i publikacji naukowych, w tym kilku książek i monografii, patentów, zgłoszeń patentowych oraz wdrożeń przemysłowych. Wypromował 12 doktorów nauk technicznych.

Obszary zainteresowań to: metrologia geometryczna i fizyczna, modelowanie numeryczne 3D-CAD, druk 3D, systemy cyberfizyczne, inżynieria medyczna, technologie i narzędzia dla Industry 4.0/5.0 oraz Smart Manufacturing.

Ekspert Polskiego Komitetu Normalizacyjnego oraz Polskiej Komisji Akredytacyjnej, członek Rady do spraw innowacji w szkolnictwie wyższym i nauce przy Ministerstwie Nauki, członek Rady Naukowo-Programowej Podkarpackiego Centrum Nauki „Łukasiewicz”, członek Komitetu Budowy Maszyn Polskiej Akademii Nauk, członek sekcji TC 261/WG 2 Additive manufacturing ISO.

Określenie obszaru merytorycznego metrologii fizycznej

Metrologia jest pewnego rodzaju wyznacznikiem postępu technicznego i cywilizacyjnego człowieka. Określenie wielkości fizycznych związane było z życiem człowieka, zanim jeszcze pojawiła się potrzeba pomiaru tych wielkości. Świadomość pomiaru wynikła z pewnego rodzaju wartościowania związanego społecznie ze świadomością posiadania, gromadzenia, wymiany rzeczowej czy handlowej i tym samym z wynalezieniem pieniądza oraz określeniem jego wartości. Pomiar wielkości fizycznych związany jest również z rozwojem cywilizacji, w tym rolnictwa i techniki oraz skupisk ludzkich, w tym osad, miast i państw. Analizując znaleziska archeologiczne, można natrafić na wiele obiektów służących do pomiaru wielkości fizycznych, takich jak: masa czy objętość, w postaci prostych wag czy wykonanych w kamieniu wzorców objętości z korkowanymi otworami u dołu, służącymi do pomiaru objętości materiałów sypkich lub płynów. Przez wiele wieków pomiar wielkości fizycznych był podstawą rozwoju cywilizacji i podstawowym obszarem szeroko rozumianej metrologii. Na obecnym etapie rozwoju nauki i techniki nastąpiła specjalizacja wielu obszarów, w tym metrologii. Biorąc to pod uwagę, można się zastanawiać nad wyodrębnieniem definicji metrologii fizycznej, zwłaszcza, że jest to pojęcie bardzo szerokie i trudne do zdefiniowania w jednoznaczny sposób. Można uznać, że jest to dział nauki i techniki dotyczący pomiarów i ich zastosowań, w aspekcie teoretycznym i praktycznym w odniesieniu do wielkości fizycznych [1]. W takim przypadku należy określić, co to jest wielkość fizyczna, jaką liczbę wielkości można brać pod uwagę i jaki zakres pomiarów należy wykonać, aby określić jednoznacznie wynik. Ogólnie przyjmuje się, że wielkości fizyczne określane są przez właściwości fizyczne ciała, substancji lub zjawiska, które można określić ilościowo, zmierzyć lub uzyskać w wyniku analiz i przekształceń

teoretycznych. Występują również zależności między wielkościami fizycznymi wyrażane wzorami wielkościowymi, które można określić w sposób pośredni na podstawie danych pochodzących z procesu pomiarowego. Wartości wielkości fizycznych są wyrażane za pomocą liczby i jednostki miary, co jest bezpośrednio związane z pomiarami i identyfikacją tych wielkości [2].

Kontynuując te rozważania, należy się na wstępie zastanowić, co może wchodzić w zakres metrologii fizycznej, biorąc pod uwagę ogrom zagadnienia i inne wyszczególnione w ramach projektu obszary, które w wielu przypadkach przenikają się i korzystają z pomiarów wielkości fizycznych. Można tu wyliczyć: metrologię elektryczną, metrologię medyczną, metrologię optyczną, metrologię przemysłową, metrologię wielkości geometrycznych i metrologię współrzędnościową. Pojawia się pytanie, czy analizę stanu zagadnienia wielkości fizycznych należy traktować jako kompilację pozostałych obszarów metrologicznych, czy może eliminację z wymienionych działów metrologii fizycznej. Na pierwszym etapie opracowania aktualnego stanu metrologii w Polsce będzie to trudne do określenia, jednak może stanowić podstawę do usystematyzowania zagadnień metrologicznych w odniesieniu do potrzeb gospodarki opartej na wiedzy.

W kontekście metrologii fizycznej w pierwszym etapie należy określić wielkości fizyczne podstawowe i pochodne z punktu widzenia realizacji prac badawczych, procesów przemysłowych, budowy i wzorcowania aparatury pomiarowej oraz obrotu surowcami. Wielkość fizyczna to cecha czy właściwość obiektu, zjawiska, ciała lub substancji, którą można określić jakościowo i ilościowo za pomocą liczby i odniesienia. Wartości ilościowe wyrażane są poprzez podanie liczby i jednostki miary. Pomiar właściwy danej wielkości jest to zabieg poznawczy, którego wynikiem jest znalezienie miary liczbowej tej wielkości w określonych jednostkach. Z punktu widzenia operacyjnego pomiar to czynności, które należy wykonać w celu wyznaczenia wartości wielkości fizycznej danego obiektu [1, 2]. Do wielkości fizycznych podlegających pomiarom należą m.in.: długość, czas, temperatura i masa. Pomiar danej wielkości polega na jej porównaniu z wzorcem. Im bardziej dokładny jest przyrząd, tym bardziej precyzyjny jest pomiar. Każdy wynik pomiaru obarczony jest niepewnością pomiaru.

Metrologia wielkości fizycznych jest tak powszechna jak codzienne funkcjonowanie człowieka i stanowi kluczowy element gospodarki

zarówno w skali mikro, jak i makro, np.: podczas codziennych zakupów produktów spożywczych czy też w trakcie międzynarodowych makrotransferów surowców do produkcji paliw. W jednym i drugim przypadku rozliczenia finansowe dokonywane są na podstawie zmierzonej lub zadeklarowanej masy lub objętości. Metrologia wielkości fizycznych związana jest również z tworzeniem prawodawstwa, gdzie określone normy i przepisy odnoszą się do pomiaru wielkości fizycznych, takich jak: masa czy prędkość (np. pojazdu), a zgodność z przepisami kontrolowana jest przez uprawnione organy wyposażone w odpowiednią aparaturę pomiarową.

Biorąc pod uwagę powyższe, można uznać, że przedmiotowe opracowanie jest wstępem do szerszej dyskusji związanej z metrologią, w tym metrologią fizyczną, procesami pomiarowymi oraz ich wpływem na gospodarkę i funkcjonowanie społeczeństwa. Należy również uwzględnić procesy automatyzacji metrologii, pomiary bez udziału czynnika ludzkiego, pomiary stacjonarne, mobilne centra pomiarowe, wzorcowanie urządzeń i systemów pomiarowych, ich niezawodność i żywotność oraz oczywiście rolę człowieka w systemie metrologicznym.

2.1. Podmioty zajmujące się metrologią fizyczną

Metrologia fizyczna stanowi bardzo szerokie zagadnienie, z tego względu jej analiza i sporządzenie diagnozy stanu w Polsce wymaga na wstępie określenia pewnych obszarów, które dadzą możliwość usystematyzowania tego zagadnienia. Można tu wyszczególnić obszary pomiarów bieżących stosowanych podczas realizacji codziennych zadań w procesie funkcjonowania społeczeństwa (np. pomiar objętości zużycia gazu w gospodarstwie domowym czy pomiar objętości paliwa podczas tankowania), pomiarów realizowanych podczas badań naukowych, w tym również badań nad nowymi metodami pomiarowymi wielkości fizycznych, oraz pomiarów realizowanych przez instytucje wzorcowe i systemy pomiarowe. Można uznać, że z punktu widzenia identyfikacji długofalowych potrzeb i kierunków działań strategicznych w zakresie polskiej metrologii oraz jej rozwoju, należy przeprowadzić analizę w zakresie obszaru badań naukowych i wzorcowania, ze szczególnym uwzględnieniem nie tylko samego procesu pomiarowego, ale rozwoju tych procesów i metod na podstawie badań naukowych. Metrologia wielkości fizycznych odnosi się do wielu dziedzin nauki i jest wykorzystywana w różnych dyscyplinach, z tego względu analizie poddano uczelnie znajdujące się w wykazie uczelni publicznych nadzorowanych przez ministra właściwego ds. szkolnictwa wyższego tzn. publiczne uczelnie akademickie i zawodowe [3, 4].

W pierwszym etapie analizie poddano uczelnie techniczne, które z racji prowadzonych badań w obszarze nauk inżynieryjno-technicznych korzystają z aparatury pomiarowej i systemów pomiarowych. Zestawienie przedstawione na stronie internetowej Ministerstwa

Edukacji i Nauki (MEiN) obejmuje w Polsce 17 uczelni technicznych, do których należą [3]:

1. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie,
2. Politechnika Białostocka,
3. Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich,
4. Politechnika Częstochowska,
5. Politechnika Gdańska,
6. Politechnika Koszalińska,
7. Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki,
8. Politechnika Lubelska,
9. Politechnika Łódzka,
10. Politechnika Opolska,
11. Politechnika Poznańska,
12. Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza,
13. Politechnika Śląska,
14. Politechnika Świętokrzyska,
15. Politechnika Warszawska,
16. Politechnika Wrocławska,
17. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

Analizując struktury uczelni politechnicznych, można zauważyć, że przez wiele lat ich funkcjonowania bazują one na pomiarach wielkości fizycznych w takich dyscyplinach jak: architektura i urbanistyka, automatyka, elektronika i elektrotechnika, informatyka techniczna i telekomunikacja, inżynieria biomedyczna, inżynieria chemiczna, inżynieria lądowa i transport, inżynieria materiałowa, inżynieria mechaniczna, inżynieria środowiska oraz górnictwo i energetyka. Działalność ta wynika z tradycyjnego rozwoju uczelni w zakresie nauk inżynieryjno-technicznych związanych z utrzymaniem potencjału badawczego. Obszar metrologii fizycznej związany jest z wykorzystywaniem aparatury pomiarowej do realizacji badań naukowych, opracowywania rozwiązań dla przemysłu oraz pracy dydaktycznej. Pomiary podstawowych wielkości fizycznych wchodzi w zakres podstawowego etapu kształcenia, natomiast w kolejnych etapach działalności dydaktycznej i naukowej stosowana jest najczęściej zaawansowana aparatura pomiarowa, którą również dysponują przedsiębiorstwa przemysłowe. Właściwie wszystkie uczelnie oferują możliwości realizacji badań komercyjnych w zakresie pomiarów wielkości fizycznych. Problemem jednak w wielu przypadkach jest brak źródeł finansowania w obszarze wzorcowania aparatury pomiarowej

znajdującej się w uczelnianych laboratoriach. Z tego względu możliwa jest realizacja pomiarów oraz analiza ich wyników, jednak bez oczekiwanych często przez podmioty zamawiające świadectw.

W przypadku uczelni technicznych w ostatnich latach można zauważyć pewne rozszerzone podejście do badań w obszarze nauk podstawowych, w tym również do pomiarów wielkości fizycznych, co znajduje odzwierciedlenie w pracach nad tworzeniem nowych rozwiązań systemów pomiarowych w zakresie metrologii stosowanej w warunkach przemysłowych.

Uczelnie techniczne w wielu obszarach metrologii współpracują z przemysłem, szczególnie w zakresie interdyscyplinarnych procesów automatyzacji pomiarów wykorzystujących siećową infrastrukturę do obróbki danych pomiarowych i ich transferu. W tym przypadku należy mieć na uwadze bezpieczeństwo danych, które stanowią własność określonych podmiotów, a także mogą mieć charakter danych wrażliwych.

Ciekawym modelem wynikającym ze współpracy uczelni i przedsiębiorstwa jest realizacja pomiarów i wzorcowanie aparatury z zastosowaniem mobilnych modułów pomiarowych, które jako samodzielne jednostki mogą być dostarczone na miejsce wykonywania pomiarów. Przykładem jest rafineria, gdzie wspomniane jednostki realizują swoje zadania i po zakończeniu zostają przetransportowane do kolejnej lokalizacji. Dzięki temu skraca się znacznie czas wzorcowania, ponieważ nie ma potrzeby transportowania wybranych elementów aparatury pomiarowej do jednostki wzorcującej znajdującej się w innej, często znacznie oddalonej, lokalizacji. Przy uwzględnieniu skalowalności i dużej liczby urządzeń do wzorcowania mogą zostać również zmniejszone koszty tego typu operacji. Przykładem takiego rozwiązania jest mobilne laboratorium GC Calibron, składające się z wielu modułów diagnostycznych i pomiarowych. Można się w tym momencie zastanawiać, gdzie jest granica pomiędzy metrologią przemysłową, metrologią elektryczną i metrologią fizyczną, jednak interdyscyplinarność wielu dziedzin i obszarów nauki powoduje, że te granice coraz bardziej się zacierają.

W kolejnym etapie diagnozy można analizować obszar nauk podstawowych prowadzonych w ramach działalności uniwersyteckiej. Z danych MEiN wynika, że w Polsce funkcjonują uniwersytety, w których można wyróżnić wydziały, instytuty lub centra związane z naukami fizycznymi i przetwarzaniem danych fizycznych pochodzących z procesów pomiarowych, zgodnie z poniższym zestawieniem [3]:

1. Uniwersytet Warszawski, Wydział Matematyki, Informatyki i Mechaniki,
2. Uniwersytet w Białymstoku, Wydział Fizyki,
3. Uniwersytet Gdański, Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki, Międzyuczelniany Wydział Biotechnologii Uniwersytetu Gdańskiego i Gdańskiego Uniwersytetu Medycznego,
4. Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Fizyki, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych,
5. Uniwersytet Jagielloński w Krakowie, Wydział Farmaceutyczny, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Wydział Biochemii, Biofizyki i Biotechnologii, Wydział Geografii i Geologii,
6. Uniwersytet Łódzki, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej,
7. Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, Wydział Biologii i Biotechnologii, Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki, Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej,
8. Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Wydział Farmaceutyczny, Interdyscyplinarne Centrum Nowoczesnych Technologii,
9. Uniwersytet Opolski, Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki, Wydział Przyrodniczo-Techniczny,
10. Uniwersytet Szczeciński, Wydział Nauk Ścisłych i Przyrodniczych, Wydział Kultury Fizycznej i Zdrowia,
11. Uniwersytet Śląski w Katowicach, Wydział Nauk Przyrodniczych, Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych,
12. Uniwersytet Rzeszowski, Kolegium Nauk Przyrodniczych, w tym: Instytut Biotechnologii, Instytut Nauk Fizycznych, Instytut Inżynierii Materiałowej,
13. Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Nauk Technicznych, Wydział Biologii i Biotechnologii, Wydział Rolnictwa i Leśnictwa,
14. Uniwersytet Wrocławski, Wydział Fizyki i Astronomii, Wydział Nauk o Ziemi i Kształtowania Środowiska,
15. Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie, Wydział Biologii i Nauk o Środowisku, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy. Szkoła Nauk Ścisłych,
16. Uniwersytet Zielonogórski, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Wydział Fizyki i Astronomii, Wydział Informatyki, Elektrotechniki i Automatyki, Wydział Mechaniczny,

17. Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Wydział Fizyki, Wydział Inżynierii Materiałowej, Wydział Mechatroniki, Wydział Nauk Biologicznych, Wydział Nauk Geograficznych, Wydział Nauk o Zdrowiu i Kulturze Fizycznej,
18. Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach, Wydział Nauk Ścisłych i Przyrodniczych,
19. Akademia Piotrkowska,
20. Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Wydział Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Środowiska, Wydział Zarządzania i Transportu,
21. Uniwersytet Radomski im. Kazimierza Pułaskiego, Wydział Inżynierii Chemicznej i Towaroznawstwa, Wydział Mechaniczny, Wydział Transportu, Elektrotechniki i Informatyki.

Analizując struktury poszczególnych uniwersytetów, można zauważyć, że większość ma jednostki związane z naukami fizycznymi. W zestawieniu znajdują się również uniwersytety, które powstały, szczególnie w ostatnich dwóch dekadach, w wyniku połączenia kilku uczelni o różnych profilach, m.in. z obszaru dyscyplin inżynieryjno-technicznych czy rolniczych. W tym przypadku zakres zastosowań metrologii fizycznej jest podobny do tego na uczelniach politechnicznych.

Kolejną grupę, w której można wyszczególnić działania z obszaru metrologii fizycznej i szeroko rozumianej metrologii, tworzą następujące jednostki uczelni rolniczych i przyrodniczych [3]:

1. Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Wydział Technologii Drewna, Wydział Hodowli, Bioinżynierii i Ochrony Zwierząt, Wydział Technologii Żywności, Wydział Inżynierii Produkcji,
2. Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Rolniczo-Ekonomiczny, Wydział Leśny, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Wydział Biotechnologii i Ogrodnictwa, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Wydział Technologii Żywności,
3. Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Wydział Inżynierii Produkcji, Wydział Agrobiotechnologii, Wydział Nauk o Zwierzętach i Biogospodarki, Wydział Ogrodnictwa i Architektury Krajobrazu,
4. Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Rolnictwa, Ogrodnictwa i Bioinżynierii, Wydział Leśny i Technologii Drewna, Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej,

5. Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Przyrodniczo-Technologiczny, Wydział Gospodarki Przestrzennej i Architektury Krajobrazu, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Wydział Biotechnologii i Nauk o Żywności.

Wprowadzane w ostatnich latach zmiany w szkolnictwie wyższym w zakresie dziedzin i dyscyplin naukowych w Polsce spowodowały pewne przekonfigurowanie działalności naukowej w ramach niektórych wydziałów oraz instytutów, co w pewnym stopniu może utrudnić lokalizację miejsc, w których badane czy aplikowane są zagadnienia związane z metrologią fizyczną. Pojawia się znowu pytanie, czy takie określenie w dobie interdyscyplinarności badań i procesów pomiarowych ma jeszcze znaczenie.

Do grupy podmiotów naukowo-dydaktycznych zajmujących się zagadnieniami metrologii należy dodać również tzw. uczelnie resortowe związane z wojskowością, policją czy też pożarnictwem, w których od wielu lat rozwijane są trendy badawcze w zakresie nauk inżynierjno-technicznych [5–7]. Można tu wymienić następujące uczelnie:

1. Akademia Sztuki Wojennej w Warszawie,
2. Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie,
3. Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni,
4. Akademia Wojsk Lądowych we Wrocławiu,
5. Lotnicza Akademia Wojskowa w Dęblinie,
6. Akademia Pożarnicza w Warszawie,
7. Akademia Policji w Szczytnie.

Zagadnienia pomiarowe w przypadku uczelni resortowych badane są często na poziomie nauk podstawowych, ze szczególnym uwzględnieniem ich aplikacji dla bezpieczeństwa narodowego. Z tego względu dostęp do informacji o profilu badań naukowych może być ograniczony.

Zestawienie uczelni dostępne na stronie MEiN obejmuje również uczelnie ekonomiczne, w których występują wydziały, potencjalnie korzystające z narzędzi i procesów metrologicznych. Są to [3]:

1. Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach, Wydział Gospodarki Przestrzennej i Transformacji Regionów,
2. Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie, Kolegium Nauk o Zarządzaniu i Jakości,
3. Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu, Instytut Nauk o Jakości,
4. Szkoła Główna Handlowa w Warszawie, Kolegium Nauk o Przedsiębiorstwie,

5. Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu, Wydział Inżynierii Produkcji.

W tym przypadku, jak widać z zestawienia, realizacja pomiarów w szerokim kontekście związana jest z działalnością gospodarczą, funkcjonowaniem przedsiębiorstw oraz procesami zapewnienia jakości, co ściśle łączy się z określeniem kryteriów i miar odpowiadających założonym parametrom jakościowym produktów czy usług.

Obszar nauk o fizyce i metrologii fizycznej związany jest również z kształceniem kadry pedagogicznej w zakresie nauk ścisłych. Z tego względu należy wymienić również zajmujące się tymi zagadnieniami uczelnie pedagogiczne, do których należą [3]:

1. Akademia Pedagogiki Specjalnej im. Marii Grzegorzewskiej w Warszawie,
2. Uniwersytet Jana Długosza w Częstochowie, Wydział Nauk Ścisłych, Przyrodniczych i Technicznych,
3. Uniwersytet Pedagogiczny im. Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie, Wydział Nauk Ścisłych i Przyrodniczych,
4. Uniwersytet Pomorski w Słupsku, Instytut Nauk Ścisłych i Technicznych,
5. Uniwersytet Przyrodniczo-Humanistyczny w Siedlcach.

W przedstawionym zestawieniu znajdują się potencjalne jednostki, których działalność może wykorzystywać procesy metrologiczne, jednak można zauważyć, że w obszarze nauk ścisłych dominuje kształcenie uniwersyteckie.

Analizując wykaz uczelni, zauważyć można, że metrologia fizyczna może być wykorzystywana w prowadzeniu badań i kształceniu w zakresie wychowania fizycznego. Jest to szczególnie istotne w ostatnich latach, kiedy analiza kondycji fizycznej społeczeństwa jest rozpatrywana przez pryzmat wskaźników pochodzących nie tylko z pomiarów fizycznych wydolności organizmu, ale również analizy parametrów ciała ludzkiego w odniesieniu do aktywności fizycznej, ergonomii pracy, wypoczynku i sposobu odżywiania. Biorąc to pod uwagę, w obszarze badawczym i naukowym dotyczącym szeroko rozumianej metrologii można wyróżnić następujące uczelnie wychowania fizycznego [3]:

1. Akademia Wychowania Fizycznego i Sportu im. Jędrzeja Śniadeckiego w Gdańsku,
2. Akademia Wychowania Fizycznego im. Jerzego Kukuczki w Katowicach,

3. Akademia Wychowania Fizycznego im. Bronisława Czecha w Krakowie,
4. Akademia Wychowania Fizycznego im. Eugeniusza Piaseckiego w Poznaniu,
5. Akademia Wychowania Fizycznego Józefa Piłsudskiego w Warszawie,
6. Akademia Wychowania Fizycznego im. Polskich Olimpijczyków we Wrocławiu.

Obserwując zagadnienia badawcze prowadzone przez akademie wychowania fizycznego, można znaleźć pewne elementy metrologii fizycznej. Są one odniesione jednak do określonych zastosowań związanych z profilem badań i profilem kształcenia.

Istotną liczbowo grupą jednostek związanych z kształceniem i w wielu przypadkach prowadzeniem działalności naukowej czy komercyjnej, są publiczne uczelnie zawodowe znajdujące się w wykazie uczelni publicznych nadzorowanych przez Ministra właściwego ds. szkolnictwa wyższego [4]:

1. Akademia im. Jakuba z Paradyża w Gorzowie Wielkopolskim,
2. Karkonoska Akademia Nauk Stosowanych w Jeleniej Górze,
3. Małopolska Uczelnia Państwowa im. rotmistrza Witolda Pileckiego w Oświęcimiu,
4. Akademia Mazowiecka w Płocku,
5. Akademia Bialska im. Jana Pawła II,
6. Akademia Nauk Stosowanych Stefana Batorego w Skierniewicach,
7. Akademia Nauk Stosowanych im. Stanisława Staszica w Pile,
8. Państwowa Uczelnia Zawodowa im. prof. Stanisława Tarnowskiego w Tarnobrzegu,
9. Państwowa Akademia Nauk Stosowanych we Włocławku,
10. Państwowa Uczelnia Zawodowa im. Ignacego Mościckiego w Ciechanowie,
11. Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Chełmie,
12. Akademia Nauk Stosowanych w Elblągu,
13. Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Głogowie,
14. Akademia Nauk Stosowanych im. Hipolita Cegielskiego w Gnieźnie
Uczelnia Państwowa,
15. Uniwersytet Kaliski im. Prezydenta Stanisława Wojciechowskiego,
16. Akademia Nauk Stosowanych w Koninie,
17. Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Koszalinie,
18. Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Krośnie,
19. Collegium Witelona Uczelnia Państwowa w Legnicy,

20. Akademia Nauk Stosowanych im. Jana Amosa Komeńskiego w Lesznie,
21. Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu,
22. Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Nysie,
23. Akademia Nauk Stosowanych w Raciborzu,
24. Państwowa Uczelnia Zawodowa im. prof. Edwarda F. Szczepanika w Suwałkach,
25. Akademia Tarnowska,
26. Akademia Nauk Stosowanych w Wałczu,
27. Akademia Nauk Stosowanych Angelusa Silesiusa w Wałbrzychu,
28. Akademia Łomżyńska,
29. Państwowa Wyższa Szkoła Techniczno-Ekonomiczna im. ks. Bronisława Markiewicza w Jarosławiu,
30. Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemyśle,
31. Podhalańska Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nowym Targu,
32. Uczelnia Państwowa im. Jana Grodka w Sanoku,
33. Akademia Zamojska.

Ostatnia reforma szkolnictwa wyższego spowodowała, że te uczelnie w wielu przypadkach rozpoczęły działalność naukową, zmieniając profil działalności z określonego na wstępie kształcenia zawodowego na poziom wyższy. Część z przedstawionych w wykazie uczelni, w ostatnich latach, zmieniła również swoją nazwę, dostosowując ją do profilu działalności naukowej i dydaktycznej. W związku z powyższym należy zauważyć, że wspomniane uczelnie, prowadząc badania w zakresie dziedzin inżynierjno-technicznych, a także ścisłych nauk podstawowych, posiadają na swoim wyposażeniu aparaturę pomiarową pozwalającą na analizę wielkości fizycznych. Profil działalności tych uczelni ukierunkowany jest w większości na kształcenie praktyczne, stąd realizacja badań i pomiarów wielkości fizycznych na poziomie nauk podstawowych odnosi się do obszarów aplikacyjnych.

Kolejną grupą instytucji zajmujących się zagadnieniami metrologicznymi są instytuty naukowe zgromadzone m.in. w Sieć Badawczą Łukasiewicz, w skład której wchodzi następujące placówki [8]:

1. Instytut Chemii Przemysłowej,
2. Instytut Elektrotechniki,
3. Instytut Lotnictwa,
4. Instytut Organizacji i Zarządzania w Przemśle ORGMASZ,
5. Instytut Przemysłu Organicznego,
6. Instytut Technologii Eksploatacji,

7. Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki,
8. Instytut Tele- i Radiotechniczny,
9. Warszawski Instytut Technologiczny,
10. Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP,
11. Przemysłowy Instytut Motoryzacji,
12. Poznański Instytut Technologiczny,
13. Łódzki Instytut Technologiczny,
14. Instytut Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników,
15. Instytut Nowych Syntezy Chemicznych,
16. Polski Ośrodek Rozwoju Technologii,
17. Instytut Ciężkiej Syntezy Organicznej „Blachownia”,
18. Górnośląski Instytut Technologiczny,
19. Instytut Metali Nieżelaznych,
20. Instytut Technik Innowacyjnych EMAG,
21. Krakowski Instytut Technologiczny,
22. Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych.

Istnieją również inne instytuty znajdujące się w wykazie Rady Głównej Instytutów Badawczych [8] i do tej grupy można również dołączyć wojskowe instytuty badawcze, do których należą:

1. Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia,
2. Wojskowy Instytut Łączności,
3. Wojskowy Instytut Chemii i Radiometrii,
4. Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej,
5. Wojskowy Instytut Techniki Inżynieryjnej,
6. Wojskowy Instytut Medycyny Lotniczej,
7. Wojskowy Instytut Medyczny,
8. Wojskowy Instytut Higieny i Epidemiologii,
9. Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych.

Działalność naukowa instytutów badawczych skupia się szczególnie na wykonywaniu zadań badawczych i komercyjnych dla gospodarki oraz przedsiębiorstw przemysłowych, a także na realizacji projektów w ramach programów krajowych i międzynarodowych. Realizacja tego typu zadań związana jest z użytkowaniem aparatury pomiarowej, jednak koncentracja na projektach aplikacyjnych może powodować zmniejszenie możliwości realizacji prac naukowych w obszarze metrologii fizycznej jako obszaru podstawowego. W wielu przypadkach, szczególnie w odniesieniu do tzw. instytutów resortowych, działalność naukowa objęta jest tajemnicą, co

uniemożliwia jej interpretację – z przyczyn bezpieczeństwa, jest to oczywiście zrozumiałe.

Należy się również zastanowić nad miejscem metrologii fizycznej w obszarze fizyki jądrowej, ze szczególnym uwzględnieniem Narodowego Centrum Badań Jądrowych. Obecnie są prowadzone prace dotyczące gromadzenia w układzie centralnym informacji o podmiotach, które potencjalnie mogą się zajmować energetyką jądrową i właśnie zagadnienia z obszaru metrologii fizycznej mogą mieć kluczowe znaczenie dla rozwoju tego obszaru badawczego.

2.2. Zasoby techniczno-aparaturowe

Zasoby aparaturowe jednostek naukowo-badawczych oraz dydaktycznych powiązane są z realizacją badań i prac zleconych oraz, w przypadku uczelni o działalności dydaktycznej, w obrębie dyscyplin naukowych wynikających z ewaluacji działalności naukowej. Analizując potencjał aparaturowy, można zauważyć, że w momencie rozpoczęcia realizacji infrastrukturalnych projektów współfinansowanych z UE, jednostki badawcze i uczelnie wyposażyły się w nowoczesną aparaturę kontrolną i pomiarową na światowym poziomie. Należy również dodać, że znaczna większość tej aparatury służy realizacji zadań badawczych czy dydaktycznych w obszarze realizacji pomiarów, z których istotną część należy uznać za pomiary wielkości fizycznych. Jak już wspomniano, pewną cechą charakterystyczną uczelni oraz placówek badawczych jest wykonywanie pomiarów w określonych obszarach badawczych lub kształcenie w zakresie realizacji pomiarów. Z tego względu w obszarze pomiarów wielkości fizycznych i wzorcowania urządzeń pomiarowych należy się skupić na podmiotach znajdujących się w bazie Polskiego Centrum Akredytacji (PCA). Baza PCA obejmuje wiele jednostek prowadzących swoją działalność m.in. jako: laboratoria badawcze, laboratoria medyczne, laboratoria wzorcujące, jednostki certyfikujące osoby, jednostki certyfikujące systemy, jednostki certyfikujące wyroby, jednostki inspekcyjne, organizatorzy badań oraz producenci materiałów odniesienia [9]. Biorąc pod uwagę możliwość realizacji procesów pomiarowych, we wspomnianej bazie można znaleźć ok. 1 800 jednostek, w tym podmioty samodzielne, firmy, instytucje, instytuty i jednostki uczelniane. Można również wyszczególnić

w bazie PCA 218 laboratoriów wzorcujących i 238 jednostek certyfikujących wyroby, pracujących zgodnie z normą PN-EN ISO/IEC 17025 – Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących [10–12].

Podmioty te dysponują odpowiednimi zasobami aparaturowymi dostosowanymi do potrzeb realizacji ich zadań. Informacje o tych jednostkach są dostępne na stronie PCA wraz z odnośnikami do stron internetowych i danymi teleadresowymi. Przeglądając strony internetowe poszczególnych podmiotów, można pozyskać informacje dotyczące profilu działalności i aparatury, którą dysponują. Pojawia się jednak pytanie, czy z punktu widzenia poszukiwania informacji o danym dziale metrologicznym pozwala to w szybki sposób znaleźć kontrahenta dysponującego odpowiednimi zasobami kadrowymi i sprzętowymi. Wygląda jednak na to, że przeszukiwanie zasobów internetowych w ten sposób jest mało efektywne. Z tego względu powstają inicjatywy tworzenia baz danych zasobów w zakresie pomiarów, które pozwoliłyby w szybki sposób znaleźć odpowiednie informacje dotyczące zakresu możliwych usług w obszarze badawczym, w tym metrologii. Jak można zauważyć trudno w tych zasobach znaleźć szczegółowe informacje np. w zakresie metrologii fizycznej, zwłaszcza że jest to obszar trudny do jednoznacznego zdefiniowania.

2.3. Kadra metrologiczna, kompetencje metrologiczne i struktura zatrudnienia w obszarze metrologii fizycznej

Zagadnienia związane z kadrą metrologiczną w Polsce, szczególnie w obszarze metrologii fizycznej (tak samo jak sama metrologia fizyczna) są trudne do jednoznacznego zdiagnozowania. W tym przypadku możemy się posłużyć wybranymi bazami danych, w tym źródłami internetowymi uczelni, instytutów badawczych czy centrów akredytacji. Jest to zadanie pracochłonne i niepozwalające odnieść się jednoznacznie do kontekstu kadry związanej z metrologią fizyczną. Podobnie można przeszukiwać ww. zasoby, wpisując hasła typu „metrologia fizyczna” czy „pomiar wielkości fizycznych”. Jednym ze sposobów analizy kadry metrologicznej może być przeszukiwanie zasobów Ośrodka Przetwarzania Informacji – Państwowego Instytutu Badawczego (OPI PIB) w obszarze Nauka Polska, gdzie zawarte są informacje

dotyczące: naukowców co najmniej ze stopniem doktora, polskich uczonych pracujących i mieszkających za granicą, obcokrajowców – członków Polskiej Akademii Nauk i Polskiej Akademii Umiejętności, zagranicznych naukowców recenzujących polskie prace naukowe, osób bez stopni naukowych, gdy kierują pracami badawczymi lub pełnią funkcje kierownicze w jednostkach zaplecza naukowego [13]. Przeszukując wspomnianą bazę, stosując słowa kluczowe, można zauważyć, że po wpisaniu słowa metrologia pojawia się 766 rekordów w wielu dyscyplinach naukowych opracowanych według klasyfikacji Komitetu Badań Naukowych (KBN), do których m.in. należą: budowa i eksploatacja maszyn, budownictwo, metrologia długości i kąta, metrologia elektryczna, metrologia techniczna, systemy jakości, technologia maszyn, automatyka – badania i pomiary, architektura tekstyliów, materiałoznawstwo, towaroznawstwo, metrologia elektroniczna, inżynieria jakości, metrologia wielkości geometrycznych, cyfrowe systemy pomiarowe, miernictwo magnetyczne, metrologia w zakresie papiernictwa, konstrukcja elektronicznych mierników cyfrowych i systemy pomiarowo-informacyjne. Biorąc pod uwagę powyższe, można zauważyć szerokie spektrum kadry naukowej związanej z metrologią dla różnych obszarów badawczych. Jednak wpisując w tę samą wyszukiwarkę słowa kluczowe „metrologia fizyczna” wynik przeszukiwania wynosi zero. Nie oznacza to, że nie ma kadry, która zajmuje się metrologią fizyczną, tylko kadra ta zajmuje się pomiarami wielkości fizycznych dla określonych zastosowań badawczych oraz aplikacyjnych.

Biorąc pod uwagę kompetencje metrologiczne kadry, pojawia się pytanie, jakie mają być jej kompetencje w zakresie metrologii fizycznej. Rodzi to znowu pytanie, czy takie sformułowanie obszaru metrologii jest właściwe z punktu widzenia procesów pomiarowych i instytucji zajmujących się metrologią lub instytucji odpowiedzialnych za tworzenie baz danych i baz kompetencji w zakresie metrologii. Można tu odnieść wrażenie, że metrologia fizyczna jest niepotrzebna, jednak jest ono mylne, ponieważ metrologia fizyczna jest tak powszechna i tak potrzebna, że została wchłonięta przez wiele wyspecjalizowanych obszarów metrologii. Konkludując, można powiedzieć, że kadre pracującą w obszarze procesów metrologicznych charakteryzuje wysoki poziom wyspecjalizowania w zakresie prowadzonej działalności naukowej, badawczej, usługowej i komercyjnej.

2.4. Identyfikacja problemów i potrzeb

Analiza obszaru metrologii fizycznej w Polsce pozwala zauważyć, że samo to pojęcie ma charakter bardzo ogólny, co utrudnia opracowanie szczegółowej diagnozy. Biorąc to pod uwagę, Główny Urząd Miar w ramach działań centralnych, w tym w związku z budową Świętokrzyskiego Kampusu Laboratoryjnego, który ma pełnić funkcję ośrodka integrującego i wspierającego rozwój metrologii w Polsce, może podjąć prace związane ze zdefiniowaniem głównych obszarów metrologii, w tym metrologii fizycznej. Zdefiniowanie to może być podstawą do utworzenia bazy danych opartej na tych głównych obszarach. Powinna ona odzwierciedlać dyscypliny naukowe i związane z nimi prace badawcze i przemysłowe.

Zasadniczym problemem w budowaniu tego typu baz jest pozyskiwanie danych od instytucji badawczych, uczelni i podmiotów prywatnych. Kolejnym problemem jest sformułowanie kluczowych obszarów związanych z kontekstem przeszukiwania, które z jednej strony odnosiłyby się do kompetencji metrologicznych, a z drugiej przyniosłyby konkretne efekty gospodarcze. Obecnie jednym z istotnych czynników kosztowych jest czas poszukiwania i dostępu do informacji. Być może celowe jest utworzenie portalu metrologicznego, który pozwalałby na szybkie uzyskiwanie informacji o podmiotach zajmujących się danymi obszarami metrologii i jednocześnie pozwalałby na ich sieciowanie. Podobne funkcje mogłyby oferować w odniesieniu do kadry o określonych kompetencjach metrologicznych, jak też do zastosowania systemów i procesów pomiarowych.

3.1. Przemysł i zaawansowana produkcja

Produkcja przemysłowa oparta jest na wykorzystaniu danych z systemów pomiarowych w sposób pośredni i bezpośredni. Pierwszym etapem przygotowania produkcji jest określenie parametrów wyrobu odnoszących się do założeń konstrukcyjnych, eksploatacyjnych, jak również produkcyjnych. Dodatkowo na każdym etapie produkcji niezbędne jest kontrolowanie założonych parametrów z wykorzystaniem pomiarów wielkości fizycznych. Tradycyjne podejście do procesów projektowania i wytwarzania jest oparte na wyszczególnieniu etapów zaplanowanych procesów i przypisaniu im odpowiednich form kontroli jakości realizowanych poprzez pomiar. W takich przypadkach kontrola jakości oparta jest w większości na pomiarach wykonywanych po operacjach technologicznych, kiedy otrzymywany jest już wynik danego procesu i kiedy to reakcja na ewentualne niezgodności danego wyrobu jest trudna lub niemożliwa ze względu na specyfikę procesu technologicznego. Odnosi się to dla przykładu do druku 3D, ponieważ proces ten opiera się na przygotowaniu danych niezbędnych do wytworzenia elementu, który może być gotowym wyrobem lub półfabrykatem. Wiele rodzajów tej technologii stanowi zamknięty proces od momentu uruchomienia do zakończenia, w który nie można ingerować w trakcie jego realizacji. Stosując odpowiednie metody kontrolno-pomiarowe realizowane w tzw. czasie rzeczywistym, można jednak nadzorować proces przyrostowy i w przypadku zaistnienia nieprawidłowości zareagować np. przerwaniem wydruku 3D i przesłaniem w sposób automatyczny komunikatu do jednostki sterującej. W ten sposób nie dopuszcza się do realizacji całego procesu i wytworzenia wadliwego wyrobu, co z kolei przekłada się na ograniczenie kosztów i odpadów.

Niektóre metody wytwarzania przyrostowego mogłyby być wyposażone w systemy realizacji pomiarów w sposób ciągły, dzięki czemu byłoby możliwe reagowanie na odstępstwa od zadanej geometrii oraz wprowadzanie korekty kształtu i wymiarów podczas procesu technologicznego. Takie rozwiązanie wymaga jednak wprowadzenia automatyzacji programowej i sprzętowej do procesu wytwarzania, zmiany podejścia do projektowania i obróbki danych przeznaczonych do wykonania danego wyrobu oraz integracji systemów wytwarzania i pomiarowych realizowanych w tzw. czasie rzeczywistym z szybką komunikacją z jednostkami nadzorującymi. W tym przypadku pojawia się problem szybkości realizacji pomiarów i wydajności systemów transferu danych oraz ilości przetwarzanych danych. Może to stanowić poważne ograniczenie w odniesieniu do przetwarzania danych pomiarowych, np. powstających w wyniku skanowania 3D. Z tego względu pojawiają się pytania dotyczące zagadnień, m.in.: jak przeprowadzić pomiar, jakie wielkości mierzyć, jak wykorzystywać wielkości fizyczne w pomiarach, jakie przyjmować wzorce i wielkości nominalne, jak określić pola tolerancji, jaki przyjąć sposób zapisu danych pomiarowych, jak szybko można przysyłać i przetwarzać dane, jakie formy komunikacji i łączności zastosować. Przedstawione zagadnienia, które są bezpośrednio i pośrednio związane z procesem gromadzenia i przetwarzania danych, stanowią wąskie gardło w zakresie interpretacji wyników pomiarów. Nowoczesny przemysł opiera się na procesach automatyzacji w zakresie nie tylko samego wytwarzania, ale również pomiarów i nadzoru produkcyjnego. Podczas planowania linii produkcyjnych należy brać pod uwagę, jakie wielkości fizyczne można zmierzyć, aby uzyskać wiarygodną interpretację założonych parametrów konstrukcyjnych i technologicznych, przy zachowaniu wymaganej szybkości przetwarzania tych danych. Transfer danych pomiarowych może być oparty chociażby na prostych i krótkich wiadomościach tekstowych między ludźmi, maszynami i robotami z wykorzystaniem założeń koncepcji TF (ang. *tweeting factory*). Wiadomości tego typu mogą być wysyłane bezpośrednio z urządzeń i czujników pomiarowych, zainstalowanych w kluczowych miejscach systemu produkcyjnego, z zastosowaniem m.in.: terminali, tabletów i smartfonów osób nadzorujących procesy produkcyjne. Dane są następnie transferowane do centralnej bazy danych, personalizowane, dzielone i udostępniane odpowiedniemu

personelowi przedsiębiorstwa, zależnie od pełnionych funkcji, łącznie z personelem kierowniczym.

Pojawia się więc kolejne pytanie dotyczące formy przedstawiania danych w odniesieniu do automatyzacji procesu produkcyjnego i procesu podejmowania decyzji, jak również kompetencji i wiedzy metrologicznej osób odpowiedzialnych za nadzorowanie produkcji. Dodatkowo należy się zastanowić, w jakiej warstwie interpretacji wyników pomiarów fizycznych powinien brać udział człowiek, a w jakiej zautomatyzowany system pomiaru i przetwarzania danych. Ilość danych gromadzonych na linii produkcyjnej i możliwość ich analizy przez człowieka stawia nowe wyzwania w zakresie systemów pomiarowych. Polegają one już nie tylko na określaniu wielkości fizycznej i jej tolerancji w odniesieniu do zgodności z założeniami konstrukcyjnymi, ale również jej interpretacji w zakresie możliwości percepcji ludzkiej oraz zastosowania algorytmów sztucznej inteligencji. Tego typu rozwiązania korzystają z narzędzi stosowanych w systemie produkcyjnym opartym na idei Przemysłu 4.0, przechodząc płynnie do rozwiązań Przemysłu 5.0, gdzie właściwie nie występuje bezpośrednia interpretacja zmierzonej wielkości fizycznej i oparcie na niej procesu decyzyjnego. Zarządzanie produkcją bazuje na integracji wielu danych pomiarowych i procesowych, które spływają w sposób ciągły, a ich interpretacja jest realizowana programowo.

Rozwój metod i procesów pomiarowych w zakresie wielkości fizycznych zmierza już nie tylko w kierunku zwiększania dokładności pomiaru, ale również w kierunku zwiększania szybkości realizacji pomiarów oraz tworzenia protokołów pomiarowych, pozwalających na ich automatyzację i integrację z cyfrowymi systemami nadzorującymi i zarządzającymi. Dodatkowymi trendami w rozwoju przemysłowej metrologii fizycznej są trwałość i niezawodność czujników, urządzeń oraz systemów pomiarowych, a także przejście z interpretacji wyników uzyskanych z pomiarów bezpośrednich wielkości fizycznych na interpretację wyników pośrednich realizowanych w trybie ciągłym i bezkontaktowym (bezstykowym). Automatyzacja procesów produkcyjnych wymaga również opracowania algorytmów przetwarzania danych pomiarowych dostosowanych do bezobsługowej pracy w trybie ciągłym.

Kolejnym elementem nowoczesnych systemów produkcyjnych jest tworzenie cyfrowych bliźniaków, które są oparte o fizyczne dane procesowe pozyskane w wyniku realizacji standardowych procesów

wytwarzania. Digitalizacja danych czy tworzenie cyfrowych bliźniaków procesów pomiarowych stanowią odrębne i niezwykle istotne wyzwania stojące przed krajową metrologią.

3.2. Robotyzacja i automatyzacja procesów pomiarowych

Robotyzacja i automatyzacja procesów pozwala na obniżenie kosztów wykonywania pomiarów, dzięki skróceniu czasu ich realizacji oraz zmniejszeniu wpływu czynnika ludzkiego na proces pomiaru i obróbki danych. Zbierane w sposób automatyczny informacje o kształtach i wymiarach badanych przedmiotów umożliwiają ich późniejsze zastosowanie do analizy jakości produkowanych wyrobów. Automatyzacja procesów pomiarowych może być realizowana sprzętowo i programowo, m.in. z wykorzystaniem robotów przemysłowych, robotów współpracujących, programów pomiarowych oraz automatycznych procedur pomiaru i obróbki danych. Takie podejście do procesu pomiarowego umożliwia minimalizację lub wyeliminowanie błędów przypadkowych popełnianych przez pracowników obsługi.

Automatyzacja może być realizowana w wielu procesach pomiarowych wspomaganych komputerowo. Należy w tym miejscu wymienić pomiary stykowe, dla których automatyzacja realizowana jest sprzętowo, poprzez zastosowanie głowic obrotowych czy magazynów końcówek pomiarowych, oraz programowo, z zastosowaniem specjalistycznych procedur pozwalających na przyspieszenie pomiarów elementów powtarzalnych. Metody te są znane i z powodzeniem stosowane, ponieważ zapewniają wysoką dokładność pomiarów. Szybkość i wydajność tego typu zautomatyzowanych pomiarów jest jednak zdecydowanie mniejsza niż pomiarów bezstykowych, które dają dużo więcej opcji automatyzacji zarówno programowej, jak też sprzętowej.

Metody bezstykowe można ogólnie podzielić na powierzchniowe i objętościowe. Metody powierzchniowe pozwalają na różnorodne podejście do automatyzacji i robotyzacji. W tym przypadku można wyróżnić możliwość instalacji bezstykowej głowicy pomiarowej na ramieniu robota przemysłowego lub na ramieniu robota współpracującego. Roboty przemysłowe wykazują się dużą szybkością działania i pozwalają na przyspieszenie procesu pomiarowego obiektów dwu- i trójwymiarowych. Ograniczeniami możliwości zwiększania szybkości realizacji

pomiarów są siły masowe wynikające z wielkości czy ciężaru głowic pomiarowych, jak również problemy z zapisem i obróbką danych pomiarowych. Z tego względu rozwój metod pomiarowych będzie podążał w kierunku przyspieszenia samego procesu pomiarowego, jak też akwizycji danych. Odrębnym zagadnieniem jest przyspieszenie procesu pomiarowego w produkcji masowej bez wykorzystania typowych rozwiązań zrobotyzowanych, ale na podstawie zautomatyzowanych pomiarów wizyjnych pozwalających na szybką inspekcję wyrobów w celu kwalifikacji do kolejnych etapów procesu produkcyjnego.

Jako że automatyzacja procesu produkcyjnego może być realizowana w ujęciu programowym i sprzętowym, można również stosować kompleksową integrację zapisu i transferu danych z wykorzystaniem odpowiedniego oznakowania elementu, np. przy zastosowaniu kodów identyfikacji za pomocą fal radiowych RFID (ang. *radio frequency identification*), zintegrowanych z wytwarzanym wyrobem. Omawiane przypadki automatyzacji pomiarów nie odnoszą się ściśle do metrologii fizycznej, jednak pewne elementy automatyzacji czy robotyzacji można również przenieść do obszaru metrologii fizycznej.

Kolejny obszar aplikacji zautomatyzowanych narzędzi pomiarowych to objętościowe systemy inspekcyjne oparte na tomografii komputerowej oraz rezonansie magnetycznym. Rozwój tego typu systemów pomiarowych w obszarze automatyzacji i robotyzacji odnosi się w zakresie sprzętowym do zmniejszenia udziału człowieka w samym procesie pomiarowym, a także w procesie obróbki danych. Istotnym problemem w tego typu pomiarach jest analiza danych obiektów składających się z elementów o różnej gęstości. Zwiększenie dokładności oraz szybkości takich pomiarów może być zrealizowane z wykorzystaniem algorytmów programowych wykorzystujących narzędzia uczenia maszynowego i sztucznej inteligencji.

Zaawansowane i zautomatyzowane procesy pomiarowe muszą być oparte o odpowiednie nakłady na badania i rozwój zarówno w zakresie zaawansowanych umiejętności i wiedzy personelu technicznego, jak też elastyczne procesy pomiarowe oraz produkcyjne FMS (ang. *flexible manufacturing system*), które charakteryzują się dużą dynamiką. Istotnym czynnikiem automatyzacji procesów pomiarowych jest także zwiększenie wydajności produkcji przy jednoczesnym zmniejszeniu kosztów. Można w tym przypadku rozważać opracowanie cyfrowych bliźniaków w zakresie automatyzacji i robotyzacji pomiarów.

3.3. Energia

3.3.1. Przejście ze źródeł klasycznych na źródła odnawialne

Obecne trendy gospodarki energetycznej prowadzą do przekształcenia pozyskiwania energii na tzw. źródła odnawialne (OZE), czyli nieko- palne źródła energii, w skład których wchodzi: energia wiatru, ener- gia słoneczna, energia aerothermalna, energia geothermalna, energia hydrothermalna, hydroenergia, energia fal, prądów i pływów morskich, a także energia otrzymywana z biomasy, biogazu, biogazu rolniczego oraz z biopłynów. Należy zaznaczyć, że odnawialność tego rodzaju energii jest w niektórych przypadkach umowna, podobnie jak jego ekologiczność. Pomijając jednak aspekty związane z wpływem tych źródeł energii na środowisko, należy pamiętać, że procesy pozyski- wania, przetwarzania i gospodarowania energią powinny bazować na precyzyjnych pomiarach wielkości fizycznych, poczynając od samego procesu wytwarzania energii, a skończywszy na jej wykorzystaniu jako produktu końcowego, czyli energii elektrycznej [14, 15].

Produkcja energii jest związana z wieloma procesami fizycznymi, chemicznymi i biologicznymi. Należy ją realizować w sposób kontrolo- wany i przewidywalny, co wiąże się z pomiarami wielkości fizycznych w kolejnych etapach wytwarzania i przetwarzania energii. Występuje tu szereg pomiarów fizycznych dotyczących analizy wielkości, takich jak: ciśnienie, temperatura, masa, prędkość, przepływ itp. Obecnie dąży się do automatyzacji procesów pomiarowych, sterowania i po- dejmowania decyzji przy minimalizacji udziału czynnika ludzkiego w zależności od skali produkcji. Mamy też do czynienia z produkcją zindywidualizowaną, gdzie poszczególne mikroelektrownie oraz małe elektrownie włączane są w globalny system energetyczny, co może po- wodować zakłócenia w jego funkcjonowaniu i z tego względu zasto- sowanie odpowiedniego pomiaru i analizy pozwala na optymalizację i stabilizację systemu oraz racjonalne wykorzystanie możliwości pro- dukcyjnych. Rozdrobnienie rynku producentów energii stawia nowe wyzwania dla procesów pomiarowych związanych z jej wytwarzaniem i przetwarzaniem, szczególnie w odniesieniu do energii elektrycznej, jak również cieplnej. W przypadku energii cieplnej, produkowanej i zużywanej na terenach silnie zurbanizowanych przy budownictwie

wielorodzinnym, zauważalny jest trend korzystania ze zcentralizowanych systemów grzewczych typu miejskie przedsiębiorstwa energetyki ciepłej. W systemach takich niezbędne jest prowadzenie pomiarów wielkości fizycznych całej sieci w sposób zautomatyzowany, pozwalający na ciągły monitoring zużycia energii w zakresie globalnym przez indywidualnych użytkowników, a także monitoring sieci pod kątem jej sprawności i możliwości występowania strat oraz awarii. Automatyzacja systemów pomiarowych w odniesieniu do producentów energii, odbiorców i pośredników jest kluczowym elementem odpowiedzialnym za produkcję, zarządzanie, zużycie i rozliczenia wzajemne. Pozwala to usprawnić wymienione procesy i wprowadzić rozwiązania inteligentnego zarządzania energią z poziomu dedykowanych aplikacji.

Istotnym elementem, z punktu widzenia pomiarów w procesach energetycznych, jest niezawodność systemu, szczególnie w odniesieniu do urządzeń produkujących energię, w tym np. generatorów wiatrowych. Urządzenia tego typu powinny charakteryzować się wysoką niezawodnością, jednak składają się one z wielu elementów narażonych na uszkodzenia, które powinny być monitorowane w sposób ciągły. Jako przykład można wskazać generatory wiatrowe wyposażone w układy mechaniczne i elektroenergetyczne. Układ mechaniczny jest narażony na typowe uszkodzenia eksploatacyjne, a stan urządzeń może być monitorowany np. poprzez pomiar drgań całego układu oraz jego elementów składowych. Pomiary tego typu wielkości fizycznych w trybie ciągłym pozwalają na ocenę stanu technicznego urządzeń energetycznych oraz zarządzanie procesem remontowym. Rozwój procesów pomiarowych może postępować również w kierunku wyposażenia korpusów czy elementów wykonawczych, np. umieszczanie w łopatach turbin wiatrowych wewnętrznych struktur pomiarowych stosowanych m.in. w konstrukcjach lotniczych.

Odrębną kwestią są pomiary energetyczne dotyczące zagadnień z zakresu metod, przyrządów oraz systemów pomiarowych w odniesieniu do własności rejestrowanych sygnałów napięć i prądów systemu elektroenergetycznego. Informacje te są niezbędne przy konstruowaniu przyrządów pomiarowych oraz w ocenie niepewności wyników ich pomiarów. Dodatkowo istotne zagadnienie pomiarowe dotyczy diagnostyki – w tym pomiarów impedancji i charakterystyk częstotliwościowo-impedancyjnych oraz wahań napięcia i jego odkształceń – stosowanej w ocenie jakości energii elektrycznej.

3.3.2. Inteligentne sieci elektroenergetyczne

Inteligentne sieci energetyczne (ang. *Smart Grid*) stanowią interaktywne i elastyczne systemy, pozwalające na dynamiczne zarządzanie sieciami przesyłowymi i dystrybucyjnymi z wykorzystaniem takich elementów jak: punkty pomiarowe i kontrolne rozmieszczone na różnych składowych węzłach i łączach systemu energetycznego [16].

Inteligentne sieci energetyczne są rozbudowanym systemem wzmocnionej sieci przesyłowej lub dystrybucyjnej, który w określonym stopniu wykorzystuje internetowe technologie telekomunikacyjne, rozproszone systemy komputerowe i zintegrowane z nimi czujniki oraz oprogramowanie, włączając w to urządzenia zainstalowane u odbiorcy końcowego (połączone z inteligentnym systemem pomiarowym). W skład *Smart Grid* wchodzi również inne obiekty, wyposażenie pomiarowe czy systemy, które działają w połączeniu z siecią łączności lub siecią elektroenergetyczną, zapewniając możliwość pomiaru i przetwarzania danych w czasie rzeczywistym.

Sieć *Smart Grid* charakteryzują następujące możliwości:

- zarządzanie zasobnikami energii,
- reakcja strony popytowej,
- zarządzanie generacją rozproszoną,
- zarządzanie zasobnikami ciepła,
- zarządzanie sieciami przesyłowymi,
- monitorowanie i wykrywanie wystąpienia wyłączeń i przywracanie zasilania,
- zarządzanie jakością energii elektrycznej,
- prewencyjna konserwacja zwiększająca niezawodność,
- bezpieczeństwo i wydajność sieci dystrybucyjnej,
- automatyzacja dystrybucji.

Sprawność systemu, zorganizowanego jako inteligentne sieci energetyczne, dotyczy nie tylko realizacji bieżącej produkcji i zarządzania nią na podstawie danych pochodzących z urządzeń i czujników pomiarowych, ale odnosi się również do analizy sprawności częściowych poszczególnych elementów odpowiedzialnych za produkcję energii. Jednym z istotnych czynników w zakresie energetyki odnawialnej jest sprawność paneli fotowoltaicznych, w tym wydajność elektrowni solarnej i dodatkowo kwalifikowalność paneli fotowoltaicznych do dalszej eksploatacji lub utylizacji. Jako że utylizacja paneli jest procesem

złożonym, z tego też względu należy na podstawie pomiarów określić możliwość ich dalszej eksploatacji i ewentualną opłacalność. Podobnie można podejść do innych elementów systemu elektroenergetycznego, które charakteryzują się określoną sprawnością eksploatacyjną w zadanym przedziale czasowym.

Jednym z elementów rozwoju metrologii wielkości fizycznych jest sposób i miejsce prowadzenia pomiarów oraz wzorcowania aparatury kontrolno-pomiarowej dla obiektów energetycznych. Wzorcowanie, zgodnie z zapisami ustawy z dnia 11 maja 2001 r. – Prawo o miarach (Dz. U. z 2022 r. poz. 2063), jest realizowane w celu zapewnienia przekazywania wartości legalnych jednostek miar od państwowych wzorców jednostek miar do przyrządów pomiarowych. Dodatkowo organy administracji miar mogą, na wniosek zainteresowanych podmiotów, wykonywać wzorcowanie przyrządów pomiarowych. Procesy wzorcowania są objęte odpowiednimi procedurami, wymaganiami oraz zastosowaniem specjalistycznej aparatury. Obiekty energetyczne powinny więc zachowywać ciągłość pracy, a procesy wzorcowania nie powinny na nią istotnie wpływać. W wielu przypadkach wzorcowanie odbywa się w siedzibie instytucji wzorcującej, co wiąże się z potrzebą wymontowania elementów systemu, przewiezienia do jednostki wzorcującej, a po wzorcowaniu – przewiezienia z powrotem na obiekt energetyczny. Takie podejście do procesu wzorcowania jest kosztowne i czasochłonne, z tego też względu rozwiązaniem przyszłościowym powinno być wdrożenie mobilnych laboratoriów wzorcujących dla energetyki, pozwalających na pracę w terenie na obiektach energetycznych, z jednoczesnym powiązaniem sieciowym z centralą w celu szybkiej wymiany danych oraz ich archiwizacji.

3.4. Środowisko

3.4.1. Obserwacja zmian klimatu

Monitoring środowiska jest procesem niezwykle złożonym, który odnosi się do rejestracji założonych parametrów fizycznych, zmierzonych w różnych horyzontach czasowych. Obserwacje mają charakter wielowymiarowy, przy czym można wyszczególnić przede wszystkim

bieżące pomiary wielkości fizycznych, takich jak: ciśnienie, temperatura czy prędkość wiatru. Tymi zagadnieniami zajmują się odpowiednie jednostki odpowiedzialne za monitorowanie środowiska, w tym głównie Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB), którego zadaniem jest zapewnienie meteorologicznej osłony Polski w ramach działań ustawowych, do których należą: opracowywanie i przekazywanie prognoz meteorologicznych oraz przekazywania ostrzeżeń i komunikatów przed niebezpiecznymi zjawiskami zachodzącymi w atmosferze. Realizacja zadań ustawowych jest możliwa dzięki wykorzystywaniu odpowiedniej aparatury pomiarowej oraz śledzeniu zjawisk fizycznych w czasie rzeczywistym, a także odpowiedniej ich interpretacji w celu wyciągania wniosków prognostycznych.

Z punktu widzenia metrologicznego można rozpatrywać następujące zagadnienie: jaka ilość danych pomiarowych jest właściwa do realnej oceny zjawisk środowiskowych w ujęciu lokalnym i globalnym. Problemem w tym przypadku może być integracja danych pochodzących z rozproszonych źródeł pomiarowych i ich obróbka w celu uzyskania szybkich i wiarygodnych analiz. Biorąc to pod uwagę, do procesu pomiaru wielkości fizycznych powinno się podejść w ujęciu globalnym. Z jednej strony należy planować rozmieszczenie odpowiedniej aparatury pomiarowej, która będzie pozwalać na zbieranie informacji w ramach działań własnych IMGW-PIB, a z drugiej strony można się zastanowić, czy jest możliwe wykorzystanie danych pomiarowych pochodzących z indywidualnych systemów pomiarowych (możliwych do uzyskania jako dane udostępniane w sieci). Tego typu podejście globalne może pozwalać na rejestrację szeregu danych pomiarowych i ich interpretację w kontekście zmian środowiskowych. Należy tu zwrócić uwagę na ilość pozyskiwanych danych i sposób ich obróbki, ponieważ w takim przypadku ewentualna realizacja musi wykorzystywać algorytmy sztucznej inteligencji.

3.4.2. Monitorowanie zanieczyszczeń powietrza, wody i gleby

Monitorowanie zanieczyszczeń powietrza, wody i gleby jest jednym z najważniejszych zadań analizy środowiskowej, mającej na celu pozyskiwanie wiedzy dotyczącej możliwości ewentualnego skażenia, a także jego wielkości czy też zasięgu. Wiarygodne określenie tych wielkości umożliwia prowadzenie skutecznych działań zmierzających do poprawy

stanu środowiska naturalnego. Monitorowanie zanieczyszczeń stanowi interdyscyplinarne zagadnienie wykorzystujące szereg pomiarów wielkości fizycznych i chemicznych w odniesieniu do analityki substancji szkodliwych w środowisku. Interdyscyplinarny charakter procesu wymaga nie tylko poznania samego procesu analitycznego, ale też wykonania odpowiednich pomiarów w celu poznania skali i natury komponentu środowiska, będącego matrycą oznaczanego zanieczyszczenia środowiskowego.

Metody monitorowania środowiska można podzielić na dwie zasadnicze grupy. Pierwsza odnosi się do procedur analitycznych opracowanych dla rutynowego oznaczania typowych zanieczyszczeń atmosfery, wody, gleby oraz ścieków w celu zakwalifikowania elementów składowych środowiska do zadanych kategorii czystości wynikających z odpowiednich przepisów prawnych. Wykorzystuje się w takim przypadku proste metody pomiarowe, dające często szacunkowy wynik poziomu mierzonego parametru, ale także skomplikowane metody pomiarowe z użyciem złożonej aparatury pomiarowej.

W drugiej grupie monitorowania środowiska stosuje się metody analityczne opracowane do pomiaru wybranych zanieczyszczeń, których nie obejmują przepisy prawne, ale które mają znaczenie w ocenie jakości i stanu środowiska. Odnosi się to do złożonych procedur analitycznych realizowanych w celu wykrywania i pomiaru substancji na poziomie śladowym czy ultraśladowym.

Obie grupy metod pomiarowych przenikają się w odniesieniu do samego procesu pomiarowego, procedur badawczych czy wykorzystywanej aparatury.

Biorąc pod uwagę powyższe, można założyć, że rozwój metrologii wielkości fizycznych w przypadku monitoringu stanu środowiska będzie postępował w różnych kierunkach:

- w obszarze monitoringu zorganizowanego przez powołane do tego organy,
- w zakresie monitoringu opartego o metadane pozyskiwane w efekcie gromadzenia wyników pomiarów wielu wielkości pochodzących z indywidualnych pomiarów, czyli połączonych sieciowo urządzeń wykorzystywanych w gospodarstwach domowych i indywidualnych.

3.5. Zdrowie

3.5.1. Ochrona przed promieniowaniem, diagnostyka, radioterapia

Zagadnienie ochrony przed promieniowaniem jest bardzo szerokie i wymaga określenia rodzajów promieniowania, na które narażone są organizmy żywe. Dotyczy to również pomiarów poziomu promieniowania dla każdego z wyszczególnionych obszarów. Działalność człowieka na obecnym etapie rozwoju społeczeństwa związana jest z oddziaływaniem na organizmy żywe wielu rodzajów promieniowania, które po przekroczeniu dopuszczalnych wartości powodują negatywne skutki zdrowotne. Biorąc to pod uwagę, należy się zastanowić, jaka aparatura pomiarowa powinna być stosowana do monitoringu różnych rodzajów promieniowania i w jakim zakresie oraz jakie informacje powinny być przekazywane w ramach realizacji pomiarów. Należy również dodać, że sam proces projektowania wyrobów emitujących promieniowanie jest zgodny z odpowiednimi normami, które jednocześnie dopuszczają te wyroby do eksploatacji.

Poziom promieniowania nie jest w szerokim spektrum mierzony czy monitorowany indywidualnie, tak jak ma to miejsce w przypadku np. temperatury, ciśnienia atmosferycznego czy wilgotności powietrza. Pojawia się tu pytanie, czy jest potrzeba realizacji takich pomiarów z punktu widzenia społecznego. Dodatkowo jeżeli monitoring różnych rodzajów promieniowania jest prowadzony przez przeznaczone do tego instytucje, to czy zbieranie danych w sposób rozproszony pozwoli np. na określenie map oddziaływania promieniowania, a także w jaki sposób tego typu informacje pozwolą na monitorowanie środowiska i jakie będzie odniesienie tych danych do stanu zdrowia populacji i docelowo polepszenia stanu zdrowia w ujęciu globalnym i regionalnym. Tematyka ta jest bardzo szeroka i wykracza poza ramy niniejszego opracowania.

Kolejnym elementem pomiarów i wykorzystywania różnych rodzajów promieniowania jest radioterapia, która polega na leczeniu napromienianiem nowotworów złośliwych. W procesie radioterapii do niszczenia komórek nowotworowych wykorzystuje się promieniowanie jonizujące. Promieniowanie stosowane w radioterapii jest podobne do

tego stosowanego podczas prześwietlenia promieniami Roentgena czy w tomografii komputerowej. W radioterapii stosowane są określone dawki promieniowania w założonym czasie. W procesie leczenia stosuje się wiele opracowanych w ostatnim czasie metod, które wykorzystują źródła promieniowania jonizującego i techniki przestrzenne. Jest to szczególnie istotne zagadnienie z punktu widzenia pomiarów, ponieważ pozwala na uzyskanie cyfrowej reprezentacji przestrzennej człowieka z naniesionymi precyzyjnie zmianami chorobowymi. Trójwymiarowy model numeryczny umożliwia dokładne skierowanie dawki promieniowania, co z kolei powoduje znaczne ograniczenie występowania wczesnych i późnych powikłań. Jest to szczególnie ważne, ponieważ tkanki w organizmie mają różną wrażliwość na promieniowanie, a wykonanie precyzyjnych pomiarów fizycznych pacjenta na etapie planowania leczenia pozwala na ochronę zdrowych narządów i określenie kryteriów służących ich ochronie.

3.5.2. Bezpieczna i zdrowa żywność

Bezpieczna i zdrowa żywność jest głównym celem wspólnej polityki rolnej Unii Europejskiej, na realizację którego przeznaczane jest ok. 30 % unijnego budżetu. Polska jest znaczącym producentem i eksporterem żywności, wnoszącym istotny wkład w globalne bezpieczeństwo żywnościowe. Należy wspomnieć, że zachodzące zmiany środowiskowe i geopolityczne, wynikające z pandemii COVID-19 oraz rosyjskiej agresji na Ukrainę, zwiększyły znaczenie bezpieczeństwa żywnościowego. Wymaga to stosowania odpowiednich urządzeń pomiarowych pozwalających na monitorowanie produkcji żywności oraz jej jakości. Odnosi się to do szeroko rozumianego obrotu żywnością w kontekście rozliczeń finansowych i przepisów celnych oraz kategoryzowania żywności w zakresie jakości i wpływu na zdrowie ludności [17, 18].

Ogólnie rzecz ujmując, zapewnienie odpowiedniej ilości żywności (przystępnej cenowo) wymaga ciągłego poprawiania efektywności rolnictwa i wiąże się z monitoringiem procesów produkcji i przetwarzania żywności z zastosowaniem odpowiedniej aparatury pomiarowej. Dodatkowo zarówno proces przetwórstwa, jak i analiza łańcucha dostaw powinny być monitorowane w celu utrzymania funkcjonowania systemu bez zakłóceń.

Produkcja żywności na skalę przemysłową wymaga powiązania szeregu elementów, w których pomiary stanowią istotną rolę, poczynając od uprawy ziemi z punktu widzenia pracy maszyn rolniczych wykorzystujących geolokalizację. Dodatkowo monitoring prowadzony jest przez instytucje nadzorujące produkcję rolną w zakresie planowania czy przydziału określonych środków finansowych.

Odrębne zagadnienie stanowi proces składowania i przetwarzania żywności. W tym przypadku zastosowanie odpowiednich urządzeń pomiarowych jest związane z danym procesem technologicznym czy przetwórczym i wykracza poza ramy tego opracowania. Należy jednak zauważyć, że w warunkach zmian klimatycznych coraz większe znaczenie mają działania polegające na pomiarach zdolności produkcyjnych w celu zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego w założonej perspektywie. Dotyczy to również monitorowania zasobów ziemi, wody i różnorodności biologicznej, a także monitorowania zużycia żywności mającego za zadanie ograniczanie strat i marnotrawstwa.

Bezpieczeństwo żywnościowe powinno być monitorowane na każdym etapie łańcucha dostaw, poczynając od dostawców środków do produkcji rolnej, samej produkcji rolnej, przetwórstwa, magazynowania, dystrybucji, handlu, gastronomii aż do konsumpcji. W tym celu niezbędne jest opracowanie strategii pomiarowej opartej na sparametryzowanych wielkościach możliwych do analizowania w czasie rzeczywistym.

3.6. Transport i logistyka

3.6.1. Automatyzacja procesów transportowych i logistycznych

Automatyzacja procesów transportowych polega na zastosowaniu technologii sieciowych, sztucznej inteligencji, robotyki oraz mechanizacji do wykonywania funkcji transportowych, które w normalnych warunkach wymagałyby podejmowania działań przez człowieka. Automatyzacja to również działanie zastępujące ludzką pracę sterowanymi procesami. Jest ona wykorzystywana w celu zwiększenia wydajności i precyzji przy jednoczesnym obniżeniu kosztów realizacji prac.

Procesy transportowe odnoszą się do wielu obszarów działalności, do których należą transport ładunków i osób wynikający z samej potrzeby przemieszczania towarów i ludzi, zakorzenionej w naturze człowieka. Zagadnienia transportowe obejmują jednak znacznie szerszy zakres wiedzy i działalności ludzkiej, ponieważ są to środki transportu lądowego, wodnego i powietrznego. Występują różne rodzaje transportu towarów wynikające z ich stanu skupienia oraz sposobu przetworzenia. W każdym przypadku realizacja zadań transportowych wiąże się z zastosowaniem odpowiednich przyrządów pomiarowych do pomiarów wielkości fizycznych niezbędnych do oszacowania parametrów wydajności systemu transportowego oraz określenia kosztów realizacji zadań transportowych. Zastosowanie automatyzacji w procesach transportowych pozwala na zwiększenie wydajności zarówno samego procesu transportowego, jak też procesów powiązanych. Należy tu wyróżnić także całą infrastrukturę transportową składającą się z baz, portów przeładunkowych, magazynów itp. Wiele procesów transportowych nie ogranicza się do jednego środka przemieszczania ładunku, ale do wielu składowych jako elementów transportu kombinowanego, w którym automatyzacja stanowi kluczowe rozwiązanie infrastrukturalne.

Odrębne zagadnienie może stanowić transport przemysłowy czy transport wewnętrzny, w którym stosowane są urządzenia transportowe typu przenośniki, suwnice, podajniki, roboty współpracujące oraz autonomiczne wózki transportowe. Dla tego typu rozwiązań zagadnienia pomiarowe stanowią istotny element pracy systemu transportowego zapewniającego odpowiednią szybkość i wydajność przy zachowaniu założonej niezawodności. Rozwiązania te są oparte na danych uzyskanych w czasie rzeczywistym oraz pewnych elementach samodzielnego podejmowania decyzji w funkcji celu określonego przez system zarządzania.

Automatyzacja procesów logistycznych, przy użyciu odpowiednich urządzeń kontrolnych i pomiarowych, pozwala istotnie podnieść wydajność pracy systemu transportowego oraz magazynowego. Może ona obejmować niemal każdy obszar procesu logistycznego, począwszy od przyjmowania dostaw, poprzez kompletację zamówień i kontrolę stanu magazynowego, a na wysyłkach kończąc. Dla kompleksowo zautomatyzowanych obiektów operacje magazynowe przebiegają sprawniej, dzięki zastosowaniu odpowiedniej infrastruktury.

Automatyzacja pozwala na poprawę jakości obsługi, skrócenie terminów dostaw, zwiększenie liczby wysyłek oraz uniknięcie ryzyka wyczerpania zapasów. Czynności związane z magazynowaniem produktów można zautomatyzować, instalując m.in. układnice paletowe lub pojemnikowe, które automatycznie transportują towary wzdłuż korytarzy i umieszczają je lub pobierają w wyznaczonym miejscu. Procesy załadunku i rozładunku pojazdów można zautomatyzować przy użyciu systemów, mogących podawać i wyjmować palety z towarami przy minimalnej kontroli ze strony personelu. Automatyczny system załadunku i rozładunku pojazdów pozwala przyspieszyć obsługę towarów w dokach przeładunkowych. W magazynach automatycznych produkty mogą być poddawane wstępnej kontroli. Operacje te można zautomatyzować przez usytuowanie na początku przenośnika systemu do automatycznej kontroli jakości, który sprawdza np. wymiary, masę towarów, a także skanuje kod kreskowy i odczytuje dane transpondera, co pozwala m.in. stwierdzić, czy nie nastąpiła pomyłka przy dostawie.

3.6.2. Nowe technologie i inteligentne systemy transportowe

Nowe technologie logistyczne oraz inteligentne systemy transportowe stanowią pewnego rodzaju całość, która jest zintegrowana sieciowo z wykorzystaniem systemów numerycznych. Istotnym elementem rozwoju procesów logistycznych jest ich cyfryzacja pozwalająca na wdrożenie nowych inteligentnych rozwiązań. Cyfryzacja logistyki może przynieść wiele korzyści przedsiębiorstwom specjalizującym się w dystrybucji właściwie każdego towaru.

Jednym z istotnych zagadnień rozwoju systemów transportowych w skali mikro i makro jest wdrażanie rozwiązań autonomicznego transportu zarówno dla rozwiązań transportu pasażerskiego, jak i towarowego. Autonomiczne środki transportu wymagają stosowania szeregu rozwiązań technicznych, w tym systemów pomiarowych umożliwiających poruszanie się pojazdów czy dronów w przestrzeni objętej działalnością systemu transportowego. Należy tutaj zaznaczyć, że w przestrzeni objętej danym rodzajem autonomicznego transportu mogą obowiązywać różne uwarunkowania prawne, np. w przestrzeniach zamkniętych obowiązują przepisy danego przedsiębiorstwa, natomiast w przypadku przestrzeni publicznej obowiązują przepisy krajowe czy międzynarodowe.

Znaczny przyrost zadań logistycznych wynikający z liczby obsługiwanych osób i podmiotów wymaga stosowania inteligentnych systemów transportowych (ITS), które stanowią element inteligentnej infrastruktury transportu. Obszary wsparcia użytkowników ITS są bardzo szerokie. Wdrażanie inteligentnych systemów transportowych pozwala na uzyskanie wielu korzyści, takich jak: wzrost poziomu bezpieczeństwa, zwiększenie niezawodności oraz zmniejszenie zużycia energii czy paliw. Jest to możliwe poprzez zintegrowane i racjonalne gospodarowanie, zmniejszenie kosztów funkcjonowania i sumaryczne zmniejszenie emisji substancji szkodliwych do atmosfery. Planowanie, budowa i wdrażanie inteligentnych systemów transportowych, w transporcie drogowym, kolejowym, lotniczym czy morskim, powinno być zintegrowane z planami krajowymi czy regionalnymi. Wymaga to jednak korzystania z odpowiedniej infrastruktury, którą często należy rozbudować czy zbudować, nie tylko w zakresie cyfryzacji i transferu danych, ale również w zakresie infrastruktury drogowej czy kolejowej, ponieważ stanowi to podstawę realizacji zadań transportowych.

Inteligentne systemy transportu wykorzystują różnorodne elementy infrastruktury, technologie informatyczne, telekomunikację mobilną, elektronikę pojazdową oraz systemy transferu i obróbki danych. Integracja tych obszarów pozwala na efektywne zarządzanie szeroko rozumianymi procesami logistycznymi. Sprawne funkcjonowanie systemu transportowego wiąże się z ciągłą realizacją procesów pomiarowych i rozliczeniowych zarówno z punktu widzenia ekonomicznego, jak też przestrzegania przepisów. Zgodnie z opracowaniami Ministerstwa Infrastruktury do zadań systemu transportowego zalicza się następujące składniki [19]:

- zaawansowane metody zarządzania ruchem drogowym, kolejowym, publicznym transportem zbiorowym, powietrznym i wodnym,
- systemy wspomagające zarządzanie flotami i transportem ładunków,
- zaawansowane i autonomiczne systemy wspomagania kierowania pojazdami kołowymi,
- systemy rozliczeń finansowych i automatycznego pobierania opłat,
- systemy automatycznej kontroli przestrzegania przepisów,
- systemy informowania użytkowników i pasażerów,

- systemy powiadamiania służb ratowniczych w zakresie sytuacji kryzysowych.

Biorąc pod uwagę obecne i przyszłe zadania transportowe wynikające z liczby podróży oraz transportowanych ładunków, niezbędny jest rozwój systemów pomiarowych pozwalających, w sposób automatyczny, sprawować kontrolę nad potokami transportowymi w zakresie ich niezawodnego działania i realizacji funkcji rozliczeniowej. System zintegrowany sieciowo na podstawie zbieranych danych musi charakteryzować się w wielu przypadkach reakcją w tzw. czasie rzeczywistym.

3.7. Transformacja cyfrowa

3.7.1. Przetwarzanie danych w chmurze i *Big Data*

Omawiane we wcześniejszych rozdziałach zagadnienia związane z rozwojem obszaru metrologii, ze szczególnym uwzględnieniem metrologii fizycznej, niemal w każdym analizowanym obszarze odnoszą się do integracji zadań pomiarowych opartych o transformację cyfrową. Można więc stwierdzić, że zasadniczy kierunek rozwoju przyrządów pomiarowych bazuje na ich projektowaniu w aspekcie posiadania głównie łącz cyfrowych oraz interfejsów pozwalających na integrację sieciową. Wiąże się to z pozyskiwaniem i przetwarzaniem olbrzymiej ilości danych, zapisywanych w przestrzeniach chmurowych. Jednocześnie powoduje to powstawanie określonych ryzyk dotyczących transferu danych, niezawodności sieci i urządzeń sieciowych oraz bezpieczeństwa danych otwartych i zamkniętych. Z punktu widzenia komfortu funkcjonowania oraz dystrybucji dóbr materialnych i niematerialnych, wykorzystanie danych zgromadzonych w sieci wydaje się już nawet nie potrzebą, a koniecznością. Integracja sieciowa i informatyczna odnoszące się do Internetu rzeczy (ang. *Internet of Things* – IoT) zapewniają dostęp do Internetu we wszystkich aspektach życia, produkcji, konsumpcji itp. Integracja ta pomaga w realizacji zadań bieżących wynikających z funkcjonowania społeczeństwa, oszczędzając czas i pieniądze oraz dając jednocześnie dostęp do niemal nieskończonych źródeł informacji.

Miejsce przyrządów pomiarowych w rzeczywistości rozszerzonej o rozwiązania sieciowe jest istotne z punktu widzenia wielu czynników zapewniających sprawne działanie systemów. Należy pamiętać, że przyrząd pomiarowy nie stanowi w systemie samodzielnego źródła informacji, a jedynie jego element składowy, który ma wpływ na procesy decyzyjne, mogące zachodzić w procesach automatycznych bez udziału bezpośredniego czynnika ludzkiego. Co za tym idzie człowiek nie musi bezpośrednio nadzorować określonego procesu, a jedynie czuwać nad globalną realizacją. Podejście do projektowania systemów pomiarowych zmienia swój charakter, idąc w kierunku projektowania poszczególnych elementów jako elementów złożonej architektury, pełniącej już nie tylko funkcje kontrolno-pomiarowe, ale umożliwiającej transfer danych w szerszym zakresie.

3.7.2. Sztuczna inteligencja (AI) i uczenie maszynowe (ML)

Zagadnienie sztucznej inteligencji jest niezwykle obszerne i wieloaspektowe. Znajduje ona zastosowanie w sferach, takich jak: naukowa, techniczna, społeczna, polityczna, a także publicystyczna. Można uznać, że jest to szereg działań związanych z modelowaniem wiedzy z danych na podstawie systemów i algorytmów ich przetwarzania z wykorzystaniem określonych mocy obliczeniowych. W obecnym stanie techniki działania te pozwalają na uzyskanie automatyzacji procesów pozyskiwania, przetwarzania oraz analizy danych. Umożliwiają one samoistny (autonomiczny) rozwój systemu, w tym przewidywania reakcji, działań i zachowań na podstawie analizy zebranych danych i korelacji między nimi, pozwalającą na wywieranie wpływu na otoczenie zewnętrzne z wykorzystaniem interakcji za pomocą aparatury sensorycznej i wykonawczej. Interakcje te mogą być realizowane automatycznie lub przy udziale czynnika ludzkiego.

Biorąc pod uwagę ciągły rozwój sztucznej inteligencji, trudno jest ją jednoznacznie zdefiniować, jednak z punktu widzenia technicznego czy metrologicznego należy wyszczególnić trzy główne elementy wchodzące w skład takiego systemu:

- czujniki (sensory) – aparatura kontrolno-pomiarowa,
- logika operacyjna (modele algorytmów),
- aparatura wykonawcza (siłowniki, napędy itp.).

Aparatura kontrolno-pomiarowa jest odpowiedzialna za zbieranie nieprzetworzonych danych ze środowiska. Pozwala ona na przetworzenie i digitalizację wielkości fizycznych na dane cyfrowe. Czujniki stanowią pierwszy etap pozyskiwania informacji do modelowania rzeczywistości wirtualnej, rozpoczynając od podstawowych danych wynikających z określenia podstawowych parametrów fizycznych, takich jak: wymiary, masa itp., zależnie od złożoności modelu numerycznego. Można stwierdzić, że realizacja modelu numerycznego nie jest możliwa bez uzyskania danych fizycznych, które określają ten model, czyli bez wykonania pomiarów.

Rozważania dotyczące sztucznej inteligencji i jej miejsca we współczesnej metrologii można prowadzić wieloaspektowo, począwszy od samej aparatury pomiarowej, postaci i dokładności danych wychodzących z czujników pomiarowych, integracji czujników z systemami zarządzanymi przez algorytmy AI aż do obszarów budowy systemów pomiarowych opartych na algorytmach AI w zakresie realizacji procesów pomiarowych i obróbki danych oraz uczenia maszynowego. Dotyczy to właściwie wszystkich obszarów życia i działalności człowieka. Jako przykłady można wskazać: inteligentne domy, przedsiębiorstwa przemysłowe wykorzystujące rozbudowane systemy zarządzania oparte o AI i ML, systemy logistyczno-transportowe oraz opiekę medyczną, która w procesie zbierania danych, stawianiu diagnozy i planowaniu procesu leczenia coraz częściej wykorzystuje narzędzia AI i ML. W każdym z tych obszarów należy jednak podkreślić, że zbieranie danych z obiektów fizycznych jest możliwe, dzięki zastosowaniu odpowiednich czujników pomiarowych i urządzeń rejestrujących.

3.8. Podsumowanie kierunków rozwoju metrologii fizycznej

Rozwój metrologii krajowej i światowej jest związany z postępującą cyfryzacją wielu obszarów, takich jak: procesy produkcyjne, procesy pomiarowe, zdrowie, transport, edukacja itp. Digitalizacja obejmuje zarówno sposób pozyskiwania danych, ich transferu, jak i kreowania w środowisku rzeczywistości wirtualnej. Funkcjonowanie systemów cyberfizycznych obejmuje integrację komponentów fizycznych i cybernetycznych w celu nadzoru i monitorowania systemów. Wykorzystują one czujniki, przyrządy pomiarowe i rejestrujące do zbierania danych

ze świata fizycznego, następnie bazują na zgromadzonych danych do sterowania zachowaniem systemu. Dane te mogą być również podstawą do tworzenia odwzorowania procesów rzeczywistych w obszarze cyfrowym jako tzw. bliźniaki cyfrowe, których budowa przyjmuje różną skalę, poczynając od prostych procesów do modelowania funkcjonowania społeczności ludzkich w wirtualnych miastach bliźniaczych. Na obecnym etapie rozwoju dane z procesów są zbierane i przetwarzane w celu ulepszenia wspomnianych procesów. Obecnie realizowane są prace w kierunku przesunięcia czy odwrócenia proporcji, co może doprowadzić do wirtualnej kreacji przenoszonej do obszaru fizycznego, przy czym może się to wydawać zagadnieniem z obszaru fantastyki naukowej. Można się jednak zastanowić, czy proces druku 3D nie jest pewnego rodzaju przykładem takiego zjawiska, a zastosowanie procesów pomiarowych typu skanowanie 3D lub tomografia komputerowa, w połączeniu z algorytmami wspieranymi sztuczną inteligencją oraz wielokomponentowym drukiem 3D, nie stanowi pewnego rodzaju podstawowych działań, mogących nosić miano pierwotnej teleportacji.

W obszarze metrologii należy się również zastanowić, gdzie jest jej miejsce w obszarze produkcyjnym, gdzie powinny być instalowane maszyny pomiarowe, jakie mają one spełniać zadania w procesie technologicznym w układzie „pomiar – obróbka danych – transfer danych – zabezpieczenie danych”. Dotyczy to również zagadnień kosztowych czy reklamacyjnych, a mianowicie, czy zauważalne są trendy zmniejszenia nakładów na pomiary w zakresie kontroli jakości poprzez przeniesienie tych kosztów na producenta komponentów i zwiększenie zaufania w relacji producent komponentów/wyrobów i ich odbiorca. Podstawą takiego procesu może być możliwość monitorowania procesów pomiarowych i kontroli jakości z wykorzystaniem narzędzi zdalnych i dostępu do protokołów pomiarowych w czasie rzeczywistym. Pojawia się tylko pytanie, czy z punktu widzenia społecznego występuje gotowość do pracy w tego typu systemie bieżącej kontroli. Można się także zastanawiać, czy pewnego rodzaju ekshibicjonizm personalny, promowany i występujący w mediach społecznościowych, może być transponowany do procedur zarządzania w systemie produkcyjnym. Należy zauważyć, że obrazy czy filmy wstawiane do mediów społecznościowych stanowią wynik procesu pomiarowego pozwalającego na pozyskiwanie danych wielowymiarowo i nie zawsze w zgodzie z intencją autora. Dla przykładu określony materiał filmowy czy zdjęciowy

niesie ze sobą szereg informacji z punktu widzenia metrologicznego, takich jak: czas i miejsce rejestracji, właściwości otoczenia, pośrednio np. temperatura czy wilgotność powietrza wynikające z zarejestrowanych warunków atmosferycznych oraz powiązania ich z innymi danymi pochodzącymi z danych meteorologicznych. Rozważania te mogą prowadzić do różnych wniosków w zakresie realizacji pomiarów i ich wykorzystywania w przemyśle, życiu społecznym czy prywatnym. Należy jednak stwierdzić, że rozwój przyrządów pomiarowych, rejestrujących itp. jest związany z rozwojem cyfryzacji oraz sieci komputerowych we wszystkich obszarach naszego życia.

Literatura

1. Adamczewski J., *Pomiary cieplne. Część II*, WNT, Warszawa 1995.
2. Piotrowski J. (red.), *Pomiary. Czujniki i metody pomiarowe wybranych wielkości fizycznych i składu chemicznego*, wyd. I, WNT, Warszawa 2009.
3. *Wykaz uczelni publicznych nadzorowanych przez Ministra właściwego ds. szkolnictwa wyższego – publiczne uczelnie akademickie*, www.gov.pl/web/edukacja-i-nauka (dostęp: 15.09.2023 r.).
4. *Wykaz uczelni publicznych nadzorowanych przez Ministra właściwego ds. szkolnictwa wyższego – publiczne uczelnie zawodowe*, www.gov.pl/web/edukacja-i-nauka (dostęp: 15.09.2023 r.).
5. Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej, *Kształcenie w PSP*, <https://www.gov.pl/web/kgpsp/system-ksztalcenia-PSP> (dostęp: 15.09.2023 r.).
6. Ministerstwo Obrony Narodowej, *Szkolnictwo wojskowe – Akademie wojskowe*, www.gov.pl/web/obrona-narodowa/szkolnictwo-wojskowe (dostęp: 15.09.2023 r.).
7. Komenda Główna Policji, *Szkoły policji*, <http://kgp.bip.policja.gov.pl/> (dostęp: 15.09.2023 r.).
8. Rada Główna Instytutów Badawczych, *Baza Instytutów badawczych*, <https://www.rgib.org.pl/index.php/baza-ib/baza-instytutow> (dostęp: 15.09.2023 r.).
9. Polskie Centrum Akredytacji, www.pca.gov.pl (dostęp: 15.09.2023 r.).
10. PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 – Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących.
11. Polski Komitet Normalizacyjny, www.pkn.pl (dostęp: 15.09.2023 r.).
12. Tugi H., *Podejście procesowe – nowe wyzwanie dla laboratoriów*, „Laboratorium –Przegląd Ogólnopolski” 2018, nr 1, s. 8–11.

13. Portal Nauka Polska, www.nauka-polska.opi.org.pl (dostęp: 15.09.2023 r.).
14. Program Operacyjny Infrastruktura i Środowisko – sektor energetyka, <https://www.gov.pl/web/klimat/co-robimy-fundusze-europejskie> (dostęp: 30.04.2024 r.).
15. Program priorytetowy Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej Inteligentne Sieci Energetyczne (*Smart Grid*), folder programu „Inteligentne Sieci Energetyczne”, Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, 2012.
16. Gunther E., *Smart Metering, South Dakota PUC Workshop – May 1, 2007*, <https://puc.sd.gov/commission/dockets/electric/2006/el06-018/Guntherpresentation.pdf> (dostęp: 30.04.2024 r.).
17. Leśkiewicz K., *Bezpieczeństwo żywnościowe i bezpieczeństwo żywności – aspekty prawne*, „Przegląd Prawa Rolnego”, 2012, vol. 1, no. 10, s. 179–198.
18. Małysz J., *Ekonomiczna interpretacja bezpieczeństwa żywnościowego*, [w:] *Bezpieczeństwo żywności w erze globalizacji*, red. S. Kowalczyk, Szkoła Główna Handlowa w Warszawie, Warszawa 2009, s. 79.
19. Ministerstwo Infrastruktury, <https://www.gov.pl/web/infrastruktura> (dostęp: 30.04.2024 r.).

W rozdziale przedstawiono diagnozę stanu metrologii fizycznej w Polsce oraz opisano strategiczne kierunki jej dalszego rozwoju. W pierwszej części określono obszar merytoryczny, będący przedmiotem opracowania, zaznaczając, że jest to zagadnienie bardzo szerokie, wymagające pewnego zawężenia na potrzeby niniejszej monografii. W kolejnym rozdziale wymieniono podmioty, głównie naukowe, zajmujące się metrologią fizyczną. Zaprezentowano także syntetyczne informacje dotyczące zasobów techniczno-aparaturowych oraz kadry metrologicznej i jej kompetencji. Dodatkowo zidentyfikowano problemy i potrzeby. Następnie skoncentrowano się na przyszłości metrologii fizycznej w priorytetowych obszarach, takich jak: przemysł i zaawansowana produkcja, robotyzacja i automatyzacja procesów pomiarowych, energia, środowisko, zdrowie, transport i logistyka oraz transformacja cyfrowa. Stwierdzono przede wszystkim, że rozwój przyrządów pomiarowych i rejestrujących jest związany z rozwojem cyfryzacji oraz sieci komputerowych we wszystkich obszarach życia człowieka. Podkreślono również, że rozwój metrologii fizycznej w Polsce przyczyni się nie tylko do zwiększenia precyzji i dokładności pomiarów, ale także dostosowania krajowego systemu metrologicznego do dynamicznie zmieniających się wymogów norm międzynarodowych. Opracowanie stanowi punkt wyjścia do dalszych działań, zwiększających konkurencyjności krajowej gospodarki.

Słowa kluczowe: metrologia fizyczna, Polska Metrologia, diagnoza stanu metrologii, strategiczne kierunki rozwoju metrologii

CZĘŚĆ PIĄTA

Metrologia medyczna



Prof. dr hab. inż. Gerard Cybulski

ORCID: 0000-0002-2917-2047

Politechnika Warszawska

ROR: <https://ror.org/00y0xnp53>

Absolwent Wydziału Mechaniki Precyzyjnej (obecnie Mechatroniki) Politechniki Warszawskiej (1984 r.). Główne obszary jego zainteresowań badawczych to m.in: nieinwazyjna ocena mechanizmów regulacyjnych w układzie krążenia, rozwijanie metod pomiarowych umożliwiających nieinwazyjne monitorowanie czynności układu krążenia, analiza czynności układu krążenia oraz kliniczna weryfikacja proponowanych metod. Odbił staże naukowe w Center for Biological and Medical Systems Imperial College of Science Technology and Medicine (Londyn) oraz w Department of Engineering University of Leicester. W latach 1984–2018 był związany z Zakładem Fizjologii Stosowanej Instytutu Medycyny Doświadczalnej i Klinicznej im. M. Mossakowskiego Polskiej Akademii Nauk (PAN), gdzie Rada Naukowa nadała mu stopień doktora nauk przyrodniczych (1990 r.). W styczniu 2008 r. Rada Naukowa Wydziału Mechatroniki PW nadała mu stopień doktora habilitowanego w dyscyplinie Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna. W dniu 28 listopada 2019 r. Prezydent RP nadał mu tytuł profesora nauk inżynieryjno-technicznych. Jest autorem trzech monografii, a także autorem bądź współautorem ponad 70 prac naukowych opublikowanych w renomowanych czasopismach naukowych. Był kierownikiem w dwóch i wykonawcą w czterech projektach badawczych finansowanych ze źródeł zewnętrznych. Wypromował czterech doktorów, 16 magistrów i 47 inżynierów.

W październiku 2019 r. został wybrany na stanowisko przewodniczącego Pierwszej Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna PW. Był członkiem Komitetu Naukowego Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna PAN w kadencji 2020–2023. Został ponownie wybrany na kadencję 2024–2027 i pełni funkcję członka zarządu tego komitetu. Ponadto został po raz pierwszy wybrany na członka Komitetu Naukowego Fizyki Medycznej, Radiobiologii i Diagnostyki Obrazowej PAN. W 2020 r. został powołany na stanowisko dziekana Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej na kadencję 2020–2024. Jest członkiem Polskiego Towarzystwa Kardiologicznego oraz European Society of Cardiology.

Określenie obszaru merytorycznego metrologii medycznej

Metrologia medyczna jest szczególnym działem metrologii, którego obszar badań pokrywa się z innymi działami, takimi jak: metrologia fizyczna, metrologia elektryczna oraz metrologia chemiczna w zastosowaniach medycznych i okołomedycznych. Można w uproszczeniu powiedzieć, że metrologia medyczna to dział metrologii obejmujący wszystkie obszary związane z pomiarami dotyczącymi organizmów. Dotyczy zatem fizycznych i chemicznych podstaw metod pomiarowych, przyrządów wykorzystujących te metody oraz prawnych uregulowań związanych z prowadzenia pomiarów w tym obszarze.

W opracowaniu podjęto próbę określenia stanu metrologii medycznej w Polsce, szczególnie w zakresie pomiarów wielkości fizycznych, uwzględniając pomiary wielkości elektrycznych oraz tych wielkości nieelektrycznych, które mogą zostać przekształcone w wielkości elektryczne. Przedstawiona została również tematyka związana z ogólnie pojętą dozymetrią i ochroną radiologiczną.

Rozważając znaczenie metrologii medycznej, warto przytoczyć spostrzeżenie zawarte w pracy Pierra'a Squary, Michaela Imhofa i Maurizia Cecconiego [1], a mianowicie – mimo że metrologia odgrywa ogromną rolę w medycynie, a zwłaszcza w miejscu tak krytycznym jak oddział intensywnej terapii, częste nieporozumienia co do terminologii i definicji wpływają na utrudnioną komunikację nawet pomiędzy lekarzami. Problematicznymi kwestiami są również m.in.: zrozumienie instrukcji urządzeń medycznych czy też ograniczeń nałożonych przez producentów w zakresie korzystania z nich. Jako że w obszarze pomiarów medycznych spotykają się użytkownicy o różnych zawodach, a tym samym odmiennym przygotowaniu naukowym, można te kontrowersje określić mianem „niekompatybilności nomenklaturowej”. Standaryzacja w tym

zakresie, wydaje się być ważnym wyzwaniem dla uprawiających metrologię medyczną.

Ponadto warto zauważyć, że pomiary wielkości charakteryzujących organizmy lub ich czynności fizjologiczne są najczęściej pomiarami pośrednimi o znacznej niepewności wynikającej z niepewności samej metody oraz trudnej do oszacowania zmienności badanego zjawiska w okresie pomiaru. Dotyczy to nawet sytuacji, w których to wielkość mierzona jest wielkością elektryczną i w zastosowaniach niemiedycznych obarczona jest niepewnością na znacznie niższym poziomie. Przykładami mogą być: pomiar prądu przepływającego przez tkankę/organ lub pomiar impedancji obiektu biologicznego. W tym przypadku np. powtarzalność pomiaru jest gorsza niż podczas podobnych pomiarów prowadzonych chociażby dla przewodnika elektrycznego. Innym przykładem jest pomiar objętości wyrzutowej serca w sposób nieinwazyjny. Klasyczne metody badania przepływu cieczy newtonowskiej, w tym strumienia objętości, nie mogą być w tym przypadku stosowane ze względów etycznych i prawnych.

Zatem, w opinii autora, jednym z istotnych zadań badaczy zajmujących się metrologią medyczną jest rozwijanie dokładniejszych metod i konstruowanie bardziej precyzyjnych urządzeń pomiarowych, co w konsekwencji, prowadziłoby do zmniejszenia niepewności pomiaru do poziomu występującego w zastosowaniach pozamedycznych. Warto zaznaczyć, że w sektorze wytwarzania i eksploatacji urządzeń medycznych priorytetem jest bezpieczeństwo pacjenta i operatora [2]. Dlatego niezbędne jest okresowe sprawdzanie wyrobów stosowanych w diagnostyce i terapii w celu zapewnienia ich niezawodności w całym okresie eksploatacji. Dotyczy to zarówno obowiązku przeprowadzania okresowych wzorcowań urządzeń na poziomie jednostek ich używających, jak też, w niektórych przypadkach, prowadzenia okresowych przeglądów walidujących przez firmy zewnętrzne.

Wykorzystanie promieniowania jonizującego w procedurach medycznych – aspekt metrologiczny

Procedury medyczne, w których stosowane jest promieniowanie jonizujące można podzielić na dwie główne grupy:

- radioterapeutyczne (teleradioterapia, brachyterapia, terapia radioizotopowa),

- diagnostyczne (radiologia, medycyna nuklearna).

Dodatkowo można wyróżnić procedury radiologii zabiegowej (interwencyjnej), gdzie promieniowanie jonizujące jest wykorzystywane do wizualizacji struktur wewnętrznych i wspomaga przeprowadzanie małoinwazyjnych zabiegów chirurgicznych/kardiologicznych.

Z punktu widzenia metrologicznego wyróżniamy dwa zasadnicze aspekty stosowania promieniowania jonizującego w procedurach medycznych:

- określenie wybranych wielkości dozymetrycznych (dawki pochłoniętej / kermy w procedurach terapeutycznych czy aktywności w procedurach medycyny nuklearnej),
- ochrona radiologiczna personelu medycznego i pacjenta, czyli szereg wielkości dozymetrycznych związanych z oceną narażenia (równoważniki dawek).
- Ochrona radiologiczna pacjenta ma znaczenie zarówno dla procedur terapeutycznych, jak i diagnostycznych.

Ochrona radiologiczna stanowi istotne zagadnienie poza obszarem medycznego zastosowania promieniowania jonizującego. Wszystkie podmioty (m.in.: naukowe, dydaktyczne i przemysłowe), w których wykorzystywane jest promieniowanie jonizujące, zobowiązane są, zgodnie z ustawą z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (Dz. U. z 2023 poz. 1173), do stosowania przepisów dotyczących ochrony radiologicznej, w tym oceny narażenia personelu. Kolejną istotną grupą w obszarze ochrony radiologicznej są instytucje państwowe (np. straż pożarna, policja i wojsko), których zadaniem jest zapobieganie i ograniczanie ewentualnych skutków oddziaływania promieniowania jonizującego na ogół ludności [3].

2.1. Podmioty zajmujące się metrologią medyczną

2.1.1. Podmioty zajmujące się metrologią medyczną w zakresie wykorzystania promieniowania jonizującego w procedurach medycznych

Wzajemne przenikanie się obszarów metrologii zostało przedstawione przez Profesor Ewę Burską we wprowadzeniu dotyczącym metrologii chemicznej (część 2.). Ujęto w nim również wybrane przykłady obszarów i dziedzin wiedzy wykorzystujących metrologię chemiczną, które mogą zostać włączone do metrologii medycznej. Między innymi, obejmują one zagadnienia z zakresu chemii klinicznej, chemii medycznej, biochemii, farmacji oraz toksykologii. Z punktu widzenia diagnostyki medycznej oraz terapii istotne jest badanie zawartości tlenu i dwutlenku węgla we krwi. Ocena zawartości zjonizowanego wapnia w surowicy krwi jest przydatna w diagnostyce chorób gruczołów trzypłucowych. Szczególnie istotna jest ocena poziomu jonów podczas procesu sztucznej dializy.

Profesor Janusz Gajda (część 3) podkreślił rolę metrologii elektrycznej w „zapewnianiu wiarygodnych pomiarów na potrzeby diagnostyki i leczenia, jakości wyrobów medycznych oraz przy opracowywaniu nowych, innowacyjnych metod pomiarowych i sprzętu dla sektora ochrony zdrowia”. Jako przykłady przytoczył opracowania Prof. Waldemara Smolika z Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej dotyczące obrazowania metodą tomografii impedancyjnej.

Przykłady zastosowań metrologii optycznej w medycynie i naukach biomedycznych zostały opisane w części 6, „Metrologia optyczna”, przygotowanej przez Profesor Małgorzatę Kujawińską. We wspomnianym rozdziale przytoczona została mikroskopia (optyczna, fazowa, konfokalna, fluorescencyjna, a także wykorzystująca zjawiska nieliniowe), sensory optyczne (także światłowodowe) oraz obrazowanie 2D i 3D (w tym tomografia rentgenowska).

Przykłady zastosowań metrologii geometrycznej w zakresie pomiarów długości i kąta zostały opisane w części 7, przygotowanej przez Profesora Adama Woźniaka. Dotyczyły one precyzyjnego i nieinwazyjnego pomiaru przyrostu długości kości długich i wzrostu dzieci w tygodniowych odstępach czasowych, co ma znaczenie diagnostyczne w niektórych jednostkach chorobowych oraz monitorowaniu stosowanej terapii. Innym podanym tam zastosowaniem jest „rekonstrukcja 3D oraz ocena dokładności odwzorowania ubytków tkanki chrzęstnej lub kostnej z zastosowaniem rentgenowskiej tomografii komputerowej, rezonansu magnetycznego, a po wypreparowaniu również z zastosowaniem bezstykowych lub stykowych współrzędnościowych technik pomiarów geometrycznych”. Autor podkreślił znaczenie metrologii geometrycznej w rozwoju implantologii, w szczególności w zakresie pomiaru długości, kąta oraz odchyłek kształtu i chropowatości powierzchni.

Profesor Jerzy Śladek (część 8) wspomniał o zastosowaniu metrologii współrzędnościowej w warunkach dynamicznych (metrologia 4D) do śledzenia obiektów biologicznych w ruchu. Jako przykłady podał prace Profesor Małgorzaty Kujawińskiej oraz Profesora Roberta Sitnika z Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej.

Szczególne znaczenie w zastosowaniach medycznych ma metrologia prawna, co zostało wspomniane w rozdziale jej dotyczącym. Podkreślono znaczenie uregulowań prawnych w danym państwie i zaznaczono jako kierunek strategiczny rozwoju metrologii prawnej w Polsce „wzmocnienie pozycji i rozwój krajowych jednostek notyfikowanych, pełniących kluczową rolę w systemie oceny zgodności”. Dostępność instytucji certyfikujących odgrywa istotną rolę w rozwoju przemysłu inżynierii biomedycznej, szczególnie w obszarze firm innowacyjnych.

Poniżej zaprezentowano zestawienie jednostek zajmujących się aktywnością naukową w zakresie wykorzystania promieniowania

jonizującego w procedurach medycznych wraz z opisem obszaru ich działania:

1. Główny Urząd Miar (Laboratorium Promieniowania Jonizującego) [4–7]:
 - utrzymanie i doskonalenie wzorców pierwotnych kermey w powietrzu promieniowania rentgenowskiego i gamma oraz zapewnienie ich powiązania z wzorcami innych państw poprzez udział w porównaniach międzynarodowych,
 - utrzymanie i doskonalenie wzorców odniesienia GUM dawki pochłoniętej w wodzie promieniowania gamma, w tym udział w porównaniach międzynarodowych,
 - przekazywanie jednostki kermey oraz jednostki dawki pochłoniętej w wodzie z zachowaniem spójności pomiarowej,
 - współpraca z międzynarodowymi organizacjami metrologicznymi oraz krajowymi instytutami metrologicznymi innych państw,
 - organizowanie i udział w krajowych porównaniach,
 - rozwój wzorców ww. wielkości opartych na metodach kalorymetrycznych i jonometrycznych oraz metodach chemicznych, m.in. dla potrzeb radioterapii, w tym radioterapii z użyciem terapii FLASH i brachyterapii,
 - rozwój wzorców wtórnych indywidualnych równoważników dawek Hp(10) oraz Hp(3) opartych na metodach jonometrycznych (ochrona radiologiczna),
 - realizacja prac badawczych m.in. w projektach realizowanych w ramach programów Ministerstwa Edukacji i Nauki, takich jak: „Polska Metrologia” oraz „Doktorat wdrożeniowy” we współpracy z Politechniką Warszawską oraz Uniwersytetem Jana Kochanowskiego w Kielcach,
2. Narodowe Centrum Badań Jądrowych Ośrodek Radioizotopów POLATOM (Laboratorium Wzorców Radioaktywności):
 - utrzymanie Państwowego Wzorca Jednostki Miary Aktywności Promieniotwórczej Radionuklidów (JMAPR),
 - przekazywanie jednostki miary aktywności promieniotwórczej za pomocą Państwowego Wzorca JMAPR,
 - rozwój metody pomiaru aktywności promieniotwórczej radionuklidów,

3. Politechnika Warszawska (Wydział Mechatroniki):
 - współpraca z Laboratorium Promieniowania Jonizującego Głównego Urzędu Miar w obszarze rozwoju wzorców jonometrycznych i kalorymetrycznych dawki pochłoniętej w powietrzu oraz w wodzie,
4. Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach:
 - współpraca z Laboratorium Promieniowania Jonizującego Głównego Urzędu Miar w obszarze rozwoju wzorców wtórnych indywidualnych równoważników dawek Hp(10) oraz Hp(3),
5. Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk:
 - rozwój metod dozymetrii indywidualnej i środowiskowej opartej o detektory termoluminescencyjne (TLD) oraz optoluminescencyjne (OSL).

Należy także wspomnieć o laboratoriach akredytowanych przez Polskie Centrum Akredytacji (PCA). Laboratoria te posiadają wzorce wtórne wybranych wielkości dozymetrycznych i świadczą usługi wzorcowania szeroko pojętej aparatury dozymetrycznej na rzecz innych podmiotów. Aparatura ta jest wykorzystywana głównie w celach ochrony radiologicznej.

Zakres działania (prowadzonych wzorcowań) jest zależny od zakresu posiadanej akredytacji i może obejmować m.in. [8]:

- dla promieniowania gamma oraz promieniowania rentgenowskiego: kermę w powietrzu, dawkę pochłoniętą w powietrzu, przestrzenny równoważnik dawki, indywidualny równoważnik dawki, kierunkowy równoważnik dawki, dawkę ekspozycyjną, dawkę pochłoniętą w wodzie oraz pochodne tych wielkości w czasie,
- dla promieniowania neutronowego: gęstość strumienia neutronów prędkich, przestrzenny równoważnik dawki neutronów, indywidualny równoważnik dawki neutronów oraz pochodne tych równoważników w czasie,
- powierzchnową emisję promieniowania.

Poniżej przedstawiono wykaz laboratoriów wzorcujących akredytowanych przez Polskie Centrum Akredytacji [8]:

- Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Ośrodek Radioizotopów POLATOM, Laboratorium Wzorców Radioaktywności (akredytacja AP 120) – jedyne w kraju laboratorium wykonujące pomiary aktywności radionuklidów

- α -, β - i γ -promieniotwórczych metodami bezwzględnymi oraz wykonujące pomiary roztworów i źródeł promieniotwórczych,
- Narodowy Instytut Onkologii im. Marii Skłodowskiej-Curie – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Fizyki Medycznej Pracownia Wtórnych Wzorców Dozymetrycznych (akredytacja AP 155) – świadczy usługi z zakresu wzorcowania komórek jonizacyjnych używanych w teleradioterapii oraz komórek studzienkowych używanych w brachyterapii,
- Narodowe Centrum Badań Jądrowych Laboratorium Pomiarów Dozymetrycznych, Dział Kalibracji Aparatury Dozymetrycznej (akredytacja AP 070) – posiada m.in. wzorce wtórne wielkości dozymetrycznych dla promieniowania neutronowego,
- Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Laboratorium Wzorcowania Przyrządów Dozymetrycznych i Radonowych (akredytacja AP 057) – posiada m.in. wzorce wtórne wielkości dozymetrycznych dla promieniowania neutronowego,
- Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk, Laboratorium Wzorcowania Przyrządów Dozymetrycznych (akredytacja AP 029),
- Instytut Medycyny Pracy im. prof. dr. med. J. Nofera w Łodzi, Laboratorium Wzorców Wtórnych (akredytacja AP 075),
- Centralny Wojskowy Ośrodek Metrologii, Zespół Dozymetrii i Chemii Centralnego Wojskowego Ośrodka Metrologii (akredytacja AP 175),
- POLON-ALFA S.A, Laboratorium Wzorcuje Urządzeń Dozymetrycznych (akredytacja AP 109),
- Wojskowy Instytut Chemii i Radiometrii, Laboratorium Badawcze Radiometrów (akredytacja AP 073).1,2

Przedmiotem badań laboratoriów badawczych akredytowanych przez Polskie Centrum Akredytacji są m.in.: dawkomierze w polu promieniowania jonizującego, ciało człowieka, tarczyca człowieka oraz mocz człowieka. Zakres działania (prowadzonych badań) zależy od zakresu posiadanej akredytacji i może obejmować następujące tematy badawcze [9]:

- indywidualny równoważnik dawki Hp(10), Hp(3), Hp(0,07) metodą dozymetrii termoluminescencyjnej (TLD), metodą fotoluminescencji (OSL) lub metodą dozymetrii fotometrycznej,

- kerma w powietrzu K_a metodą dozymetrii termoluminescencyjnej (TLD),
 - przestrzenny równoważnik dawki $H^*(10)$ metodą dozymetrii termoluminescencyjnej (TLD), metodą fotoluminescencji (OSL) lub metodą dozymetrii fotometrycznej,
 - stężenie aktywności radionuklidów gamma promieniotwórczych w ciele człowieka metodą spektrometrii promieniowania gamma,
 - stężenie aktywności radionuklidu ^{131}I oraz ^{125}I w tarczycy człowieka metodą spektrometrii promieniowania gamma,
 - stężenie aktywności radionuklidów w moczu człowieka metodą ciekłej scyntylacji, metodą spektrometrii alfa oraz metodą radiochemiczną.
- Wśród laboratoriów badawczych akredytowanych przez Polskie Centrum Akredytacji znajdują się [9]:

- Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk, Laboratorium Dozymetrii Indywidualnej i Środowiskowej (akredytacja AB 1317),
- Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Pracownia Dawek Indywidualnych i Środowiskowych (AB 450),
- Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Laboratorium Pomiarów Dozymetrycznych, Dział Pomiarów Skażeń (akredytacja AB 567),
- EX-POLON WOJCIECH KWIECIŃSKI, Laboratorium Ex-Polon Wojciech Kwieciński (akredytacja AB 1649),
- Instytut Medycyny Pracy im. prof. dr. med. J. Nofera w Łodzi, Zakład Ochrony Radiologicznej Pracownia Oceny Narażenia Zawodowego (akredytacja AB 327),
- Główny Instytut Górnictwa – Państwowy Instytut Badawczy, Zespół Laboratoriów Badawczych i Wzorcujących (GIG – PIB; akredytacja AB 005),
- Wojskowy Ośrodek Medycyny Prewencyjnej Modlin im. płk. lek. Mikołaja Zygmunta Kwaśniewskiego, Zespół Laboratoryjny Laboratorium Higieny Radiacyjnej (akredytacja AB 1087).

2.1.2. Metrologia medyczna w metodach nieradiologicznych (wybrane zagadnienia)

Wykaz jednostek naukowych prowadzących badania obejmujące szeroko rozumianą metrologię medyczną został sporządzony na podstawie informacji zawartych na stronach internetowych tych jednostek w powiązaniu

z rozeznaniem autora o zakresie prowadzonych prac. Wykorzystano również wyniki ankiety opracowanej i przeprowadzonej na rzecz projektu. W wyniku przeprowadzonej ankiety na 198 odpowiedzi 17 (8,6 %) respondentów wskazało, że wykonuje pomiary w zakresie metrologii medycznej. Na pytanie „do kogo zwróciłibyście się Państwo w przypadku poszukiwania wsparcia w zakresie pomiarów medycznych?” w 3 (2,8 %) przypadkach wskazano „Polskie akredytowane laboratorium medyczne” i w 4 przypadkach (3,7 %) „Zagraniczne akredytowane laboratorium medyczne”. Warto zaznaczyć, że 108 (54,5 %) ze 198 respondentów wskazało na potrzebę wsparcia w zakresie rozwiązywania problemów związanych z pomiarami.

Jednostki naukowe prowadzące badania w zakresie metrologii medycznej:

- Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej,
- Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny,
- Politechnika Bydgoska, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
- Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki,
- Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny,
- Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny,
- Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki,
- Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
- Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Biomedycznej,
- Politechnika Świętokrzyska, Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego,
- Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych,
- Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki,
- Politechnika Wrocławska, Wydział Podstawowych Problemów Techniki,
- Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych,
- Uniwersytet Zielonogórski, Wydział Mechaniczny,
- Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Mechanicznej.

Podstawowy zakres badań urządzeń medycznych (także tych w zastosowaniach nieradiologicznych) obejmuje:

- badanie odporności na zaburzenia: radioelektryczne przewodzone i promieniowane, wyładowania elektrostatyczne, szybkie elektryczne stany przejściowe, udary, zapady i wahania napięcia, pole magnetyczne,
- pomiary emisji zaburzeń radioelektrycznych promieniowanych i przewodzonych.

Podstawową normą w tym zakresie jest PN-EN 60601-1-12 – Medyczne urządzenia elektryczne – Część 1-12: Wymagania ogólne dotyczące bezpieczeństwa podstawowego oraz funkcjonowania zasadniczego – Norma uzupełniająca: Wymagania dotyczące medycznych urządzeń elektrycznych i medycznych systemów elektrycznych przeznaczonych do stosowania w środowisku działania medycznych służb ratowniczych [10].

Metodyki poszczególnych badań zostały przedstawione w normach wymienionych niżej:

- PN-EN 61000-4-2 – Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 4-2: Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na wyładowania elektrostatyczne [11],
- PN-EN IEC 61000-4-3 – Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 4-3: Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na promieniowane pole elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej [12],
- PN-EN 61000-4-4 – Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 4-4: Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na serie szybkich elektrycznych stanów przejściowych [13],
- PN-EN 61000-4-5 – Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 4-5: Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na udary [14],
- PN-EN IEC 61000-4-6 – Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 4-6: Metody badań i pomiarów. Odporność na zaburzenia przewodzone, indukowane przez pola o częstotliwości radiowej [15],
- PN-EN 61000-4-8 – Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 4-8: Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na pole magnetyczne o częstotliwości sieci elektroenergetycznej [16],
- PN-EN IEC 61000-4-11 – Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 4-11: Metody badań i pomiarów. Badania odporności

na zapady napięcia, krótkie przerwy i zmiany napięcia dla urządzeń o znamionowym prądzie fazowym nie przekraczającym 16 A [17],

- PN-EN 55011 – Urządzenia przemysłowe, naukowe i medyczne. Charakterystyki zaburzeń o częstotliwości radiowej. Poziomy dopuszczalne i metody pomiaru [18].

Do przykładowych badań urządzeń medycznych można zaliczyć:

- pomiar emisji promieniowanej urządzenia do częstotliwości 1 GHz,
- pomiar emisji przewodzonej urządzenia w zakresie częstotliwości 150 kHz–30 MHz,
- badanie odporności na zaburzenia przewodzone indukowane przez pole o częstotliwości radiowej,
- badanie odporności na pole elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej,
- badanie odporności na serię szybkich stanów przejściowych,
- badanie odporności na udary,
- badanie odporności na zapady napięcia, krótkie przerwy i zmiany napięcia,
- badanie odporności na pole magnetyczne,
- badanie odporności na wyładowania elektrostatyczne (ESD).

Laboratoria przeprowadzające wymienione pomiary można znaleźć dzięki wyszukiwarce znajdującej się na stronie Polskiego Centrum Akredytacji: <https://www.pca.gov.pl/akredytowane-podmioty/akredytacje-aktywne/laboratoria-badawcze/> [9].

2.2. Zasoby techniczno-aparaturowe

Poziom zasobów techniczno-aparaturowych Głównego Urzędu Miar w zakresie wzorców jonometrycznych nie odbiega od rozwiązań stosowanych w innych Krajowych Instytucjach Metrologicznych (ang. *National Metrology Institute* – NMI). Ponadto GUM prowadzi szereg badań związanych z rozwojem wzorców kalorymetrycznych oraz chemicznych. Prowadzone obecnie prace w ramach projektów badawczych i programu Ministerstwa Edukacji i Nauki „Doktorat wdrożeniowy” mają na celu podniesienie kompetencji oraz poziomu zasobów techniczno-aparaturowych do co najmniej takiego, na jakim są inne NMI [19].

Poziom zasobów techniczno-aparaturowych laboratoriów wzorcujących akredytowanych w PCA w zakresie promieniowania gamma oraz pomiarów skażeń powierzchniowych można określić jako porównywalny do rozwiązań stosowanych na świecie. Większość z ww. laboratoriów korzysta z wzorców wyższego rzędu posiadanych przez GUM, jednak niektóre z nich korzystają z usług innych NMI. Podobnie można ocenić poziom zasobów techniczno-aparaturowych laboratoriów badawczych akredytowanych w PCA.

W Polsce w zakresie dozymetrii (metrologii) promieniowania neutronowego nie ma wystarczającego poziomu zasobów techniczno-aparaturowych. Nie posiadamy w kraju wzorców wyższego rzędu, w tym wzorców państwowych wielkości dozymetrycznych dla promieniowania neutronowego. Jedynie dwa laboratoria wzorcujące posiadają stosowną akredytację w tym zakresie (Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej oraz Narodowe Centrum Badań Jądrowych). Laboratoria te odnoszą swoje wzorce do wzorców wyższego rzędu w zagranicznych NMI (w National Physical Laboratory (NPL), Wielka Brytania lub Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Niemcy).

W Europie takie wzorce posiada kilka NMI m.in.: National Physical Laboratory (NPL), Wielka Brytania, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Niemcy oraz Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), Francja.

2.3. Identyfikacja problemów i potrzeb

Obecnie wzorce pierwotne wielkości dozymetrycznych stosowanych w procedurach medycznych oraz w ochronie radiologicznej znajdują się w Laboratorium Promieniowania Jonizującego Głównego Urzędu Miar. Wyjątkiem jest wzorzec jednostki miary aktywności promieniotwórczej radionuklidów. Wzorzec ten jest przechowywany i stosowany w Narodowym Centrum Badań Jądrowych Ośrodku Radioizotopów POLATOM w Otwocku, w Laboratorium Wzorców Radioaktywności (LWR), które jest jedynym w kraju laboratorium wykonującym pomiary aktywności radionuklidów α -, β - i γ -promieniotwórczych metodami bezwzględnymi roztworów i zamkniętych źródeł promieniotwórczych [20, 21].

W Laboratorium Promieniowania Jonizującego Głównego Urzędu Miar utrzymywane i rozwijane są m.in.: wzorce pierwotne kermey

w powietrzu promieniowania rentgenowskiego, a także wzorce dawki pochłoniętej w wodzie promieniowania gamma oparte o metody kalorymetryczne i jonometryczne oraz metody chemiczne.

Z punktu widzenia radioterapii dostarczenie zaplanowanej, dokładnie określonej wartości dawki pochłoniętej w obszarze leczonym jest krytyczne w aspektach, takich jak: powodzenie leczenia oraz minimalizacja skutków promieniowania jonizującego w tkankach zdrowych. Pierwszym krokiem zapewniającym skuteczną terapię promieniowaniem jonizującym jest więc poprawne (dokładne) odtwarzanie wielkości dawki pochłoniętej w wodzie i przekazywanie tej wielkości w procesie wzorcowania na wtórne wzorce, a następnie na użytkowane w zakładach radioterapii komory jonizacyjne oraz zapewnienie powtarzalności podawania dawek w obszarze leczonym podczas frakcjonowania dawki.

Niezależnie od tego trwają prace nad rozwojem wzorców opartych o metody jonometryczne (m.in. „Doktorat wdrożeniowy” i projekt „Polska Metrologia”), jak również metody kalorymetryczne (m.in. „Doktorat wdrożeniowy”) przy współpracy z Wydziałem Mechatroniki PW dla potrzeb radioterapii, w tym z użyciem terapii FLASH.

Prace te mają na celu m.in. ustanowienie wzorców pierwotnych dawki pochłoniętej w wodzie w szczególności dla potrzeb radioterapii, co pozwoli na zmniejszenie niepewności oraz skrócenie łańcucha przekazywania jednostki do ośrodków ochrony zdrowia. Dodatkowo mają unikalny na skalę światową charakter, a ich rezultaty mogą być kluczowe w odniesieniu do działalności GUM na arenie międzynarodowej.

W obszarze ochrony radiologicznej w GUM trwają prace nad rozwojem wzorców wtórnych indywidualnych równoważników dawek $H_p(10)$ oraz $H_p(3)$ bazujących na metodach jonometrycznych. Wielkość $H_p(3)$ odpowiada równoważnikowi dawki na głębokości 3 mm i służy do oceny dawek otrzymywanych przez soczewkę oka, natomiast $H_p(10)$ dla głębokości 10 mm pozwala oszacować dawkę otrzymaną na całe ciało. Wielkości te stanowią podstawę szacowania narażenia zarówno personelu medycznego (jako osób zawodowo narażonych na działanie promieniowania jonizującego), jak i pacjenta. Celem tych prac jest ustanowienie wzorców wtórnych oraz uzyskanie możliwości oceny rzeczywistego narażenia w środowisku pracy (nie tylko w obszarze medycyny) z niepewnością poniżej 5 %.

Główny Urzędu Miar posiada i rozwija wzorce państwowe. Wzorce te są wykorzystywane do wzorcowania aparatury oraz do przekazywania jednostek do wzorców niższego rzędu. Ponadto GUM organizuje porównania międzylaboratoryjne oraz badania biegłości z nimi związane.

Podmiotami wykorzystującymi wzorce niższego rzędu są przede wszystkim laboratoria wzorcujące akredytowane przez Polskie Centrum Akredytacji (metrologia stosowana). Wśród tych jednostek można wymienić: Narodowy Instytut Onkologii im. Marii Skłodowskiej-Curie – Państwowy Instytut Badawczy, Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Instytut Medycyny Pracy im. prof. dr. med. J. Nofera w Łodzi, Wojskowy Instytut Chemii i Radiometrii, Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk oraz POLON-ALFA S.A.

Jednostki te posiadają wzorce wtórne wybranych wielkości dozymetrycznych i świadczą usługi wzorcowania szeroko pojętej aparatury dozymetrycznej na rzecz innych podmiotów zależnie od zakresu posiadanej akredytacji. Procedury przeprowadzanych przez te laboratoria wzorcowań są wymaganiami wewnętrznymi opracowywanymi przez te laboratoria na podstawie dedykowanych norm obowiązujących taką działalność.

Wśród wymienionych laboratoriów Narodowy Instytut Onkologii im. Marii Skłodowskiej-Curie – Państwowy Instytut Badawczy świadczy usługi skierowane przede wszystkim do ośrodków radioterapeutycznych, oferując wzorcowanie komór jonizacyjnych w następujących wielkościach: dawka pochłonięta w wodzie oraz kerma w powietrzu.

Większość ze wskazanych laboratoriów korzysta z wzorców wyższego rzędu posiadanych przez GUM, jednak niektóre z nich korzystają z usług zagranicznych NMI (ang. *National Metrology Institute*).

Należy zauważyć, że brakuje w Polsce wzorców wyższego rzędu, w tym wzorców państwowych wielkości dozymetrycznych dla promieniowania neutronowego. Jedynie dwa laboratoria wzorcujące posiadają stosowną akredytację w tym zakresie (Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej oraz Narodowe Centrum Badań Jądrowych). Laboratoria te odnoszą swoje wzorce do wzorców wyższego rzędu w zagranicznych NMI, przy czym w Europie takie wzorce posiada tylko kilka jednostek.

Krajowe potrzeby wzorcowania aparatury dozymetrycznej przeznaczonej do detekcji promieniowania neutronowego mają mniej

więcej stały poziom. Jednak uwzględniając Program Polskiej Energetyki Jądrowej potrzeby te w momencie powstania elektrowni jądrowych w Polsce znacząco wzrosną. W świetle tego konieczne wydaje się rozszerzenie kompetencji GUM w tym zakresie. Wymagać to będzie budowy specjalistycznego laboratorium spełniającego wymagania stawiane dozymetrii neutronowej i budowy nowych wzorców wielkości dozymetrycznych dla promieniowania neutronowego.

Metrologia medyczna jest szczególnym działem metrologii. Będzie ona przede wszystkim korzystać z rozwoju metod pomiarowych dostępnych w innych zastosowaniach, a do zadań osób zajmujących się metrologią medyczną należeć będzie identyfikacja i predykcja szczególnych potrzeb sektora medycznego. Zapewne będą one pochodną upowszechniania stosowania sprzętu medycznego w praktyce domowej (w tym zakresie konieczne będzie zapewnienie odpowiedniej ich jakości i bezpieczeństwa) oraz identyfikacji nowych obszarów zastosowań związanych z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji w już stosowanych metodach diagnostycznych oraz tych, które będą dzięki nim rozwijane.

Towarzyszyć temu będzie wzrost liczby osób przewlekle chorych, w tym na nowotwory, choroby neurodegeneracyjne i choroby sercowo-naczyniowe, które należało będzie objąć opieką na poziomie odpowiadającym rozwojowi społeczeństwa. Taki stan rodzić będzie wymagania w zakresie odpowiedniej ilości aparatury medycznej, także do użytku domowego, oraz zapewnienia monitorowania osób w ich miejscach przebywania. Stale powiększająca się liczba dostępnej aparatury medycznej stymulować będzie konieczność sprostania wymaganiom o charakterze metrologicznym.

Innym przewidywanym obszarem rozwoju inżynierii biomedycznej, a tym samym i metrologii medycznej, będzie rozwijanie kosztownych badań/działań przesiewowych w zakresie diagnostyki, a w późniejszym etapie również terapii. Wiązać się to będzie z bardziej świadomymi wymaganiami ze strony pacjentów wobec dostawców usług i aparatury medycznej, którzy będą oczekiwać już nie tylko diagnozowania i leczenia na wysokim poziomie, ale również podejmowania działań na rzecz przewidywania i zapobiegania chorobom. Postęp

technologiczny, popularyzacja urządzeń medycznych domowego, także paliatywnego użytku będą wymuszały również odpowiednie działania ze strony służb metrologicznych.

Jedną z misji inżynierów biomedyków jest rozwijanie metod i technik pomiarowych charakteryzujących się – w stopniu coraz bliższym rozwiązaniom idealnym – wysoką czułością, swoistością (specyficznością), powtarzalnością oraz bezinwazyjnością wobec badanego obiektu. Wymienione cechy charakteryzują również metody stosowane w innych działach metrologii, z tą różnicą, że postulat niezakłócania pomiaru, w przypadku obiektów biologicznych obejmuje również brak ingerencji w badane organizmy (bezkrwawość, nienaruszanie integralności obiektu, brak zakłócania jego funkcji itp.).

Innym zadaniem inżynierów biomedyków jest oddziaływanie na środowiska medyczne w taki sposób, aby oferowane metody pomiarowe i diagnostyczne umożliwiały zastąpienie wielkości ocenianych jakościowo, z dużą dozą subiektywności, metodami ilościowymi podającymi wyniki w uznanych jednostkach pomiarowych (także od nich pochodnych) lub w sposób względny. Przykładowo, określenia wykorzystywane podczas opisu badania fizykalnego, takie jak: „słaby puls”, „puls niemiarowy”, „niewydolne serce” itp., charakterystyczne już dla dawnej medycyny chińskiej, w której opisywano kilkanaście rodzajów pulsu, kompleksowo określały stan układu krążenia (obejmując efektywność pracy serca, ciśnienie tętnicze oraz stan naczyń krwionośnych). Ocena ta, w wysokim stopniu subiektywna, zależna od doświadczenia medyka, sprawdzała się w przypadku braku innych metod diagnostycznych. Dzisiaj powszechnie dostępne są miniaturowe urządzenia, np. pulsoksymetry, które umożliwiają śledzenie krzywej sfigmomanometrycznej, co pozwala na ilościowe określenie wielkości pulsu, poziomu saturacji tlenem krwi, a także pozwala zaobserwować oddziaływanie niemiarowej pracy serca na przepływ krwi. Jednak ocena niemiarowości czy też detekcji zaburzeń rytmu nie jest prowadzona w sposób ilościowy, chociaż istnieją do tego możliwości technologiczne.

W medycynie nadal wykorzystuje się jakościową ocenę funkcji lub stanu poszczególnych układów, stosując tam, gdzie jest to możliwe skale medyczne. Przykładowo, stan zdrowia noworodka w pierwszych minutach po porodzie (1., 3., 5. i 10.) oceniany jest w skali Apgar (0–10, eponim od nazwiska dr Virginii Apgar, która w 1953 r.

zaproponowała syntetyczną, sumaryczną ocenę uwzględniającą 5 istotnych parametrów życia (częstotliwość rytmu serca, oddychanie, napięcie mięśniowe, odruchy oraz zabarwienie skóry) wyrażanych liczbami od 0 do 2) [22]. Innym znanym przykładem skali stosowanej w diagnostyce medycznej jest czterostopniowa klasyfikacja wg *New York Heart Association* (I – bez ograniczeń, IV – każda aktywność fizyczna wywołuje dolegliwości) do oceny aktywności fizycznej w niewydolności serca [23]. Wydaje się, że rozwój powszechnie dostępnych, wygodnych w użyciu metod i urządzeń diagnostycznych spowoduje odchodzenie od ocen jakościowych i stosowania skal medycznych na rzecz syntetycznych wskaźników oceny ilościowej. Zapewne stanowić to będzie jedno z wyzwań zarówno inżynierii biomedycznej, jak również związanej z nią metrologii medycznej.

Baki Karaböce w swojej pracy z 2020 r., zatytułowanej *Challenges for medical metrology* [24] i dotyczącej głównie stanu metrologii medycznej w Turcji, zauważył, że metrologia w dziedzinach wojskowych i przemysłowych została bardzo dokładnie ugruntowana. Powinno to stanowić przykład dla standaryzacji realizowania pomiarów i wzorcowania medycznych. Warto również zwrócić uwagę na pewien paradoks. Dbłość o niski poziom niepewności pomiarów medycznych ma kluczowe znaczenie dla dokładniejszej diagnozy i bardziej skutecznego leczenia, a co prowadzi do ograniczenia lub optymalizacji wydatków na opiekę zdrowotną przy zachowaniu właściwych standardów leczenia. Równocześnie znaczenie metrologii medycznej i jej umocowanie prawne nie jest adekwatne do wyzwań, jakie wynikają z wymienionej przesłanki. Autor postulował również o rozwój metrologii prawnej i naukowej w tym zakresie. Zauważył, że powinny zostać utworzone wielodyscyplinarne laboratoria metrologiczne, aby zachować identyfikowalność procesów metrologicznych w wieloparametrycznych urządzeniach medycznych, które z założenia umożliwiają przeprowadzanie pomiarów wykorzystujących wiele wielkości. W jednym, tradycyjnym laboratorium metrologicznym skupionym wokół jednej dyscypliny, trudno jest poprawnie weryfikować wyroby medyczne, które wykorzystują równocześnie np. pomiar ciśnienia, przepływu, temperaturę, impedancję itp.

Nie bez znaczenia jest również odpowiednie kształtowanie programów edukacji w zakresie metrologicznym oraz prowadzenie szkoleń. Działania te mogą zwiększyć świadomość personelu medycznego

w zakresie wymagań dotyczących przeprowadzania pomiarów i wzorcowania urządzeń medycznych. Badania w dziedzinie medycyny oparte na metodach uwzględniających poprawność metrologiczną umożliwią projektowanie i wytwarzanie bardziej dokładnych urządzeń medycznych przeznaczonych do diagnostyki i terapii. Mogą mieć one szczególne znaczenie dla producentów o małym potencjale wytwórczym oraz nowo powstających firm innowacyjnych.

W dniu 21 czerwca 2022 r. Rada Ministrów RP podjęła uchwałę o przyjęciu dokumentu „Rządowy Plan Rozwoju Sektora Biomedycznego na lata 2022–2031” i powierzeniu realizacji założeń Agencji Badań Medycznych przy nadzorze ministra właściwego do spraw zdrowia. Celem wdrożenia tego programu jest „rozwój sektora biomedycznego w Rzeczypospolitej Polskiej oraz osiągnięcie przez Rzeczpospolitą Polską pozycji lidera przemysłu biomedycznego w Europie Środkowo-Wschodniej” [25].

Te ambitnie zarysowane cele, jeśli znajdą się odpowiednie warunki do ich realizacji, z pewnością implikować będą konieczność rozwoju metrologii medycznej. W planie tym nakreślono zakres i dostrzeżono złożoność sektora biomedycznego. Podkreślono również znaczenie postępu w naukach biologicznych dla systemu ochrony zdrowia z uwzględnieniem najważniejszych trendów w rozwoju sektora biotechnologii medycznej oraz szerzej, wpływu odpowiedniego zarządzania w działalności badawczo-rozwojowej nakierowanej na bezpieczeństwo w zakresie zdrowia.

Okres pandemii, a także spowodowane innymi zdarzeniami o oddziaływaniu globalnym zakłócenia w łańcuchach dostaw komponentów uwidocznily potrzebę budowania suwerenności technologicznej państwa, która ma znaczenie nie tylko w zakresie zwiększania bezpieczeństwa zewnętrznego, militarnego, ale również zdrowotnego obywateli. Warto zaznaczyć, że w wyniku zmian podczas transformacji ustrojowej praktycznie zlikwidowano fabryki produkujące półprzewodniki oraz ośrodki rozwojowe przemysłu elektronicznego powszechnego użytku (taką rolę pełnił *quasi*-konglomerat gospodarczy Unitra). Obecnie nie mamy w Polsce nawet średniej wielkości firmy elektronicznej, która stanowiłaby naturalne zaplecze dla projektowania i produkcji zaawansowanych urządzeń medycznych. W Korei Południowej, kraju o podobnej wielkości oraz trudniejszej od polskiej historii rozwoju, istnieją koncerny o zasięgu światowym (np. Samsung czy LG), które

mogą prowadzić pełen cykl rozwoju produktu finalnego od wytwarzania komponentów, poprzez proces projektowania urządzenia, wykonywania prac wdrożeniowych po produkcję. Firmy mają możliwość prowadzenia prac rozwojowych dających przewagę innowacyjną nie tylko w zakresie urządzeń powszechnego użytku, ale także w obszarze wytwarzania urządzeń medycznych. Wydaje się, że bez długofalowych i celowanych inwestycji państwowych nie będzie możliwe usunięcie opóźnienia technologicznego w tym zakresie.

Literatura

1. Squara P., Imhoff M., Cecconi M., *Metrology in medicine: from measurements to decision, with specific reference to anesthesia and intensive care*, „Anesthesia & Analgesia” 2015, vol. 120, no. 1, s. 66–75.
2. Taylor A., *Standards: Medical Devices*, https://bioe.uw.edu/wp-content/uploads/2013/07/StandardsHandout_2013.pdf (dostęp: 30.04.2024 r.).
3. Olko P., Krajewski P. (red.) *Ochrona radiologiczna w Polsce wobec wyzwań polskiego programu energetyki jądrowej – badania, rozwój, kadry*, raport, Polskie Konsorcjum Ochrony radiologicznej, 2023, <https://konsorcjum.informa.waw.pl/wp-content/uploads/2023/11/Raport-ROCHRONA-RADIOLOGICZNA-W-POLSCE-WOBEC-WYZWAN-POLSKIEGO-PROGRAMU-ENERGETYKI-JADROWEJ-BADANIA-ROZWOJ-KADRY.pdf>.
4. Szymko M.M., Michalik L., Knyziak A.B., Wójtowicz A.W., *Development and characterization of air kerma cavity standard*, „Measurement” 2019, vol. 136, s. 647–657.
5. Szymko M.M., Knyziak A.B., Derlaciński M., *Graphite ionization chamber as an ionometric standard of absorbed dose to water for Co-60 gamma radiation*, „Measurement” 2022, vol. 194, 110928.
6. Kessler C., Burns D., Knyziak A., Szymko M., Derlaciński M., *Key comparison BIPM.RI(I)-K1 of the air-kerma standards of the GUM, Poland and the BIPM in 60 Co gamma radiation*, „Metrologia” 2021, vol. 58, no. 1A, 06011.
7. Kessler C., Burns D., Knyziak A., Szymko M., Derlaciński M., *Key comparison BIPM.RI(I)-K4 of the absorbed dose to water standards of the GUM, Poland and the BIPM in 60 Co gamma radiation*, „Metrologia” 2021, vol. 58, no. 1A.

8. Polskie Centrum Akredytacji, Laboratoria wzorcujące, <https://pca.gov.pl/akredytowane-podmioty/akredytacje-aktywne/laboratoria-wzorcujsce/> (dostęp: 30.04.2024 r.).
9. Polskie Centrum Akredytacji, Laboratoria badawcze, <https://pca.gov.pl/akredytowane-podmioty/akredytacje-aktywne/laboratoria-badawcze/> (dostęp: 30.04.2024 r.).
10. PN-EN 60601-1-2:2015-11 – Medyczne urządzenia elektryczne – Część 1-2: Wymagania ogólne dotyczące bezpieczeństwa podstawowego oraz funkcjonowania zasadniczego – Norma uzupełniająca: Zakłócenia elektromagnetyczne – Wymagania i badania.
11. PN-EN 61000-4-2:2011 – Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-2: Metody badań i pomiarów – Badanie odporności na wyładowania elektrostatyczne.
12. PN-EN IEC 61000-4-3:2021-06 – Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-3: Metody badań i pomiarów – Badanie odporności na promieniowane pole elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej.
13. PN-EN 61000-4-4:2013-05 – Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-4: Metody badań i pomiarów – Badanie odporności na serie szybkich elektrycznych stanów przejściowych.
14. PN-EN 61000-4-5:2014-10 – Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-5: Metody badań i pomiarów – Badanie odporności na udary.
15. PN-EN IEC 61000-4-6:2024-03 – Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-6: Metody badań i pomiarów – Odporność na zaburzenia przewodzone, indukowane przez pola o częstotliwości radiowej.
16. PN-EN 61000-4-8:2010 – Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-8: Metody badań i pomiarów – Badanie odporności na pole magnetyczne o częstotliwości sieci elektroenergetycznej.
17. PN-EN IEC 61000-4-11:2020-11 – Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-11: Metody badań i pomiarów – Badania odporności na zapady napięcia, krótkie przerwy i zmiany napięcia dla urządzeń o znamionowym prądzie fazowym nie przekraczającym 16 A.
18. PN-EN 55011:2016-05 – Urządzenia przemysłowe, naukowe i medyczne – Charakterystyki zaburzeń o częstotliwości radiowej – Poziomy dopuszczalne i metody pomiaru.

19. EURAMET, <https://www.gum.gov.pl/pl/wspolpraca/miedzynarodowa/euramet/443,EURAMET.html> (dostęp: 30.04.2024 r.)
20. Ziemek T., Capogni M., Broda R., De Felice P., Dziel T., Listkowska A., *Bilateral comparison of ^{14}C activity measurements at the NCBJ RC POLATOM and the ENEA-INMRI*, „Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry” 2017, vol. 314, s. 721–725.
21. Ziemek T., Capogni M., Ratel G., Broda R., Dziel T., Fazio A., Listkowska A., *Comparison of ^{131}I activity measurements at the NCBJ RC POLATOM and the ENEA-INMRI linked to the BIPM SIR system*, „Applied Radiation and Isotopes” 2018, vol. 134, s. 380–384.
22. Apgar V., *A proposal for a new method of evaluation of the newborn infant*, „Current Researches in Anesthesia & Analgesia” 1953, vol. 32 no. 4, s. 260–267.
23. Criteria Committee, New York Heart Association, Inc. Diseases of the Heart and Blood Vessels. Nomenclature and Criteria for diagnosis, 6th edition Boston, Little, Brown and Co. 1964, s. 114.
24. Karaböce B., *Challenges for medical metrology*, „IEEE Instrumentation & Measurement Magazine” 2020, vol. 23, no. 4, s. 48–55.
25. Rada Ministrów, Rządowy Plan Rozwoju Sektora Biomedycznego, uchwała nr 141/2022 Rady Ministrów z dnia 21 czerwca 2022 r. w sprawie przyjęcia dokumentu.

W rozdziale przedstawiono diagnozę stanu metrologii medycznej w Polsce oraz opisano strategiczne kierunki jej dalszego rozwoju. W pierwszej części określono obszar merytoryczny, będący przedmiotem opracowania, a w kolejnej wymieniono podmioty zajmujące się metrologią medyczną w zakresie wykorzystania promieniowania jonizującego oraz metod nieradiologicznych. Zaprezentowano także syntetyczne informacje dotyczące zasobów techniczno-aparaturowych oraz zidentyfikowanych problemów i potrzeb. Następnie skoncentrowano się na przyszłości metrologii medycznej, nakreślając kierunki jej rozwoju. Stwierdzono przede wszystkim, że w wyniku zmian podczas transformacji ustrojowej praktycznie zlikwidowano fabryki produkujące półprzewodniki oraz ośrodki rozwojowe przemysłu elektronicznego powszechnego użytku. Obecnie nie ma w Polsce nawet średniej wielkości firmy elektronicznej, która stanowiłaby naturalne zaplecze dla projektowania i produkcji zaawansowanych urządzeń medycznych. Podkreślono, że metrologia medyczna, będąca kluczowym elementem nowoczesnej opieki zdrowotnej, odgrywa istotną rolę w zapewnieniu dokładnych, rzetelnych i powtarzalnych pomiarów, niezbędnych w diagnostyce, terapii oraz monitorowaniu stanu zdrowia pacjentów. Jej rozwój wzmocni pozycję Polski na arenie międzynarodowej, co jest niezbędne dla podniesienia standardów opieki zdrowotnej.

Słowa kluczowe: metrologia medyczna, „Polska Metrologia”, diagnoza stanu metrologii, strategiczne kierunki rozwoju metrologii

CZĘŚĆ SZÓSTA

Metrologia optyczna



Prof. dr hab. inż. Małgorzata Kujawińska

ORCID: 0000-0001-6521-6951

Politechnika Warszawska

ROR: <https://ror.org/00y0xnp53>

Uzyskała stopień magistra, stopień doktora, stopień doktora habilitowanego oraz tytuł profesora odpowiednio w latach 1976, 1982, 1990 i 1997 w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn. Obecnie jest zatrudniona na stanowisku profesora w Instytucie Mikromechaniki i Fotoniki Politechniki Warszawskiej (PW). Obszary zainteresowań to: optyka stosowana i inżynieria fotoniczna, metrologia optyczna, polowe pomiary optyczne w zastosowaniach do biomedycyny, mechaniki, inżynierii lądowej i multimediów, cyfrowe przetwarzanie obrazów. Jest autorem i współautorem ponad 500 publikacji naukowych, w tym trzech książek i czterech patentów. Wypromowała 26 doktorów i obecnie jest opiekunem trzech doktorantów.

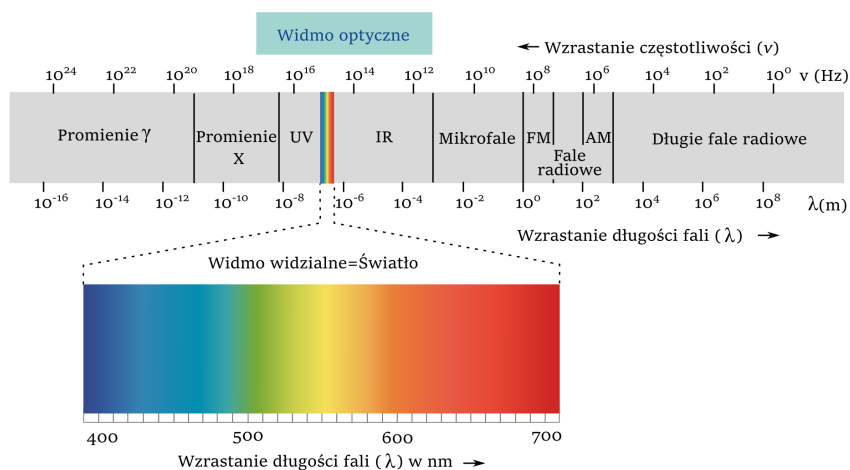
W latach 1986–1989 pracowała w National Physical Laboratory (Wielka Brytania). W okresie 1997–2020 kierowała Zakładem Inżynierii Fotonicznej na Wydziale Mechatroniki PW. W latach 1998–2002 była prodziekanem ds. nauki na tym Wydziale. W 2003 r. weszła do prezydium SPIE - the International Society for Optics and Photonics, a w 2005 r. została prezydentem tej organizacji. W latach 2005–2018 była wiceprezydentem Europejskiej Platformy Technologicznej Photonics21. Kierowała licznymi projektami europejskimi oraz prestiżowymi projektami krajowymi (Mistrz FNP, Maestro NCN, Team i Team-Tech FNP).

W 1997 r. została Fellowem SPIE, a w 2003 r. Fellowem międzynarodowej organizacji OPTICA. Za swoją działalność naukową, dydaktyczną i organizacyjną została odznaczona Krzyżem Kawalerskim Orderu Odrodzenia Polski (2011 r.), Złotym Krzyżem Zasługi (1999 r.), licznymi nagrodami Ministra i Rektora PW. W 2013 r. uzyskała prestiżową nagrodę im. Chandra S. Vikram za osiągnięcia w metrologii optycznej, a w 2022 r. nagrodę im. Denisa Gabora za prace w obszarze holografii cyfrowej.

Określenie obszaru merytorycznego metrologii optycznej

Metrologia optyczna (MO) jest nauką i techniką wykorzystującą promieniowanie elektromagnetyczne (ang. *electromagnetic* – EM) z zakresu optycznego do pomiarów. Zakres optyczny obejmuje (zgodnie z ISO 80000-7 – Quantities and units – Part 7: Light and radiation [1]) promieniowanie o długościach fal od 1 nm do 1 mm (ryc. 1). Najczęściej stosowany zakres promieniowania elektromagnetycznego to promieniowanie widzialne rozszerzone do 1 μm , tzn. do zakresu czułości widmowej najpopularniejszych detektorów krzemowych. Obecnie jednak, ze względu na szybki rozwój, zwiększoną dostępność i zmniejszający się koszt zarówno detektorów, jak i źródeł promieniowania w innych zakresach spektralnych, w systemach pomiarowych coraz częściej wykorzystywane są promieniowanie podczerwone (ang. *infrared* – IR) i, nieco rzadziej, ultrafioletowe (ang. *ultraviolet* – UV). W zastosowaniach specjalnych metrologdy sięgają również po promieniowanie terahertzowe (ang. *terahertz* – THz) o długości fali do 1 mm oraz ekstremalny nadfiolet (ang. *extreme ultraviolet* – EUV) o długości fali rzędu kilkunastu nanometrów. Cechą wspólną wszystkich optycznych metod pomiarowych jest fakt, że mierzone wielkości kodowane są poprzez modyfikację podstawowych parametrów promieniowania EM, tzn. jego amplitudy (intensywności), fazy, długości fali (częstotliwości) lub polaryzacji.

Optyczne metody pomiarowe wykorzystują zarówno światło niekoherentne czasowo (polichromatyczne) i/lub przestrzennie, jak i koherentne (laserowe) oraz częściowo koherentne (np. diody elektroluminescencyjne LED). Podstawowe zjawiska fizyczne, stosowane do kodowania informacji o mierzonym obiekcie, które modyfikują padające promieniowanie to: absorpcja, emisja, rozpraszanie, dyfrakcja, interferencja oraz zjawiska nieliniowe występujące w trakcie interakcji pomiędzy światłem i materią.



Ryc. 1. Zakres widma elektromagnetycznego z zaznaczonymi obszarami widma widzialnego i optycznego [2]

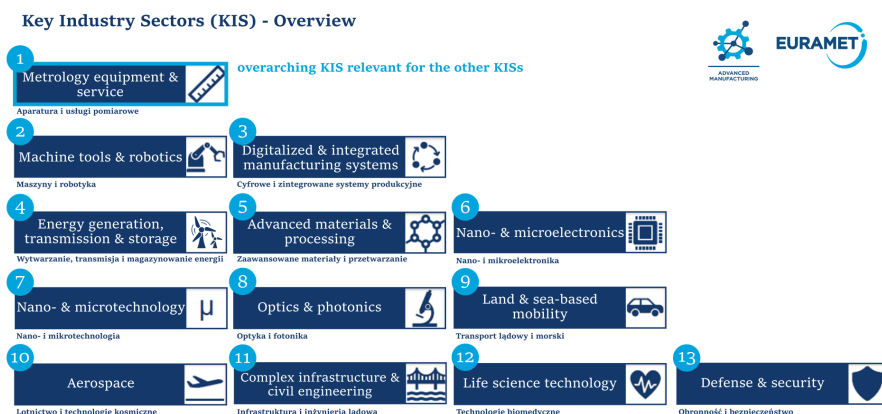
Cechami charakterystycznymi i równocześnie zaletami, które wyróżniają metody optyczne wśród innych metod pomiarowych są: szybkość, bezkontaktowość, w większości przypadków bezinwazyjność, duży zakres pomiarowy (od nm do km) w zależności od zastosowanej metody, duża czułość pomiarowa (dla metod interferometrycznych nawet do ułamka nm) oraz możliwość pomiarów zarówno punktowych (czujniki), jak i w całym polu widzenia z jego próbkowaniem w przestrzeni i czasie (tzw. metody polowe z wykorzystaniem detektorów matrycowych CCD/CMOS). Dane pozyskiwane polowymi metodami pomiarowymi są łatwe do wizualizacji 2D (x,y), 3D (x,y,z) oraz 4D (x,y,z;t), a także są kompatybilne z wieloma narzędziami inżynierskimi (np. oprogramowaniem CAD, CAE, MES, grafiką komputerową) i przez to doskonale wpisują się w ideę inteligentnego wytwarzania (ang. *smart manufacturing*) oraz cyfryzację procesów przemysłowych [3].

Wielkości wyznaczone metodami optycznymi na podstawie zmodyfikowanych parametrów promieniowania obejmują bardzo szeroki zakres aplikacji „obsługiwanych” przez wszystkie obszary metrologii, których nazwy są powiązane bezpośrednio z wielkościami mierzonymi:

- metrologia współrzędnościowa (optyczne metody pomiarów obiektów trójwymiarowych: metody światła strukturalnego, interferometria, fotogrametria),

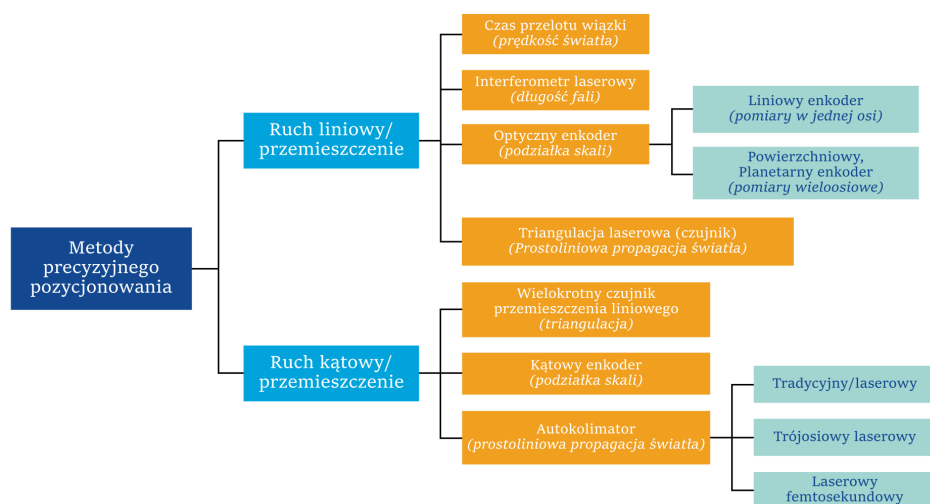
- metrologia wielkości geometrycznych (wszystkie typy mikroskopii, interferometria, ToF (ang. *Time of Flight*), metody rozproszeniowe, pomiary geodezyjne, polarymetria, widzenie maszynowe, cyfrowa korelacja obrazu),
 - metrologia elektryczna (sensory optyczne (w tym światłowodowe), fotometria, termometria),
 - metrologia wielkości fizycznych (interferometria, spektrometria, metrologia kwantowa, mikroskopia),
 - metrologia chemiczna (spektrometria, mikroskopia fluorescencyjna).
- Ponadto wielkości wyznaczane metodami optycznymi zawierają obszary metrologii powiązane z aplikacją:
- metrologia przemysłowa („tradycyjne” widzenie maszynowe, metody światła strukturalnego, interferometria, fotogrametria, mikroskopia, metody rozproszeniowe, deflektometria, tomografia),
 - metrologia medyczna i technologie biomedyczne (mikroskopia: optyczna, fazowa, konfokalna, fluorescencyjna i wykorzystująca zjawiska nieliniowe, sensory optyczne (w tym światłowodowe), obrazowanie 2D i 3D, tomografia, radiometria).

Różnorodność wielkości, które mogą być wyznaczane metodami optycznymi, dobrze ilustruje rycina 2. Zgodnie z Europejską Siecią Metrologiczną (ang. *European Metrology Network – EMN*) *EMN for Advanced Manufacturing* [4] przedstawiono na nim kluczowe sektory przemysłu (w tym również biomedycznego) wymagające narzędzi metrologicznych. We wszystkich tych obszarach metrologia optyczna zajmuje bardzo ważną pozycję.



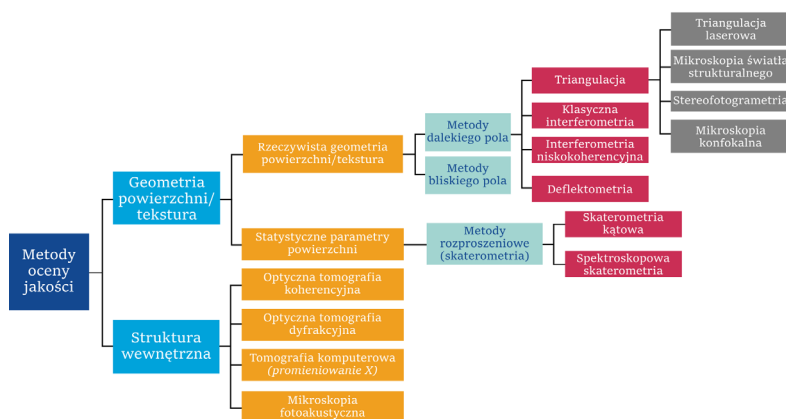
Ryc. 2. Kluczowe sektory przemysłu wymagające wsparcia metrologicznego [4]

Narzędzia metrologii optycznej stosowane w zaawansowanym wytwarzaniu mogą być podzielone na dwa podstawowe obszary: systemy do precyzyjnego pozycjonowania (ryc. 3) zazwyczaj działające jako pomiary punktowe (jedno- lub wieloosiowe) oraz systemy do oceny jakości produktu/obiektu (ryc. 4) najczęściej wykorzystujące polowe metody pomiarowe. Analiza stanu metrologii z zastosowaniem systemów pierwszej grupy tzn. do precyzyjnego pozycjonowania (pomiary długości i kąta) zawarta jest w części 7 – „Metrologia wielkości geometrycznych”, a więc tutaj ta tematyka jest pominięta. Skupiono się natomiast na metrologii optycznej, której celem jest pomiar obiektu zarówno w warunkach statycznych, jak i pod zmiennym obciążeniem (mechanicznym, termicznym, środowiskowym itp.) w całym polu widzenia układu pomiarowego (ryc. 4) lub (o ile są takie wymagania) w wielu połączonych polach pomiarowych. Metody te są obecnie często klasyfikowane jako szeroko pojęte metody widzenia maszynowego.

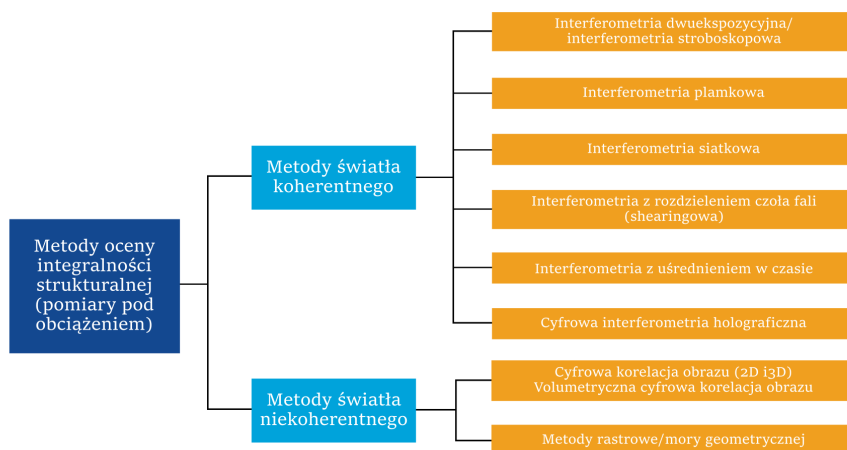


Ryc. 3. Metody optyczne służące do precyzyjnego pozycjonowania [5]

a)



b)



Ryc. 4. Metody optyczne służące do oceny jakości produktu: a) w warunkach statycznych [5], b) pod obciążeniem (w tym w warunkach dynamicznych)

W XXI w. w dziedzinie widzenia maszynowego miała miejsce prawdziwa rewolucja, radykalnie zmieniająca sposób, w jaki postępowano wcześniej i oferująca nowe, ekscytujące możliwości tym, którzy są w stanie szybko przyjąć i opanować nowe techniki [6]. Intensywny rozwój uczenia maszynowego, w dużej mierze możliwy dzięki szybszemu sprzętowi obliczeniowemu wyposażonemu w procesory graficzne, ułatwił eksplozję jego zastosowań (w tym optycznych metod

pomiarowych wykorzystujących koherentne i niekoherentne źródła promieniowania) w zadaniach przemysłowych, które dotychczas były niezwykle trudne lub w wielu przypadkach niemożliwe do zautomatyzowania. Wraz z rozwojem Internetu rzeczy (ang. *Internet of Things* – IoT) i dostępnością dużych zbiorów danych stanowią one kluczowe elementy tego, co wielu uważa za czwartą rewolucję przemysłową. Transformacja ta radykalnie poprawiła skuteczność niektórych istniejących działań związanych z widzeniem maszynowym, takich jak: produkcja (np. inspekcja kontroli i zapewnianie jakości), bezpieczeństwo (np. biometria twarzy), medycyna (np. wykrywanie nowotworów) i inżynieria lądowa (monitorowanie i zapewnienie bezpieczeństwa obiektów strategicznych), podczas gdy w innych przypadkach otworzyła zupełnie nowe obszary zastosowań, np. w rolnictwie i budownictwie, a także w istniejących dziedzinach przemysłu wytwórczego, farmaceutycznego i spożywczego. Bardzo wiele dzieje się na poziomie pomiarów mikro- i nanometrycznych (np. rozwój superrozdzielczych metod obrazowania), wspomagających z jednej strony metrologię przemysłu półprzewodnikowego (elektronika i fotonika zintegrowana, produkcja czipów elektronicznych i fotonicznych), a z drugiej strony oferują nowe narzędzia badawcze i diagnostyczne dla medycyny na poziomie komórkowym i tkankowym. Większość z tych metod stosuje zaawansowane strategie pomiarowe, w których sam pomiar dostarcza surowe dane wykorzystywane następnie do wyznaczania wielkości pomiarowych na podstawie dokładnych lub przybliżonych zależności matematycznych. W przypadku wielu metod optycznych mamy do czynienia z koniecznością rozwiązania problemu odwrotnego [7, 8]. Na podstawie danych intensywnościowych (np. prążki interferencyjne lub wzór dyfrakcyjny) rekonstruujemy wielkości geometryczne lub materiałowe charakteryzujące obiekt (jego wymiary 2D i 3D, chropowatość, deformacje, rozkład współczynnika załamania, dwójłomność itd.), bazując na znajomości modelu propagacji światła w danej konfiguracji pomiarowej (przybliżenia) oraz jego interakcji z materią. W pomiarach optycznych dużych obiektów stoimy najczęściej przed dylematem wyboru dużego pola widzenia lub wysokiej dokładności pomiaru w mniejszym polu i łączenia wyników. W obrazowaniu mikroskopowym przyjęta strategia pomiarowa może wynikać z prób ominięcia jego podstawowego ograniczenia, tj. limitu Abbego określającego maksymalną zdolność rozdzielczą $d = \lambda / (2NA)$, gdzie λ – długość fali,

a NA – apertura numeryczna obiektywu. Dodatkowo każdy pomiar realizowany przez indywidualny piksel matrycy detektora może być obciążony innym błędem systematycznym i przypadkowym, a przez to analiza dokładności połowego, optycznego systemu pomiarowego i lokalnej niepewności pomiaru są znacznie trudniejsze aniżeli w przypadku pomiaru punktowego.

Dlatego też w poniższym opracowaniu skupiono się na omówieniu stanu metrologii optycznej ograniczonej właśnie do metod realizowanych w trybie pomiarów w całym polu widzenia, co znaczy, że dane pomiarowe pozyskiwane są z wykorzystaniem detektorów matrycowych (kamer CCD/CMOS) pracujących w różnych zakresach widma optycznego. Analizę stanu tak zdefiniowanej metrologii optycznej w Polsce przeprowadzono w ramach wydzielonych obszarów aplikacyjnych:

- MO elementów i systemów optycznych (powierzchnie o chropowatości $< \lambda/100$) – powiązanie z normami: ISO 10110 – Optics and photonics – Preparation of drawings for optical elements and systems [9], ISO 14999 – Optics and photonics – Interferometric measurement of optical elements and optical systems [10], ISO/TR 16743 – Optics and photonics – Wavefront sensors for characterising optical systems and optical components [11], ISO 17411 – Optics and photonics – Optical materials and components – Test method for homogeneity of optical glasses by laser interferometry [12], ISO/TR 14997 – Optics and photonics – Test surface imperfections of optical elements [13], PN-EN ISO 14880-2:2007 – Optyka i fotonika. Matryce z mikrosoczewkami. Część 2: Metody badań aberracji czoła fali [14],
- MO obiektów o powierzchniach rozpraszająco-odbijających ($\lambda/100 < \text{chropowatość} < \lambda/2$) i rozpraszających (chropowatość $> \lambda/2$), w tym z wykorzystaniem klasycznych systemów widzenia maszynowego – powiązanie z normami: ISO 12233 – Photography – Electronic still picture imaging – Resolution and spatial frequency responses [15], ISO 17321-2 – Graphic technology and photography – Colour characterization of digital still cameras (DSCs) – Part 2: Considerations for determining scene analysis transforms [16], PN-EN ISO 10360-13 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych systemów pomiarowych (CMS) – Część 13: Optyczne CMS 3D [17], ISO/IEC 23488 – Information technology – Computer

graphics, image processing and environment data representation – Object/environmental representation for image-based rendering in virtual/mixed and augmented reality (VR/MAR) [18] oraz dokumentami podkomitetu ISO/IEC JTC 1/SC41: Internet of Things and Digital Twin [19],

- MO w mechanice eksperymentalnej i inżynierii materiałowej (obiekty poddane zmieniającym się obciążeniom) – powiązanie z normą ISO 16063-11 – Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry [20] i przewodnikami dobrych praktyk [21–23],
- MO w mikro- i nanotechnologii oraz mikroskopowych pomiarach biomedycznych – powiązanie z przykładowymi normami: ISO 10934 – Microscopes – Vocabulary for light microscopy [24], PN-EN ISO 25178-604 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: przestrzenna – Część 604: Charakterystyki nominalne przyrządów bezstykowych (interferometrów skaningowych koherentnych) [25], ISO/IEC 30141 – Internet of Things (IoT) – Reference Architecture [26], PN-EN ISO 25178-607 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: przestrzenna – Część 607: Charakterystyki nominalne przyrządów bezstykowych (mikroskopów konfokalnych) [27], PN-EN ISO 17511 – Wyroby medyczne do diagnostyki in vitro – Wymagania dotyczące ustalania spójności pomiarowej wartości wyznaczonych dla kalibratorów, materiałów do kontroli poprawności pomiaru oraz próbek pochodzących od ludzi [28] oraz przewodnikami dobrych praktyk [29, 30].

2.1. Charakterystyka ośrodków akademickich i instytutów badawczych zajmujących się metrologią optyczną

Jednostką badawczą mającą kompetencje do zapewnienia spójności pomiarowej metod interferometrycznych jest Główny Urząd Miar (GUM), który prowadzi prace i utrzymuje wzorce odniesienia m.in. w zakresie częstotliwości fali światła emitowanego przez lasery stabilizowane, długości, kąta płaskiego, parametrów geometrii powierzchni oraz współczynnika załamania światła. GUM odpowiada za zapewnienie powiązania tych wzorców z wzorcami innych państw lub wzorcami międzynarodowymi, biorąc udział w porównaniach międzylaboratoryjnych.

Jednocześnie ze względu na różnorodność wielkości wyznaczanych metodami optycznymi polowa MO jest obszarem zainteresowania, badań i aplikacji w wielu ośrodkach akademickich i instytutach badawczych w Polsce. MO uprawiana jest zarówno przez całe instytuty, jak i przez niewielkie zespoły naukowe powiązane tematycznie z większymi grupami teoretyczno-numerycznymi lub technologicznymi.

Dynamiczny rozwój MO w Polsce był związany bezpośrednio z pojawieniem się w latach 60. laserów, które ułatwiły i rozpowszechniły zastosowanie pomiarów interferometrycznych zarówno w odniesieniu do obiektów o powierzchniach optycznych, jak i rozpraszających. W Polsce pierwszy laser został uruchomiony w sierpniu 1963 r. (a więc niecałe trzy lata po powstaniu pierwszego lasera na świecie) w Wojskowej Akademii Technicznej (WAT), na Wydziale Elektrotechnicznym, w Katedrze Podstaw Radiotechniki kierowanej przez ppłk. dr. inż. Zbigniewa Puzewicza. Był to laser He-Ne generujący promieniowanie o długości fali $1,15\ \mu\text{m}$. Równolegle (kilka dni różnicy) w grupie prof. Wiesława Wolińskiego na Politechnice Warszawskiej (PW),

na Wydziale Elektroniki, w Katedrze Przyrządów Elektronowych opracowano podobny laser. Badania w zakresie techniki laserowej w pierwszym okresie skupiły się na zastosowaniach medycznych i wojskowych, a następnie na rozwoju interferometrycznych metod pomiarowych. Aparaturę interferometryczną, przede wszystkim dla potrzeb Polskich Zakładów Optycznych (PZO) w Warszawie, zaczęto konstruować w latach 70. pod kierunkiem prof. Romualda Jóźwickiego w Instytucie Konstrukcji Przyrządów Precyzyjnych i Optycznych na Wydziale Mechaniki Precyzyjnej PW oraz w Centralnym Laboratorium Optycznym kierowanym przez prof. Maksymiliana Plutę. Profesor M. Pluta, międzynarodowy ekspert w zakresie mikroskopii optycznej [31], opracował liczne innowacyjne mikroskopy optyczne, zwłaszcza wykorzystujące metody fazowo-kontrastową i interferencyjną, mikointerferometrię oraz holografię [32]. Spośród 26 patentów, ponad połowa została wdrożona do produkcji przez nieistniejące już dziś Polskie Zakłady Optyczne, produkujące i eksportujące w latach 60. i 70. mikroskopy optyczne do ponad 60 krajów świata. Pod koniec lat 80. wraz z pojawieniem się detektorów matrycowych oraz komputerów o coraz większej mocy obliczeniowej, rozpoczęto prace nad oprogramowaniem do automatycznej analizy interferogramów. Tematyka ta rozwijana była przez prof. Małgorzatę Kujawińską, która nawiązała bliskie kontakty z grupami metrologicznymi w Wielkiej Brytanii (National Physical Laboratory (NPL)), USA (Optical Science Center w Tucson) oraz Niemczech (Bremen Institute of Applied Beam Technology). Zakład Inżynierii Fotonicznej (ZIF) na Wydziale Mechatroniki (dawniej Mechaniki Precyzyjnej) PW uczestniczył z dużym powodzeniem w międzynarodowych badaniach, które doprowadziły do automatyzacji analizy wyników w różnego typu interferometrach [7] oraz niekoherentnych systemach pomiarowych wykorzystujących techniki rastrowe lub prążków mory [31]. Prace te są nadal kontynuowane i koncentrują się obecnie na rekonstrukcji fazy i amplitudy obiektów z pojedynczych interferogramów (dr hab. inż. Maciej Trusiak) oraz z hologramów cyfrowych mikroobiektów biologicznych (prof. Małgorzata Kujawińska) i technicznych (prof. Tomasz Kozacki).

Od początku lat 80. bardzo intensywnie rozwijane są optyczne systemy pomiarowe wykorzystujące metody cyfrowego przetwarzania i analizy obrazu oraz widzenia maszynowego, w tym obecnie również metody sztucznej inteligencji. Związane jest to z wprowadzaniem

automatyzacji, robotyki i cyfryzacji w wielu dziedzinach życia, a przede wszystkim w przemyśle (Przemysł 4.0), medycynie (cyfrowa i zdalna diagnostyka), rolnictwie (inteligentne rolnictwo, ang. *smart agriculture*) oraz monitorowaniu infrastruktury krytycznej i obronności. Prace związane bezpośrednio lub pośrednio z systemami widzenia maszynowego i ich aplikacjami prowadzone są właściwie na wszystkich uczelniach i we wszystkich instytutach badawczych działających w dziedzinach nauk inżynieryjno-technicznych, ścisłych, medycznych, rolniczych, a nawet w dziedzinie sztuki (np. konserwacja i archiwizacja zabytków).

2.1.1. Metrologia optyczna elementów i systemów optycznych

Metrologia elementów i systemów optycznych jest związana bezpośrednio z kontrolą jakości wytworzonych produktów optycznych, a dzięki temu procedury postępowania są opisane w szeregu norm i raportów technicznych, z których przytoczono tylko niektóre [9–14].

Aparatura pomiarowa (w tym głównie interferometry różnej klasy) jest dostępna na rynku od wielu producentów zagranicznych i obecnie nie ma w Polsce ośrodków naukowo-badawczych zajmujących się konstrukcją i budową klasycznych interferometrów dwuwiązkowych. Jednak jednostki badawcze będące w posiadaniu prototypowych warsztatów optycznych korzystają często z własnych interferometrów zbudowanych w latach 80./90. XX w. [7], np. Zakład Inżynierii Fotonicznej Politechniki Warszawskiej, Instytut Optyki Stosowanej (obecnie włączony do Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radio-techniczny (Łukasiewicz-ITR) lub wykorzystują zarówno własne, jak i handlowe systemy interferometryczne i analizatory czoła fali, np. Instytut Optoelektroniki (IO) WAT, Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki Sieci Badawczej Łukasiewicz (Łukasiewicz-IMiF – powstały w wyniku konsolidacji Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych (ITME) i Instytutu Technologii Elektronowej (ITE)). W szczególności IO WAT jest w posiadaniu systemu do wykonywania prototypowych elementów optycznych QED MRF Q22-XE z interferometrem QED SSI-A (wykorzystuje łączenie danych fazowych przy pomiarach dużych elementów optycznych). Na własne potrzeby badania jakości elementów optycznych oraz dydaktyki większość politechnicznych i uniwersyteckich grup optycznych (m.in. Politechniki: Warszawska,

Wrocławska, Śląska, Krakowska, Rzeszowska, Poznańska i Białostocka, Akademia Górniczo-Hutnicza, Uniwersytety: Warszawski, Jagielloński i Zachodniopomorski, IMiF i ITiR – Sieć Badawcza Łukasiewicz, Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk (PAN), Instytut Chemii Fizycznej PAN, IO WAT) posiada kompetencje, wykorzystywane w miarę potrzeb, do budowy systemów interferometrycznych. W większości przypadków jednak nie dysponują one certyfikowanymi elementami optycznymi mogącymi służyć za wzorce, zwłaszcza wzorce płaskości. Zapewnienie spójności pomiarowej dla materialnego wzorca płaskości stosowanego przy pomiarach interferometrem zapewnia najczęściej wzorcowanie w Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), a jedyną jednostką w Polsce oferującą wzorcowanie płaskich płytek interferencyjnych (do średnicy 150 mm, dla których odchylenie od płaskości nie przekracza $5,7\text{ }\mu\text{m}$) metodą interferencyjną jest GUM. W obecnym Laboratorium Długości GUM znajdują się również liczne interferometry i komparatory interferometryczne do wzorcowania płytek wzorcowych (o długościach od 100 mm do 1 000 mm), w tym automatyczny interferometr multispektralny do wzorcowania płytek do 1 000 mm, który powstał w wyniku współpracy naukowej pomiędzy GUM i Zakładem Inżynierii Fotonicznej PW (prof. Leszek Sałbut) oraz interferometr Linnika z automatyczną analizą interferogramów do pomiarów chropowatości (modyfikacja przez ZIF PW). Interferometryczne systemy w GUM wymagają dalszej modernizacji, co częściowo realizowane jest w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki „Polska Metrologia”.

Prace naukowo-badawcze realizowane w zakresie metrologii elementów optycznych dotyczą opracowania nowych metod i systemów umożliwiających pomiary powierzchni o dużych gradientach wysokości, w tym asferycznych, i tzw. *free form*, np. układy holografii cyfrowej (grupa prof. T. Kozackiego z PW), rozwoju interferometrii wykorzystującej optyczne nieciągłości fazowe i polaryzacyjne (grupa prof. Jana Masajady z Politechniki Wrocławskiej (PWr)), budowy interferometrów z adaptacyjnymi elementami, korygującymi błędy systematyczne lub rozszerzającymi możliwości pomiarowe (grupa dr. hab. Michała Józwika z PW) oraz badania elementów optycznych w warunkach ekstremalnych (Centrum Badań Kosmicznych PAN).

2.1.2. Metrologia optyczna obiektów o powierzchniach rozpraszająco-odbijających i rozpraszających, w tym klasyczne systemy widzenia maszynowego

Obiekty o powierzchniach rozpraszających i rozpraszająco-odbijających stanowią większość otaczającego nas świata. Ich obrazowanie, zapis cyfrowy i analiza mogą być realizowane w różnych zakresach spektralnych (UV, VIS, IR, THz), dzięki czemu dostarczają różnorodne informacje o badanym obiekcie. Najczęściej spotykane systemy wizyjne działają w zakresie promieniowania widzialnego i są związane z przetwarzaniem oraz analizą rozkładu intensywności obiektu obrazowanego przez układ optyczny na detektor 2D. Jest to realizowane metodami cyfrowego przetwarzania i rozpoznawania obrazu dwuwymiarowego (klasyczne (2D)) systemy widzenia maszynowego]. W Polsce właściwie na każdej uczelni technicznej i w każdym instytucie badawczym (z wyjątkiem typowo humanistycznych) działają grupy zajmujące się problematyką 2D widzenia maszynowego w przeróżnych zastosowaniach, zaczynając od kontroli przemysłowej poprzez systemy bezpieczeństwa i obronności, obszary zdrowia i rolnictwa, a także multimediiów czy konserwacji zabytków. Grupy te koncentrują się przede wszystkim na opracowywaniu algorytmów przetwarzania oraz analizy obrazu, biorąc często pod uwagę niepewności wyznaczania np. wielkości geometrycznych wynikające z cyfrowego charakteru obrazu (próbkiowanie i kwantyzacja) oraz procesu kalibracji kamer, usuwania szumów i niepożądanego tła. Do najbardziej rozpoznawalnych ośrodków zajmujących się tematyką widzenia maszynowego, zwłaszcza w widzialnym i podczerwonym zakresie spektralnym, należą: Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Politechnika Poznańska, Politechnika Gdańska, Politechnika Warszawska, Politechnika Wrocławska, Polsko-Japońska Akademia Technik Komputerowych, Politechnika Śląska, Politechnika Łódzka, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Wojskowa Akademia Techniczna i Instytut Techniki Budowlanej, a także jednostki zajmujące się tematyką biomedyczną, jak np. Instytut Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej PAN. W szczególności w Instytucie Optoelektroniki WAT działa jedyne w Polsce laboratorium badawcze posiadające akredytację na badanie charakterystyk kamer termowizyjnych, kamer TV, kamer LLTV (pracujących z bardzo niskimi poziomami sygnałów) oraz różnego rodzaju przyrządów noktowizyjnych, gogli, dalmierzy

itp. Obecnie istotna jest tematyka obrazowania i pomiarów w paśmie promieniowania podczerwonego (NIR, MIR, FIR) w zastosowaniach z obszarów, takich jak: wojskowość i bezpieczeństwo, medycyna i energetyka (audyty energetyczne). Jednocześnie coraz częściej scenariusze pomiarowe proponowane przez badaczy wykorzystują możliwości pomiarów multispektralnych, np. badanie obiektów dziedzictwa kulturowego w UV i IR (Akademia Sztuk Pięknych w Krakowie, Akademia Sztuk Pięknych w Warszawie, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Politechnika Warszawska) i hiperspektralnych (np. Wydział Oceanografii i Geografii Uniwersytetu Gdańskiego, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego). Kolejne ośrodki rozpoczynają również badania w zakresie obrazowania THz (IO WAT, Wydział Fizyki PW).

W wielu ośrodkach naukowo-badawczych dynamicznie rozwijają się metody wizyjne umożliwiające pomiary obiektów trójwymiarowych statycznych (3D) i w ruchu (4D). Bazują one na technikach fotogrametrycznych (w tym na technice pn. „struktura z ruchu”, ang. *structure from motion*), na metodach triangulacyjnych i światła strukturalnego, a nawet holograficznych. Najważniejsze ośrodki badawcze zajmujące się rozwojem tych metod i związanymi z nimi zagadnieniami metrologicznymi to: Politechnika Warszawska (Instytut Mikromechaniki i Fotoniki oraz Zakład Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej), Politechnika Krakowska (Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej), Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wojskowa Akademia Techniczna (Instytut Optoelektroniki), Politechnika Poznańska (Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania), Politechnika Świętokrzyska (Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn) i Instytut Maszyn Przepływowych PAN. Cała gama optycznych współrzędnościowych systemów pomiaru i obrazowania 3D oraz zagadnień związanych z tym obszarem metrologii omówiona jest w części 8 – „Metrologia współrzędnościowa”. Liczba użytkowników systemów pomiarów obiektów trójwymiarowych w różnorodnych zastosowaniach (zaczynając od projektowania odwrotnego i druku 3D poprzez monitorowanie procesów wytwórczych, multimedia, systemy bezpieczeństwa, medycynę i archiwizację obiektów dziedzictwa kulturowego) jest ogromna i systemy te (zwłaszcza systemy światła strukturalnego) można spotkać obecnie na wielu uczelniach i instytutach badawczych. Natomiast jedyne laboratoria w Polsce akredytowane do wzorcowania skanerów optycznych

zgodnie z zaleceniami niemieckiej normy VDI/VDE 2634 (część 2 i 3) zlokalizowane są na Politechnice Krakowskiej (Laboratorium Techniki Współrzędnościowej) i Uniwersytecie Bielsko-Bialskim. Dodatkowo, jak to zostało omówione przez prof. Jerzego A. Śladka w części 8, występuje jeszcze dużo otwartych problemów przy ocenie dokładności pomiarów 3D realizowanych przez optyczne systemy współrzędnościowe. Obejmują one opracowanie m.in. metody wyznaczania niepewności pomiaru znanych czynników wpływu oraz podejścia pozwalającego zidentyfikować dodatkowe składowe niepewności pomiaru. Rozwiązanie tych problemów jest niezbędne do optymalizacji wydajności, umożliwienia walidacji i zapewnienia metrologicznie wiarygodnych wyników. Wyniki te można ulepszyć za pomocą cyfrowych bliźniaków (ang. *digital twins* – DT) opartych na modelach fizycznych i/lub zastosowaniu metod sztucznej inteligencji. Jest to szczególnie ważne w analizach niepewności pomiaru dużych obiektów, gdzie pomiar dokonywany jest sekwencyjnie w czasie przez jeden skaner i ruchomy (np. obracany) obiekt lub równocześnie przez wiele skanerów, a chmury punktów z pojedynczych pomiarów łączone są ze sobą za pomocą procedur numerycznych. Temu problemowi jest m.in. poświęcony jeden z projektów realizowanych w ramach programu „Polska Metrologia”. Ciekawym kierunkiem rozwijanym przez niektóre ośrodki naukowe jest tzw. pomiar 4D, tzn. pomiary obiektów 3D w ruchu (np. Zakład Technik Rzeczywistości Wirtualnej PW, Politechnika Gdańska) dla zastosowań biomedycznych, gier komputerowych i ogólnie multimediiów.

2.1.3. Metrologia optyczna w mechanice eksperymentalnej i inżynierii materiałowej

Monitorowanie zmian w obiektach pod wpływem oddziaływań mechanicznych lub środowiskowych poprzez porównanie faz obiektu nieobciążonego i poddanego obciążeniu jest podstawą tzw. polowej ekstensometrii optycznej, która była stosowana w Polsce przez grupy mechaniczne i optyczne już w latach 80. XX w. (Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa PW – zespół prof. Jacka Stupnickiego, Wydział Mechaniki Precyzyjnej PW – prof. Krzysztof Patorski, Centralne Laboratorium Optyki – dr Romuald Pawluczyk, Politechnika Wrocławska – zespół prof. Romualda Będzińskiego, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN – grupa prof. Lecha Dietricha). W obrazie prążkowym

uzyskanym jedną z metod interferometrii optycznej [7] (interferometria plamkowa, holograficzna, siatkowa, z rozdzielaniem czoła fali, elastooptyka) lub interferometrii mechanicznej (metody rastrowe, metody mory geometrycznej) zakodowana jest informacja o rozkładzie przemieszczeń i/lub odkształceń na powierzchni obiektu poddanego obciążeniu (ryc. 4b), a więc o wielkościach podstawowych dla analizy strukturalnej i wytrzymałościowej elementu lub struktury mechanicznej. Wraz z pojawieniem się detektorów macierzowych i możliwości prostszej analizy wyników pozyskanych metodami interferencyjnymi wyraźnie wzrosło zainteresowanie metodami optycznymi zespołów naukowych związanych z mechaniką eksperymentalną, inżynierią materiałową i inżynierią lądową. Okazało się, że pomiary w całym polu widzenia umożliwiają zastąpienie setek rozetek tensometrycznych na obiekcie, a zastosowanie „wirtualnego” tensometru z kontrolowanym kierunkiem i długością bazy stwarza nowe możliwości pomiarowe. Niedogodności związane z koniecznością stabilizacji mechanicznej (eliminacją drgań) układu system pomiarowy – próbka, wynikające z wymagań pomiarów interferencyjnych, zostały po części zniwelowane przez konstrukcje handlowych układów interferometrii plamkowej lub poprzez zastosowanie układów (własnych lub handlowych) interferometrii z rozdzielaniem czoła fal (ang. *shearing interferometry*), która ze względu na konfigurację interferencji fali przedmiotowej z jej przesuniętą repliką jest nieczuła na niestabilność próbki. W latach 90. zespół prof. M. Kujawińskiej z Wydziału Mechatroniki PW rozwinął i wdrożył w wielu laboratoriach mechanicznych metody automatycznej analizy interferogramów, co przyczyniło się do zwiększenia efektywności i popularyzacji metod interferometrycznych. Szereg laboratoriów (np. Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Politechnika Warszawska, Politechnika Śląska, Politechnika Wrocławska, Instytut Odlewnictwa, Politechnika Bydgoska) dysponuje obecnie handlowymi systemami interferometrów plamkowych lub shearingowych. Są one niezwykle przydatne w badaniach materiałów kompozytowych i ceramik, elementów konstrukcyjnych wykonywanych z tych materiałów, połączeń (np. spawów laserowych), procesów pękania, a przede wszystkim pomiarów naprężeń resztkowych. To ostatnie bardzo ważne zagadnienie było rozwijane pod kątem nowych scenariuszy pomiarowych i instrumentarium w ramach wspólnych projektów Politechniki Warszawskiej (Wydział Mechatroniki) z Politechniką Krakowska

i Centralnym Instytutem Kolejnictwa (naprężenia resztkowe w szynach kolejowych) oraz Politechniki Warszawskiej (Instytut Mikromechaniki i Fotoniki) z Politechniką Bydgoską (Wydział Inżynierii Mechanicznej) i Instytutem Eksploatacji Produkcji w Radomiu (budowa zautomatyzowanego ekstensometru optycznego bazującego na interferometrii siatkowej). Metody interferometryczne pozwalają na pomiary przemieszczeń i odkształceń z bardzo dużą czułością, jednak w stosunkowo niewielkim zakresie pomiarowym, stąd równoległe wykorzystywanie metod rastrowych, które wykorzystują analogiczne metody rekonstrukcji fazy z obrazów prążkowych [33]. Szereg ośrodków (np. Wydziały Inżynierii Lądowej i Mechatroniki PW, Instytut Badawczy Dróg i Mostów) rozwijał własne układy ekstensometrów optycznych bazujących na metodzie mory geometrycznej. W układach tych czułość jest zależna od okresu rastra przedmiotowego, a więc można je stosować w badaniach dużych obiektów podlegających znacznie większym przemieszczeniom.

Na początku XXI w. pojawiła się nowa polowa metoda pomiaru przemieszczeń i odkształceń wykorzystująca światło niekoherentne i bardzo prosty układ pomiarowy (jedna kamera). Jest to metoda cyfrowej korelacji obrazu (CKO), w której powierzchnia badanego obiektu musi mieć przypadkową teksturę, a pomiar polega na rejestracji dwóch obrazów (przed i po obciążeniu obiektu) oraz korelacyjnym porównaniu zmian w ich teksturze [34]. Jeżeli zastosujemy dwie kamery w konfiguracji stereo uzyskujemy możliwość pomiaru przemieszczeń w płaszczyźnie i pozapłaszczyznowych obiektu poddanego zmianom. Metoda CKO, ze względu na prosty układ pomiarowy i możliwość dopasowania do oczekiwanej czułości i zakresu pomiarowego, zdobyła bardzo dużą popularność wśród badaczy i obecnie jest najczęściej stosowaną metodą, a układy CKO są dostępne w wielu laboratoriach mechaniki eksperymentalnej, inżynierii materiałowej i inżynierii lądowej. CKO jednak ze względu na: rozbudowane procedury numeryczne, zależność dokładności od lokalnej jakości tekstury i dowolność doboru parametrów (wymiar subsetu, krok, metoda interpolacji danych, metoda demosaikowania obrazu w przypadku zastosowania kamer barwnych i in.) niesie ze sobą dużo źródeł błędów wpływających na niepewność pomiaru.

Ogólnie problem standaryzacji pomiarów z wykorzystaniem optycznych metod pomiaru odkształceń i zachowania spójności

pomiarowej tych metod został podjęty w 2004 r. w ramach projektu EU 5FP SPOTS (Standardisation Project for Optical Techniques of Strain Measurement), w którym wzięły udział: National Physical Laboratory [Krajowa Instytucja Metrologiczna (NMI) z Wielkiej Brytanii], Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research – EMPA (Szwajcaria), EC Joint Research Centre oraz przedstawiciele przemysłu: Airbus (Wielka Brytania), Dantec Dynamics GmbH (Niemcy), Honlet Optical Systems GmbH (Niemcy), SNECMA (Francja), CRF Società Consortile per Azioni (Włochy) i dwie uczelnie: University of Sheffield (Wielka Brytania) oraz Politechnika Warszawska (zespół prof. M. Kujawińskiej). Wynikiem tego projektu było opracowanie wstępnej koncepcji normy zatwierdzonego przez VAMAS (Versailles Agreement on Materials and Standards) do dalszego procedowania przez ISO [21, 22]. Prace w tym zakresie nie zostały jeszcze zakończone. Równocześnie ze względu na ogromną popularność systemów cyfrowej korelacji obrazu International Digital Image Correlation Society opublikowało przewodnik po zbiorze dobrych praktyk w pomiarach przemieszczeń i odkształceń metodą CKO [23]. W Polsce prace badawcze z zakresu analiz niepewności pomiaru metodą CKO i rozwoju tej metody do pomiarów obiektów z naturalną teksturą powierzchni (bez konieczności pokrywania powierzchni teksturą przypadkową) prowadzi Politechnika Warszawska (Instytut Mikromechaniki i Fotoniki). W ramach programu „Polska Metrologia” jest realizowany projekt dotyczący pomiaru przemieszczeń i odkształceń dużych obiektów inżynierskich przez systemy multikamerowe z rozłożonymi w przestrzeni i czasie polami pomiarowymi systemów CKO. Równocześnie systemy CKO oraz cyfrowej interferometrii plamkowej i plamkowej z rozdzielaniem czoła fali są najczęściej wykorzystywanymi systemami w laboratoriach uczelni i instytutów badawczych (m.in. na Politechnikach: Warszawskiej, Śląskiej, Bydgoskiej, Krakowskiej, Gdańskiej, w Wojskowej Akademii Technicznej, Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN, Instytucie Metalurgii Żelaza Sieci Badawczej Łukasiewicz oraz w Instytucie Techniki Budowlanej). Jednakże w niewielu przypadkach analizowana jest niepewność wykonywanych pomiarów i brak jest laboratoriów akredytujących te systemy pomiarowe. Prace naukowo-badawcze realizowane z wykorzystaniem tych metod koncentrują się na analizie wytrzymałościowej nowych materiałów, badaniu elementów wytworzonych innowacyjnymi technologiami (np. technikami

wytwarzania przyrostowego, obróbką laserową), testowaniu wysoko odpowiedzialnych elementów konstrukcji (zwłaszcza dla przemysłu lotniczego i kosmicznego), a nawet na monitorowaniu obiektów budowlanych i obiektów dziedzictwa kulturowego (np. płótna malarskie, pergaminy poddane zmianom środowiskowym). Metody *shearingowe*, ze względu na stosunkowo niewielką czułość na drgania obiektu i czynniki środowiskowe, są szczególnie przydatne do nieniszczących badań defektów (ang. *nondestructive testing* – NDT) w ramach pomiarów dokonywanych w warunkach pozalaboratoryjnych, np. w przemyśle lotniczym i badaniu innych struktur wysoko odpowiedzialnych (np. zbiorników na gaz, wodór itd.). W obszarach badań NDT coraz częściej wykorzystywane są również metody sztucznej inteligencji do automatycznej identyfikacji defektów. Eksperymentalnie pozyskane, rzeczywiste mapy przemieszczeń i odkształceń w newralgicznych węzłach konstrukcji są niezbędnym elementem opracowywania cyfrowych bliźniaków zaawansowanych konstrukcji i produktów.

Wśród metod optycznych do badania elementów konstrukcyjnych należy jeszcze wymienić metody pomiaru drgań, w szczególności rozkładu amplitudy drgań rezonansowych, realizowane metodami interferometrycznymi stroboskopowymi i/lub z uśrednieniem w czasie (ang. *time averaged interferometry* – TAI). Zakład Inżynierii Fotonicznej PW specjalizuje się w rozwoju nowych metod analizy obrazów prążkowych rejestrowanych w TAI (tzw. prążków Bessela), w których kodowany jest rozkład amplitudy i fazy drgań. W praktyce jednak laboratoria zainteresowane pomiarami drgań, np.: Politechnika Poznańska, Politechnika Warszawska, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN i przemysł (motoryzacyjny, budowlany), najczęściej stosują wi-brometry laserowe (punktowe lub ze skanowaniem) działające na zasadzie efektu Dopplera. Jeszcze inną grupą metod badań optycznych w mechanice eksperymentalnej są aktywne metody termowizyjne (termografia impulsowa, metoda długiego impulsu, termografia lock-in i termografia wibracyjna) rozwijane przede wszystkim na Politechnice Łódzkiej, a także na Politechnikach Śląskiej, Krakowskiej i Gdańskiej (na Politechnice Gdańskiej – w badaniach biomedycznych).

Odnosząc się bezpośrednio do obszaru inżynierii materiałowej należy wspomnieć o mikroskopii (optycznej (w tym mikroskopach metalograficznych, stereoskopowych i interferencyjno-polaryzacyjnych), elektronowej (SEM, TEM), sił atomowych (AFM), konfokalnej),

dyfraktometrii, spektrometrii (fourierowskiej, ramanowskiej, rentgenowskiej, plazmowo-emisyjnej, jarzeniowej i in.) oraz optycznej tomografii koherencyjnej. Mikroskopy i inne urządzenia tego typu są na wyposażeniu (w różnym układzie rodzajowym) wszystkich wydziałów inżynierii materiałowej i instytutów badawczych zajmujących się tą dziedziną. Bardzo dobrym przykładem ośrodka specjalizującego się w pomiarach dla potrzeb inżynierii materiałowej jest Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego na Politechnice Rzeszowskiej, które w 2008 r. uzyskało certyfikaty Nadcap (zgodny z SAE Aerospace Standard AS7003) oraz PN-EN ISO/IEC 17025 – Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących umożliwiające prowadzenie badań zgodnych z wymaganiami produkcji przemysłu lotniczego.

2.1.4. Metrologia optyczna w mikro- i nanotechnologii oraz w mikroskopowych pomiarach biomedycznych

Mikro- i nanotechnologia odnoszą się do zjawisk nie występujących w makroskali, a których zrozumienie pozwala na masową produkcję nano- i mikrourządzeń o użytecznych i unikalnych właściwościach. Pomiaru na różnych etapach wytwarzania i eksploatacji tych urządzeń (od nanomateriałów poprzez elementy, aż do zintegrowanych systemów elektronicznych (ang. *integrated circuits* – IC), fotonicznych (ang. *photonics integrated circuits* – PIC), mikro-elektro-mechanicznych (MEMS) i mikro-opto-elektro-mechanicznych (MOEMS)) są niezbędne dla zapewnienia ich poprawnego projektowania, wykonania i działania. Krytyczne wymiary (KW) tych struktur ulegają ciągłemu zmniejszeniu (KW w przemyśle półprzewodnikowym osiągają obecnie wartości kilkudziesięciu nm), a stopnie integracji i funkcjonalności drastycznie wzrastają. W konsekwencji nowoczesne techniki produkcji i pomiarów/kontroli stoją przed szeregiem wyzwań. Podstawowymi barierami dla optycznego obrazowania oraz pomiarów mikro- i nanostruktur są: dyfrakcyjne ograniczenie rozdzielczości poprzecznej, ograniczona głębokość ostrości (przy wysokiej aperturze numerycznej układu odwzorowującego) oraz ograniczone pasmo przenoszenia częstości przestrzennych obiektu oferowane przez sensory optyczne (kamery). Prace naukowo-badawcze w zakresie projektowania, wytwarzania oraz charakteryzacji mikro- i nanostruktur elektronicznych, a także fotonicznych są

prowadzone w Polsce przez kilka ośrodków, z czego najaktywniejszymi są: Instytut Mikromechaniki i Fotoniki oraz Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki Politechniki Warszawskiej, Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki Sieci Badawczej Łukasiewicz, Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki oraz Wydział Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej, Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (UW) oraz Pracownia Światłowodów Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej (UMCS). PW, PWR, UMCS i UW brały udział w latach 2004–2009 w pracach Europejskiej Sieci Badawczej Mikrooptyki (ang. Network of Excellence in Micro-Optics – NEMO) [35], która nakierowana była na ustrukturyzowanie i zintegrowanie wysiłków w multidyscyplinarnej dziedzinie mikrooptyki, czyli kluczowego ogniwa pomiędzy fotoniką i nanoelektroniką. Duże znaczenie w zakresie rozwoju metrologii nano- i mikrostruktur w Polsce miał udział polskich jednostek (np. GUM, PW, PWR, ITME, UMK) w kolejnych projektach w ramach programów Unii Europejskiej (5, 6 i 7 PR, H2020) z udziałem wiodących w tej dziedzinie europejskich partnerów i europejskich NMI. Przykładowe projekty, w tym realizowane w ramach Europejskiego Programu na rzecz Innowacji i Badań w dziedzinie Metrologii (EMPIR), podano poniżej:

- OCMME: Optical characterisation methods for MEMS manufacturing, 5PR, 2001–2004, koordynator: UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ (Francja),
- OPTOLABCARD: Mass Produced Optical Diagnostic Labcards Based on Micro and Nano SU8 Layers, 6PR, 2005–2008, koordynator: IKERLAN S. COOP (Hiszpania),
- SMARTIEHS: Smart inspection system for high speed and multi-functional testing of MEMS and MOEMS, 7PR, 2008–2011, koordynator: STIFTELSEN SINTEF (Norwegia),
- MAC-TFC: MEMS atomic clocks for timing, frequency control and communications, 7PR, 2008–2012, koordynator: UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ (Francja),
- 19ENG05 NanoWires: High throughput metrology for nanowire energy harvesting devices, H2020 (EMPIR), 2020–2023, koordynator: PTB (Niemcy),
- 20IND08 MetExSPM: Traceability of localised functional properties of nanostructures with high speed scanning probe microscopy, H2020 (EMPIR), 2021–2024, koordynator: MIKES (Finlandia),

- 20IND07 TracOptic: Traceable industrial 3D roughness and dimensional measurement using optical 3D microscopy and optical distance sensors, H2020 (EMPIR), 2021–2024, koordynator: PTB (Niemcy).

Kolejnym nurtem prac badawczych w zakresie nano- i mikropomiarów są metody oraz zastosowania biomedyczne na poziomie komórkowym i tkankowym związane bezpośrednio z podstawowymi badaniami dotyczącymi pochodzenia chorób (choroby nowotworowe, neurodegeneracyjne i in.), diagnostyką medyczną (w tym histopatologią), farmakologią (nowe leki, medycyna celowana), a także z bezpieczeństwem żywności i tzw. precyzyjnym rolnictwem (ang. *precision and smart agriculture*). Tematyką tą zajmują się liczne grupy zarówno na uczelniach technicznych i uniwersytetach (Politechnika Warszawska, Politechnika Wrocławska, Politechnika Gdańska, Politechnika Śląska, Uniwersytet Warszawski, Uniwersytet Jagielloński, Wojskowa Akademia Techniczna, Politechnika Poznańska, Politechnika Białostocka, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej, uniwersytety medyczne), jak i w instytutach badawczych (m.in.: Instytut Biologii Doświadczalnej im. M. Nenckiego PAN, Instytut Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej PAN, Instytut Agrofizyki PAN, Instytut Chemii Fizycznej PAN). Prace badawcze koncentrują się na rozwoju metod umożliwiających obrazowanie oraz pomiary 2D i 3D z rozdzielczością nanometrową oraz w dużych polach widzenia. Z powodzeniem rozwijane są metody bazujące na optycznej tomografii koherencyjnej [36] (Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu – zespół dr. hab. M. Szkulmowskiego, Instytut Chemii Fizycznej PAN, ICTER – International Centre for Translational Eye Research – zespół prof. Macieja Wojtkowskiego, Politechnika Gdańska) oraz ilościowym obrazowaniu fazowym [37] (ang. *quantitative phase imaging* – QPI), a w szczególności na cyfrowej mikroskopii holograficznej i tomografii holograficznej [38], mikroskopii obliczeniowej (Politechnika Warszawska – grupy prof. M. Kujawińskiej i dr. hab. M. Trusiaka) oraz technikach mikroskopii superrozdzielczej np. opracowana na Wydziale Fizyki UW (zespół dr. Radosława Łapkiewicza) metoda SOFISM (ang. *Super-resolution optical fluctuation image scanning microscopy*). Aby umożliwić w pełni metrologiczne podejście do nowo opracowanych metod oraz urządzeń pomiarowych, z których w Polsce korzysta coraz większa liczba użytkowników, rozwijane są metodyki

walidacji tych metod i wyznaczania niepewności pomiaru. Polskie grupy (m.in. Politechnika Warszawska, Politechnika Gdańska, Politechnika Wrocławska) od kilku lat specjalizują się w rozwoju dwu- i trójwymiarowych fantomów (materiałów referencyjnych) naśladujących swoją strukturą i własnościami mikrostruktury biologiczne (komórki, tkanki) [39, 40]. Tematyka ta jest aktualnie w centrum zainteresowania wielu międzynarodowych grup zajmujących się pomiarami biomedycznymi na poziomie komórkowym i tkankowym (projekty European Association of National Metrology Institutes (EURAMET), European Metrology Network for Laboratory Medicine).

Podsumowując, prace badawcze w zakresie metrologii w nano- i mikrotechnologii oraz mikropomiarów są prowadzone w Polsce obecnie w dwóch podstawowych kierunkach:

- rozwoju ścieżki pomiarowej i metod (oraz urządzeń) kontroli jakości na kolejnych etapach wytwarzania (również badań materiałowych) sensorów (w tym światłowodowych) i urządzeń optoelektronicznych (mikrolasery, detektory, modulatory, MEMS/MOEMS, PICs),
- opracowywania metod i budowy urządzeń do optycznych pomiarów biomedycznych na poziomie komórkowym i tkankowym (w tym metod fazowych i superrozdzielczych) wraz z pełną ścieżką przetwarzania danych (również z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji) oraz zapewnieniem w pełni ilościowego charakteru wyników (ang. *true quantitative*).

Nowym kierunkiem prac badawczych jest metrologia związana z rozwojem technologii kwantowych [41] obejmujących obszary, takie jak: komputery kwantowe, sensory, kryptografia czy komunikacja kwantowa, które są postrzegane na świecie jako technologie krytyczne. Wiele działań jest realizowanych w centrach doskonałości naukowej powstałych w ramach programu „Międzynarodowe Agendy Badawcze” (MAB) Fundacji na rzecz Nauki Polskiej (dwa programy MAB – w Warszawie i Gdańsku). W ramach działań strategicznych w tym obszarze w 2018 r. podpisano umowę na realizację projektu „Narodowe Laboratorium Fotoniki i Technologii Kwantowych” (NLPQT). Jego głównym celem jest rozwój nowoczesnej infrastruktury badawczej w dziedzinie ogólnie pojętej fotoniki technologii kwantowych ze szczególnym uwzględnieniem potrzeb przemysłu. W skład konsorcjum realizującego ten projekt wchodzi: Uniwersytet Warszawski (Wydział Fizyki),

Instytut Chemii Fizycznej PAN, Politechnika Śląska, Politechnika Wrocławska, Instytut Chemii Bioorganicznej PAN, Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej i Uniwersytet Mikołaja Kopernika. Powstałe stanowiska umożliwią prowadzenie badań naukowych na najwyższym, światowym poziomie z zakresu m.in. rozpowszechniania standardowej częstotliwości optycznej, obsługi systemów dystrybucji klucza kwantowego czy optycznych pomiarów materiałów biologicznych.

2.2. Charakterystyka wyposażenia w optyczne systemy pomiarowe przemysłowych laboratoriów metrologicznych, przemysłu i innych użytkowników

Wstępną ocenę wykorzystania sprzętu pomiarowego z obszaru metrologii optycznej przeprowadzono, opierając się na wynikach ankiety przeprowadzonej przez dr inż. M. Zawadę-Michałowską (Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska). Ankieta objęła ok. 1 800 podmiotów przemysłowych, naukowych i administracji państwowej prowadzących działania w zakresie metrologii. Uzyskano 198 odpowiedzi, w których 124 respondentów zadeklarowało wykorzystanie optycznych systemów pomiarowych. Wśród respondentów było 52 przedstawicieli małych, średnich (MŚP) i dużych przedsiębiorstw, 73 jednostki naukowe i 112 akredytowanych laboratoriów badawczych i naukowych, a więc można przyjąć, że informacje pochodzące z przemysłu są niedoszacowane. Respondenci zadeklarowali wykorzystywanie następującego pomiarowego sprzętu optycznego: mikroskopy (69), spektrometry (72), systemy interferometryczne (18), systemy światła strukturalnego (15), systemy widzenia maszynowego (10), laser trackery (5), ekstensometry optyczne (6) i inne (14, w tym m.in. refraktometry, tachimetry, dalmierze, urządzenia geodezyjne, kamery termowizyjne). 83 % respondentów zadeklarowało ponoszenie kosztów związanych ze sprawdzaniem lub wzorcowaniem przyrządów i systemów pomiarowych, wskazując jednocześnie na korzystanie przede wszystkim z usług: Głównego Urzędu Miar (97), Okręgowych Urzędów Miar (97), polskich akredytowanych laboratoriów wzorcujących (132) oraz zagranicznych akredytowanych laboratoriów wzorcujących (55). Jednak w ramach listy wzorców będących w posiadaniu respondentów

rzadko pojawiają się wzorce optyczne, certyfikowane wzorce kształtu, tablice kalibracyjne do wyznaczania parametrów kamer lub testy zdolności rozdzielczej czy funkcji przenoszenia kontrastu.

2.2.1. Optyczne systemy pomiarowe elementów i systemów optycznych

Najważniejsze firmy produkujące elementy i układy optyczne w Polsce to: Przemysłowe Centrum Optyki S.A. (PCO) (elementy optyczne / układy do sprzętu wojskowego), Solaris Optics S.A. (elementy optyczne), TeleSystem-Mesko Sp. z o.o. (elementy optyczne / układy do sprzętu wojskowego), B&M Optik Sp. z o.o. (elementy optyczne) oraz Essilor Optical Laboratory Polska (szkła okularowe).

Firmy te są dobrze wyposażone w odpowiedni sprzęt metrologiczny pozwalający na kontrolę jakości wykonywanych elementów optycznych (wraz z cienkimi warstwami). Do najczęściej wykorzystywanych instrumentów w przemysłowych laboratoriach należą: interferometry Fizeau, Mach-Zehndera, Twymana-Greena (np. firm Zygo, Apre, Schneider GmbH, Optotech GmbH) wraz z automatyczną analizą interferogramów, spektrofotometry do pomiaru w transmisji i odbiciu (np. Optotech GmbH, Trioptics), autokolimatory, goniometry, maszyny 3D CMM wykorzystywane np. do pomiaru promienia i centralności elementów, dioptrymery, interferometry do pomiaru chropowatości oraz mikroskopy optyczne. Ze względu na bardzo wysokie wymagania stawiane elementom optycznym, sprzęt metrologiczny w większości przypadków ma świadectwa wydane przez GUM lub inne NMI (najczęściej PTB, NPL). Firmy sygnalizują potrzeby pomiarowe w zakresie metrologii elementów asferycznych i *free form* oraz pomiarów elementów o dużych średnicach.

2.2.2. Optyczne systemy pomiarowe obiektów o powierzchniach rozpraszająco-odbijających i rozpraszających

Systemy widzenia maszynowego 2D i 3D są coraz bardziej rozpowszechnione we wszystkich branżach przemysłu, począwszy od przemysłu obronnego, maszynowego, lotniczego, samochodowego poprzez przemysł farmaceutyczny, spożywczy, drzewny, rolnictwo, rynek produkcji gier komputerowych i reklamę. Obrazowanie i pomiary 2D

w zależności od zadania pomiarowego wykorzystują całą gamę dostępnych kamer o ogromnej rozpiętości parametrów samych detektorów, jak i jakości optyki obrazującej. Zazwyczaj wzorcowanie kamery wizyjnej jest realizowane przez producenta lub indywidualnie przez użytkownika na podstawie instrukcji, oprogramowania i wzorców kalibracyjnych dostarczanych przez producenta. Kamery pracujące w innych zakresach spektralnych niż promieniowanie widzialne wymagają specjalnego sprzętu do testowania. Jak już wspomniano w rozdziale 2.1.2 w Instytucie Optoelektroniki WAT działa jedyne w Polsce laboratorium badawcze posiadające akredytację na badanie charakterystyk kamer termowizyjnych, kamer TV oraz kamer LLTV, natomiast sprzęt do testowania elektrooptycznych systemów obrazowania dostarcza polska firma Inframet. Wykonuje ona również usługi (głównie dla potrzeb obronności) w zakresie pomiarów kamer termowizyjnych, noktowizorów, kamer VIS-NIR, kamer SWIR, dalmierzy / wskaźników laserowych, wielosensorowych systemów obserwacyjnych, wzmacniaczy obrazu i optycznych celowników. Należy jeszcze dodać, że Przemysłowe Centrum Optyki S.A. jest uznanym producentem systemów wizyjnych pracujących głównie w zakresie podczerwieni, takich jak: gogle noktowizyjne i monokulary, gogle lotnicze, a także celowników dziennie-nocnych, kolimatorowych, termowizyjnych oraz noktowizyjnych. Produkcja tych systemów (zwłaszcza dla zastosowań wojskowych i bezpieczeństwa) wymaga spełnienia rygorystycznych warunków jakości obrazowania potwierdzonych przez odpowiednią kontrolę jakości produktów zapewnioną przez PCO.

Systemy widzenia maszynowego operujące w różnych zakresach spektralnych są coraz szerzej wykorzystywane do monitorowania infrastruktury krytycznej w gospodarce, zwłaszcza z wykorzystaniem dronów. Urzędy Dozoru Technicznego na różnych szczeblach, oprócz stacjonarnych systemów, stosują systemy wizyjne montowane stacjonarnie lub na dronach w celu inspekcji urządzeń ciśnieniowych, ścieków, rurociągów, urządzeń transportu bliskiego (żurawie wieżowe i suwnice), zbiorników czy łopat turbin wiatrowych.

W zakresie pomiarów współrzędnościowych skanery światła strukturalnego są na szeroką skalę stosowane w dużych zakładach przemysłowych, obok stykowych maszyn współrzędnościowych (przemysł lotniczy, motoryzacyjny, w tym filie firm zagranicznych), do kontroli procesu produkcji na różnych jego etapach. Wykorzystywane są tam

z reguły skanery produkcji Zeiss z niemieckimi świadectwami wzorcowania (PTB). Małe i średnie firmy (zwłaszcza działające w obszarach przemysłu tworzyw sztucznych, meblarskiego i odzieżowego) korzystają z szerokiej rynkowej oferty skanerów, z których niestety wiele nie spełnia podstawowych wymagań metrologicznych. Polskie skanery produkowane przez firmę Smarttech Sp. z o.o. są certyfikowane (zgodnie z VDI/VDE 2634) w jednym z dwóch akredytowanych laboratoriów (Politechniki Krakowskiej lub Uniwersytetu Bielsko-Bialskiego).

Analizując tematykę projektów finansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju i obserwując rynek, można stwierdzić, że firmy polskie, a zwłaszcza MŚP reprezentujące przemysł farmaceutyczny, drzewny, meblarski, tworzyw sztucznych, a także gier komputerowych i filmowy, dopiero od kilku lat zaczęły w większym stopniu wykorzystywać metody widzenia maszynowego, w szczególności do pomiarów 3D. Obecnie poziom sprzętu pomiarowego w polskim przemyśle pozostawia jeszcze wiele do życzenia, chociaż niektóre z firm (w tym filie korporacji zagranicznych) reprezentują bardzo wysoki poziom technologiczny, a ich laboratoria kontroli jakości produktów dysponują najnowszymi urządzeniami.

2.2.3. Optyczne systemy pomiarowe w mechanice eksperymentalnej i inżynierii materiałowej

Tradycyjnie laboratoria wytrzymałościowe, w przemyśle maszynowym, motoryzacyjnym, lotniczym/kosmicznym, tworzyw sztucznych, materiałów budowlanych i in., korzystają przy badaniach statycznych, dynamicznych i wyznaczaniu własności materiałowych próbek z różnej klasy maszyn wytrzymałościowych i standardowych ekstensometrów. Jednak współcześnie maszyny wytrzymałościowe coraz częściej są wyposażane w ekstensometry bezdotykowe: wideoekstensometry, ekstensometry laserowe i optyczne lub firmy doposażają się dodatkowo w te urządzenia czy też w bardziej zaawansowane komercyjnie systemy cyfrowej interferometrii plamkowej, układy *shearingowe* lub cyfrowej korelacji obrazu. Połowa metrologia optyczna (a zwłaszcza metoda CKO) powoli wkracza do przemysłu, przy czym na razie jako narzędzie wspomagające, gdyż większość norm, których spełnienie jest wymagane przy badaniach wytrzymałościowych bazuje na pomiarach tradycyjnymi ekstensometrami lub ich odpowiednikami optycznymi

bazującymi na wyznaczaniu przemieszczenia pomiędzy dwoma znacznikami. Ekstensometry polowe są wykorzystywane znacznie częściej na etapie prototypowania i modernizacji produktu (np. zmiana materiału), przy wprowadzaniu nowych technologii (np. spawania laserowego) lub przy badaniach eksploatacyjnych oraz do monitorowania strukturalnego stanu konstrukcji (ang. *monitoring of structural health*).

Jeśli chodzi o podstawowe, mikroskopowe badania materiałowe, to przemysł jest dobrze wyposażony w urządzenia pomiarowe, lecz często zleca badania specjalistyczne do akredytowanych laboratoriów działających w ramach uczelni. Przykładami takich laboratoriów są: wspomniane już Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego na Politechnice Rzeszowskiej obsługujące Stowarzyszenie Grupy Przedsiębiorców Przemysłu Lotniczego „Dolina Lotnicza”, Akredytowany Zespół Laboratoriów Badawczych (AZLB) na Uniwersytecie Śląskim w Katowicach, który wykonuje badania korozyjne, metodami znormalizowanymi, oraz badania struktury przy wykorzystaniu transmisyjnej mikroskopii elektronowej i rentgenowskiej analizy strukturalnej, metodami nieznormalizowanymi opracowanymi przez pracowników Laboratorium. Skorzystać można również z szeregu branżowych laboratoriów akredytowanych, np.: Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji w Instytucie Kolejnictwa, Akredytowany Zespół Laboratoriów Badawczych Instytutu Technik Budowlanych (badania materiałów i wyrobów budowlanych), Dział Laboratoriów Badawczych Sieci Badawczej Łukasiewicz – Krakowski Instytut Badawczy (badania metali i ich stopów, kompozytów, ceramiki) i wiele innych. Laboratoria te wyposażone są w stosunkowo dobry sprzęt, jednak jego modernizacja niekiedy nie jest wystarczająca, aby sprostać wymaganiom związanym z nowymi materiałami i wyrobami.

2.2.4. Wyposażenie w optyczne systemy pomiarowe dla mikro- i nanotechnologii

Od początku lat 60. XX w. w Polsce z powodzeniem rozwijał się przemysł teletechniczny i elektroniczny. Na koniec 1985 r. Zrzeszenie Przedsiębiorstw Przemysłu Elektronicznego UNITRA zrzeszało 28 zakładów przemysłowych (m.in.: CEMI – Naukowo-Produkcyjne Centrum Półprzewodników, Polkolor, Radwar, WZT, Diora, Elpod, Unitech), w których funkcjonowały wyspecjalizowane działy zapewniające odpowiednią

jakość produkcji, również z wykorzystaniem wielu metod i instrumentów optycznych. W wyniku przekształceń ustrojowych w 1989 r. wszystkie zjednoczenia i zrzeszenia uległy likwidacji. Poszczególne przedsiębiorstwa Zrzeszenia UNITRA uzyskały samodzielność i z różnym stopniem powodzenia kontynuowały lub kontynuują działalność, jednak wiele upadło (np. CEMI zlikwidowano w 1994 r.). Mikrotechnologie przez kolejne lata po upadku przemysłu elektronicznego w Polsce były w regresie, a firmy zajmujące się elektroniką wymagały narzędzi metrologicznych o rozdzielczościach na poziomie mikrometrów. Nanotechnologie właściwie nie były obecne – z wyłączeniem firm optoelektronicznych, takich jak Vigo Systems (założona w 1987 r. i przekształcona w spółkę akcyjną Vigo Systems S.A., a od 2022 r. funkcjonująca pod nazwą Vigo Photonics S.A.) oraz firm z Polskiej Grupy Zbrojeniowej (PGZ, np.: PCO S.A., MESKO S.A., PIT-RADWAR S.A.). Obecnie na mapie przemysłowej Polski pojawia się coraz więcej zakładów, w których mikro- i nanotechnologie są kluczowymi elementami. Dotyczy to, oprócz jednostek PGZ, firm zajmujących się technologiami satelitarnymi i kosmicznymi (Crotech Instruments, Astronika, Thorium Space Technology, Astri Polska) oraz technologiami kwantowymi (np. Creotech Instruments, Nanoxo, QNA Technology). Powoli rozwijają się w Polsce firmy sensoryczne, optoelektroniczne/laserowe i światłowodowe (np.: Fluence, Lasertex, Fibrain, Semicon, Top-Gan, Sygnis). Firmy te dysponują zaawansowaną aparaturą pomiarową, chociaż przy rozwoju asortymentu oraz innowacyjności produktów wymagane jest ciągłe inwestowanie w najnowsze systemy pomiarowe (mikroskopy, spektrometry, dyfraktometry, elipsometry, skaterometry, interferometry światła białego i optyczne tomografy koherencyjne (OCT), profilometry optyczne) oraz zapewnienie przez GUM wspomaganie w zakresie spójności pomiarowej oraz materiałów referencyjnych w obszarze mikro- i nanotechnologii.

W czerwcu 2023 r. Komisja Europejska zatwierdziła nowy projekt wspierający nowoczesne technologie i potencjał produkcyjny w sektorze elektroniki (cel: uniezależnienie łańcucha dostaw od producentów pozaeuropejskich, Europejski Akt w sprawie czipów). Do tej pory spośród firm polskich jedynie Vigo Photonics S.A. uzyskała finansowanie z tego programu.

Jeśli chodzi o przemysł (głównie farmaceutyczny) i medyczne ośrodki diagnostyczne wykorzystujące pomiary na poziomie

komórkowym i tkankowym, to klasyczne wyposażenie pomiarowe, bazujące przede wszystkim na mikroskopii optycznej (w tym również na skanerach do próbek histopatologicznych) i spektroskopii, jest relatywnie nowoczesne i nadąża za szybko postępującą cyfryzacją. Większość instrumentarium bazuje jednak na tradycyjnych metodach obrazowania. Bardzo rzadko wykorzystywane są systemy ilościowego obrazowania fazowego, mikroskopii superrozdzielczej lub multimodalnych pomiarów optycznych. Wydaje się jednak, że trendy, takie jak: spersonalizowana medycyna, rosnące zapotrzebowanie na usługi diagnostyczne (wzrost kosztów) oraz coraz częściej stosowana zdalna diagnostyka wykorzystująca algorytmy sztucznej inteligencji, będą wymagały zweryfikowania przez te jednostki zarówno scenariuszy pomiarowych i analizy danych, jak i stosowanych metod obrazowania.

2.2.5. Ogólnopolskie i międzynarodowe inicjatywy aparaturowe i organizacyjne z zakresu metrologii optycznej

Metrologia optyczna, jako bardzo ważna technologia wspomagająca (ang. *enabling technology*), wpisuje się w zakres działań wielu krajowych i międzynarodowych inicjatyw. Wśród najważniejszych krajowych inicjatyw aparaturowych należy wymienić:

1. Świętokrzyski Kampus Laboratoryjny GUM (realizowany w konsorcjum z Politechniką Świętokrzyską), w ramach którego obecnie są realizowane zakupy tak ważnych dla metrologii optycznej stanowisk, jak:
 - stanowisko pomiarowo-badawcze budowy i rozwoju pierwotnych i optycznych wzorców częstotliwości,
 - stanowisko do pomiarów kąta płaskiego, umożliwiające badania przyrządów pomiarowych o wysokich rozdzielczościach,
 - stanowisko do pomiarów dużych obiektów 3D, zapewniające rozwój możliwości pomiarowych w zakresie pomiarów dużych odległości oraz obiektów o dużych gabarytach,
 - stanowisko pomiarowe nanometrologii wymiarowej, zapewniające rozwój możliwości pomiarowych w dziedzinie nanometrologii, które w istotny sposób wpłynie na jakość pomiarów i analiz nanostruktur powierzchni (kształtu, chropowatości) w diagnostyce medycznej oraz elektronice,

2. Narodową Sieć Metrologii Współrzędnościowej (NSMET), która ma na celu stworzenie dogodnych warunków do badania istniejących rozwiązań z zakresu pomiarów i obrazowania w skalach od nano do makro i w obszarze metrologii optycznej oferuje:
 - system tomografu holograficznego do 3D ilościowego obrazowania i pomiarów rozkładu współczynnika załamania w mikrostrukturach biologicznych i technicznych,
 - optyczny tomograf koherencyjny (OCT), umożliwiający pomiar geometrii trójwymiarowych struktur fazowych (statycznych i dynamicznych) bazujący na detekcji promieniowania w rozproszeniu wstecznym,
 - stanowisko do budowy i badań tomografu terahercowego (aktywnego), umożliwiającego wolumetryczne pomiary obiektów ekranowanych przez materiały, takie jak: plastiki, żywice, papier,
 - stanowisko do multiskalowego systemu pomiaru i digitalizacji obiektów w skali makro, mezo i mikro,
 - unowocześnienie systemu interferometru laserowego Zeiss ZLM 500 poprzez zakup interferometru wieloosiowego oraz 2 laserów stabilizowanych,
3. Narodowe Laboratorium Fotoniki i Technologii Kwantowych (NL-PQT), w którym aparatura zakupiona w ramach projektu stworzy nowoczesną infrastrukturę badawczą działającą w ramach:
 - systemu dystrybucji wzorcowych sygnałów częstotliwości opartego na optycznym zegarze atomowym oraz sieci światłowodowej PIONIER,
 - sieci laboratoriów naukowych specjalizujących się w fotonice,
 - sieci laboratoriów naukowych prowadzących badania w dziedzinie technologii kwantowych.

Należy zaznaczyć, że ta infrastruktura zostanie udostępniona jednostkom naukowym i przedsiębiorcom w formie specjalistycznych usług dla przemysłu kwantowego i fotonicznego.

Ważnym elementem jest również możliwość korzystania przez polskich badaczy i przedsiębiorców z licznych inicjatyw europejskich, umożliwiających stosowanie infrastruktury zagranicznej w zakresie optyki i fotoniki (w tym metrologii optycznej). Do inicjatyw takich można zaliczyć:

1. europejskie linie pilotażowe (ang. *pilot lines*) programu H2020:
 - Pix4Life: PICs for health & food on SiN platform,

- MirPhab: Analytical MIR sensing, SiP platform,
 - PiScale: OLEDs on flexible substrates,
 - PixAPP: *PICs assembly and packaging*,
 - MedPhab: MedPhab,
 - InPulse: *Indium phosphide PICs*,
2. projekty: ACTPHAST (programy: PR7 i H2020) i PhotonHub Europe (H2020), w ramach których konsorcjum złożone z najlepszych ośrodków technologii fotonicznych w Europie (w tym 3 z Polski: PW, ówczesne ITME i UMCS) oferowało usługi naukowe dla naukowców i firm mających na celu przyspieszenie rozwoju produktów przez wprowadzanie technologii fotonicznych. Profesor M. Kujawińska była i jest (w PhotonHub Europe) odpowiedzialna za obszar usług w zakresie metrologii optycznej i fotonicznych systemów pomiarowych.

W ramach inicjatyw organizacyjnych kluczowe są:

- nadanie Głównemu Urzędowi Miar statusu jednostki prowadzącej działalność naukowo-badawczą (ustawa z dnia 11 maja 2001 r. – Prawo o miarach (Dz. U. z 2022 r. poz. 2063)),
- budowa Świętokrzyskiego Kampusu Laboratoryjnego GUM w Kielcach.

Ważnymi przedsięwzięciami są również:

1. uruchomienie w 2021 r. przez Ministerstwo Edukacji i Nauki pierwszego celowego programu finansującego prace naukowo-badawcze z obszaru metrologii – „Polska Metrologia”,
2. powołanie w 2021 r. Polskiej Unii Metrologicznej, do której przystąpiły m.in. Politechniki: Krakowska, Lubelska, Łódzka, Opolska, Poznańska, Śląska, Świętokrzyska i Warszawska, Instytut Metalurgii Żelaza – Sieć Badawcza Łukasiewicz oraz inne uczelnie i instytucje,
3. utworzenie w 2022 r. Klastra Q – Klaster Technologii Kwantowych, którego członkami założycielami są Uniwersytety: Warszawski, Jagielloński, Gdański, im. Adama Mickiewicza, Mikołaja Kopernika, Politechnika Wrocławska, Centrum Fizyki Teoretycznej oraz Instytut Fizyki PAN i 11 przedstawicieli firm,
4. utworzenie w 2023 r. Klastra Mikroelektroniki, Elektroniki i Fotoniki, którego założyciele to 51 firm, uczelni i instytutów badawczych,

5. utworzenie w 2018 r. Polskiej Platformy Technologicznej Fotoniki, zrzeszającej obecnie 45 firm, uczelni i instytutów badawczych z branży fotoniki
6. utworzenie w 2022 r., z inicjatywy GUM, Targów Kielce S.A. oraz Politechniki Świętokrzyskiej, Klastra Metrologicznego, w którym deklarację o współpracy w celu jego utworzenia podpisali przedstawiciele 32 polskich przedsiębiorstw oraz organizacji i instytucji naukowo-badawczych.

2.3. Podsumowanie diagnozy stanu metrologii optycznej

Metrologia optyczna ze względu na swoją bezinwazyjność, bezkontaktość i różnorodność mierzonych wielkości jest obecna właściwie we wszystkich obszarach badań i sektorach przemysłu. Jednak rozwija się ona aktualnie z różną intensywnością i, mimo postępu technologicznego, nie wszędzie w przemyśle zajęła należne jej miejsce, a sprzęt wizyjny często stosowany jest tylko do jakościowego obrazowania bez odpowiednich procedur pomiarowych. Jeśli chodzi o instytucje naukowo-badawcze to z jednej strony są w Polsce ośrodki na światowym poziomie, wręcz wytyczające nowe trendy w aparaturze i metodach, zwłaszcza dotyczących najbardziej wymagających zagadnień pomiarowych. Z drugiej strony są grupy skupiające się na zagadnieniach nieaktualnych, a wiele zespołów odchodzi (często ze względu na brak nowoczesnego sprzętu) od metrologii praktycznej, koncentrując się tylko na symulacjach i analizach numerycznych.

W przemyśle również poziom sprzętowy jest bardzo zróżnicowany. Przemysł 4.0 i wynikająca z jego założeń strategia Metrologia 4.0 wymagają współistnienia wytwarzania i pomiarów, a co za tym idzie rozbudowanej sensoryki (w tym systemów widzenia maszynowego) oraz przetwarzania/weryfikacji często ogromniej ilości danych. Na takie rozwiązania mogą sobie pozwolić (i najczęściej to realizują, ale na różnych poziomach zaawansowania) duże zakłady przemysłowe, natomiast strategia kontroli jakości produktu w małych firmach często nie uwzględnia wykorzystania zaawansowanych technik pomiarowych. Najnowocześniejszy optyczny sprzęt pomiarowy jest dostępny zarówno w firmach zaawansowanych technologii (tj.: optoelektroniki, sensoryki, technik światłowodowych,

kosmicznych, technologii kwantowych, mechatroniki), jak i w firmach biomedycznych (w tym farmaceutycznych). Firmy te wykorzystują również (na razie w niewielkim zakresie) krajowe i międzynarodowe infrastruktury technologiczne (w tym pomiarowe). Należy jednak wspomnieć, że w przypadku innowacyjnych produktów (np. w technologiach mikro i nano) firmy najczęściej nie mają wspomaganie metrologicznego ze strony GUM, akredytowanych laboratoriów badawczych lub wzorcujących ze względu na brak zaplecza w tym zakresie. Podobnie wygląda sytuacja w przypadku wprowadzania do diagnostyki medycznej nowych narzędzi, a do przemysłu nowych technologii (np. druku 3D, obróbki laserowej, produkcji na giętkich materiałach, elementów *free form*) materiałów (ceramiki, materiałów kompozytowych, nanomateriałów) i ich funkcjonalności, które wymagają opracowania lub implementacji nowych narzędzi, metod lub procedur pomiarowych. Jest to niezbędne dla zapewnienia harmonijnego rozwoju i funkcjonowania przemysłu i innych strategicznych zadań kontrolno-pomiarowych w kraju.

Wdrożenie nowych zadań GUM jako jednostki naukowo-badawczej oraz powstanie jego nowej infrastruktury (KAMPUS GUM) powinno mieć na celu wykorzystanie potencjału naukowego w obszarze wiedzy i doświadczenia do definiowania zagadnień z zakresu metrologii, ich rozwiązywania oraz określania niezbędnych badań. Będzie to możliwe przy pełnym zaangażowaniu i wykorzystaniu doświadczenia poszczególnych ośrodków naukowych w kraju (m.in. poprzez realizację projektów uruchomionych w ramach programu „Polska Metrologia” i kontynuację tego programu) oraz przy współpracy z renomowanymi ośrodkami zagranicznymi (udziału GUM oraz krajowych jednostek naukowo-badawczych w metrologicznych projektach europejskich i międzynarodowych).

3.1. Wprowadzenie

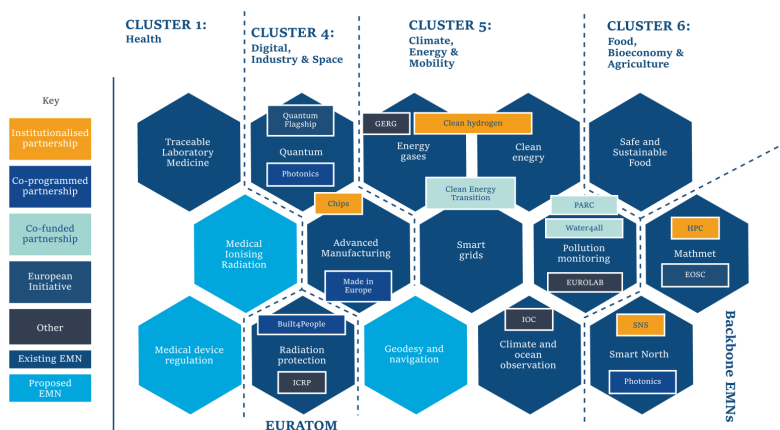
W pracy skoncentrowano się przede wszystkim na omówieniu perspektyw rozwoju MO ograniczonej do metod realizowanych w trybie pomiarów w całym polu widzenia z wykorzystaniem promieniowania koherentnego, częściowo koherentnego i niekoherentnego (metody widzenia maszynowego) oraz sensorów optycznych wykorzystywanych w Internecie rzeczy (IoF).

Metrologia optyczna ma swoje znaczące miejsce w rozwoju metrologii światowej i zaspakajaniu przez nią potrzeb różnorodnego grona interesariuszy. Dlatego też pierwsza część tego opracowania jest poświęcona prezentacji strategii rozwoju w obszarze MO reprezentowanej przez EURAMET (Europejskie Stowarzyszenie Krajowych Instytutów Metrologicznych, NMI), którą przedstawiono w dwóch dokumentach: *EURAMET 2030 Strategy* [42] oraz *Metrology for stronger Europe* [43]. Należy podkreślić, że EURAMET, zrzeszające 120 NMI i desygnowanych instytutów (ang. *Designated Institutes* – DI) z 39 krajów, jest kluczową organizacją dla współpracy międzynarodowej w ramach Konwencji Metrycznej i Europejskiej Infrastruktury Jakości. W obu wyżej wymienionych opracowaniach przedstawiono wizję EURAMET-u dotyczącą europejskiego programu metrologicznego na okresy odpowiednio 2022–2030 oraz 2030–2040. Wskazują one na konieczność podjęcia skoordynowanych działań metrologicznych w reakcji na potrzeby wynikające z: transformacji dostaw energii, ochrony środowiska, rozwoju silnego, odpornego i konkurencyjnego przemysłu europejskiego, globalnej transformacji cyfrowej, rozwoju gospodarki o obiegu zamkniętym, rozwoju systemu opieki zdrowotnej oraz zapewnienia odporności i bezpieczeństwa europejskiej infrastruktury.

W aspekcie intensywnie zmieniającego się świata, Europa stoi przed wyzwaniami, które stworzą, w następnych dekadach, zwiększone zapotrzebowanie na metrologię i jej zakresy działań. Należy wspomnieć o zmianie klimatu wymagającej przejścia na neutralność pod względem emisji dwutlenku węgla, podczas, gdy wojna na Ukrainie nadwyręża europejskie zasoby energii, co ma długoterminowe skutki. Europa potrzebuje zielonej i cyfrowej transformacji przemysłowej, odpornego i suwerennego przemysłu, konkurencyjnych innowacji przemysłowych, solidnych łańcuchów dostaw, globalności współpracy i otwartego handlu z jednej strony, a zapewnienia bezpieczeństwa swoich obywateli z drugiej. Obszar zdrowia stoi przed wyzwaniami wynikającymi ze starzenia się społeczeństwa oraz szybkiego (cyfrowego) rozwoju technologicznego. W odpowiedzi na nowe wyzwania technologiczne i równoległe z nimi następujący gwałtowny rozwój nauki oraz postęp w metodach wytwarzania i pozyskiwania danych obserwuje się ogromne zapotrzebowanie na rozwój nowych narzędzi metrologicznych zarówno w obszarze przyrządowym, jak i analizy danych (np. cyfryzacja, udział metod sztucznej inteligencji). Wszystkie powyższe elementy są uwzględnione, jak już wspomniano, w dwóch strategicznych dokumentach EURAMET-u, w których zidentyfikowano cztery kluczowe obszary generujące potrzeby w zakresie kompleksowej, strategicznej i skoordynowanej agendy metrologicznej dla Europy:

- Zielony Ład,
- konkurencyjny i odporny przemysł,
- zdrowie,
- spójność i infrastruktura.

W realizacji agendy metrologicznej ważny element stanowią Europejskie Sieci Metrologiczne (ang. *European Metrology Networks* – EMN), ustanowione jako stałe podmioty w ramach EURAMET-u i wspierane przez Programy Metrologiczne. Na rycinie 5 przedstawiono schematycznie działające już (12) i planowane do uruchomienia (3) EMN oraz nawiązane kontakty z innymi europejskimi partnerstwami, inicjatywami oraz programami. W obszarze metrologii optycznej największa aktywność reprezentowana jest w sieciach: Advanced Manufacturing, Traceable Laboratory Medicine, Quantum, Safe and Sustainable Food. We wszystkich powyżej wymienionych sieciach GUM jest jednym z członków w grupie NMI, a Politechniki Warszawska, Krakowska, Wrocławska są członkami wspierającymi.



Ryc. 5. Schematyczne zestawienie Europejskich Sieci Metrologicznych oraz powiązanych z nimi metrologicznych partnerstw i inicjatyw europejskich [43]

Światowa agenda metrologiczna jest realizowana przede wszystkim poprzez krajowe instytuty metrologiczne wspomagane przez czołowe placówki naukowo-badawcze oraz działy badawczo-rozwojowe przedsiębiorstw. Wszyscy partnerzy aktywnie włączają się w prace wspomnianych agend międzynarodowych, uwzględniając jednocześnie w swoich mapach drogowych priorytety krajowe. W obszarze optyki i fotoniki wieloletnia strategia rozwoju technologii fotonicznych z ogromną reprezentacją metrologii optycznej i sensorów jest zaprezentowana w mapie drogowej na lata 2023–2030 przygotowanej przez Europejską Platformę Technologiczną Photonics 21 [44].

3.2. Współczesne światowe trendy rozwojowe metrologii optycznej

Bez względu na różnice w poziomie badań i rozwoju technologii oraz zapotrzebowaniu na usługi metrologiczne, a także w nakładach na aktywności NMI i jednostek współpracujących w poszczególnych krajach do podstawowych, współczesnych trendów rozwojowych metrologii optycznej należą:

- rozszerzenie zakresu pasma optycznego wykorzystywanego praktycznie do pomiarów promieniowania od ekstremalnego nadfioletu EUV (15 nm) do zakresu terahercowego THz (1 mm), w tym

znaczne zwiększenie udziału średniej podczerwieni m.in. w czujnikach optycznych,

- rozwój aktywnych, optycznych systemów pomiarowych,
- rozwój i automatyzacja multimodalnych oraz hierarchicznych (multiskalowych) systemów pomiarowych,
- nanometrologia dla układów elektroniki i fotoniki scalonej [45],
- cyfryzacja, metrologia systemowa i sztuczna inteligencja (AI).

Rozszerzenie zakresu pasma optycznego wykorzystywanego praktycznie do pomiarów promieniowania od ekstremalnego nadfioletu EUV (15 nm) do zakresu terahercowego THz (1 mm), w tym znaczne zwiększenie udziału średniej podczerwieni m.in. w czujnikach optycznych

Jest to związane z jednej strony z rozwojem oraz zwiększeniem dostępności źródeł światła i detektorów dla nowych długości promieniowania, a z drugiej z zapotrzebowaniem na pomiary o coraz większej dokładności i rozdzielczości, badaniem nowych materiałów i pomiarami bezpiecznymi dla materiału biologicznego. Trend ten ma również swoje konsekwencje w konieczności zapewnienia możliwości badań metrologicznych i certyfikacji nowych źródeł światła oraz detektorów.

Rozwój aktywnych, optycznych systemów pomiarowych

Dzięki zastosowaniu modyfikacji jednego lub wielu atrybutów promieniowania optycznego (intensywności, fazy, częstotliwości, kierunku, polaryzacji, koherencji przestrzennej i czasowej) możliwe będzie wykonanie zaawansowanego zadania pomiarowego lub znaczne rozszerzenie możliwości pomiarowych i zwiększenie dokładności i/lub zakresu pomiarowego istniejących systemów. Wprowadzanie „aktywizacji” systemów MO jest możliwe m.in. przez rozwój wysokorozdzielczych przestrzennych modulatorów światła oraz elementów optycznych wykorzystujących zjawiska nieliniowe w materiałach optycznych (w tym rozwój metamateriałów).

Rozwój i automatyzacja multimodalnych oraz hierarchicznych (multiskalowych) systemów pomiarowych

W przypadku tego zagadnienia, chodzi o pomiary wykonywane z wykorzystaniem systemów optycznych dostarczających dane pomiarowe o różnych wielkościach (np. geometria 3D i przemieszczenia/

odkształcenia, geometria 2D lub 3D i reflektancja w funkcji długości fali, dwójłomność, współczynnik załamania i geometria wewnętrzna, rozkład amplitudy drgań, częstotliwości rezonansowe, kształt początkowy, rozkład temperatur i odkształcenia / lokalizacja defektów itd.). Dodatkowo dane pomiarowe często powinny być pozyskiwane hierarchicznie, tj. od pomiarów globalnych do lokalnych – w różnych polach pomiarowych, z różnymi czułościami i w różnym zakresie pomiarowym. Cechą wspólną tych pomiarów jest pozyskanie wyników w jednym, wspólnym układzie współrzędnych, który można skorelować z układem współrzędnych przyjętym w analizach numerycznych. Zapotrzebowanie na multimodalne i hierarchiczne metody optyczne lub mieszane (np. połączenie metod optycznych ze stykowymi lub akustycznymi) wynika z ciągle zwiększającej się komplikacji powierzchni wytwarzanych (np. metodami przyrostowymi) obiektów, zastosowania nowych materiałów, konieczności pełnej archiwizacji (np. obiektów dziedzictwa kulturowego) lub wieloparametrycznego monitorowania infrastruktury krytycznej i multimodalnych pomiarów biomedycznych. Trend ten nierozzerwalnie jest związany z zapotrzebowaniem na nowe wzorce fizyczne i procedury pomiarowe, tworzeniem bliźniaków cyfrowych zarówno wzorców, jak i całych systemów pomiarowych.

Nanometrologia dla układów elektroniki i fotoniki scalonej

Działania te są powiązane z inicjatywami regionalnymi: *European Chips Act* [46] oraz *Chips for America* [47], a także wieloma zadaniami uwzględnionymi w mapach drogowych NMIs [47, 48]. Inicjatywy te obejmują zintegrowane układy elektroniczne i fotoniczne (ang. *photonics integrated circuits* – PIC), w tym do zastosowań kwantowych [49, 50]. W branży półprzewodników następuje stopniowe wycofywanie technologii Planar CMOS wraz z wprowadzeniem nowej architektury urządzeń, takiej jak technologia 3D FinFET, rozszerzającej prawo Moore’a na technologie 3D w skali nano (struktury < 22 nm). Wymaga to rozwoju metod optycznych bazujących na nowych strategiach pomiarowych (np. takich jak apertura syntetyczna, mikroskopia obliczeniowa, metody bazujące na modelu (np. skaterometria)) wspomaganych często metodami sztucznej inteligencji oraz współdziałających z mikroskopią elektronową, mikroskopią sił atomowych oraz metodami spektroskopowymi i elastooptycznymi. Metrologia elektroniki i fotoniki zintegrowanej

nie może ograniczać się do rozwiązań laboratoryjnych, ale musi być wdrażana w warunkach przemysłowych, w których wymagana jest bezpośrednia, 100 % kontrola po kolejnych etapach technologicznych na waflu zawierającym od kilkudziesięciu do kilkuset mikrostruktur. Szczególna uwaga w tym obszarze jest również skupiona na systemach pomiarowych wspomagających pakowanie czipów elektronicznych i fotonicznych oraz na metrologii finalnych produktów, w tym m.in. sensorów wykorzystywanych w Internecie rzeczy.

Cyfryzacja, metrologia systemowa i sztuczna inteligencja (AI)

Metrologia optyczna, ze względu na pozyskiwanie danych najczęściej w postaci obrazowej lub wolumetrycznej (tomografia, chmury punktów) o dużych rozdzielczościach (próbkowanie przestrzenne i czasowe), jest działem metrologii generującym największą ilość danych cyfrowych. Stąd wymóg cyfrowego rozpowszechniania identyfikowalności AI poprzez godne zaufania przepływy dokumentów, w tym należy wspomnieć o inicjatywie GO FAIR (ang. *findable, accessible, interoperable, reusable*) [51] dotyczącej standardów metadanych. Metrologia systemowa i działanie maszynowe [52] są tematami ściśle związanymi z wykorzystaniem MO w cyfrowym wytwarzaniu [5, 53], zdalnej diagnostyce medycznej [54, 55], zarządzaniu w rolnictwie [56] czy koncepcji miast przyszłości [57]. Niezależnie jednak od tego, czy chodzi o system kontroli jakości w przemyśle, autonomiczną jazdę czy sztuczną inteligencję w medycynie – wszędzie ważne jest nie tylko mierzenie i ocena poszczególnych wartości, ale także zrozumienie i scharakteryzowanie złożonych systemów pomiarowych i czujników. Metrologia systemowa ma za zadanie wprowadzić ujęcie systemowe i kontekstowe dla systemu pomiarowo-testowego, który ma gwarantować zaufanie, niezawodność i bezpieczeństwo w przyszłości. Takie ujęcie jest szczególnie ważne w systemach MO wykorzystujących do analizy danych metody sztucznej inteligencji [58].

3.3. Kierunki rozwoju metrologii optycznej w Polsce

Zaawansowane technologie optoelektroniczne i fotoniczne odgrywają kluczową rolę w rozwoju wszelkich technologii informacyjnych [44].

Podobnie jak na świecie rola metrologii optycznej oraz sensorów optycznych i fotonicznych w większości dziedzin gospodarki i życia obywateli w Polsce rośnie lawinowo [59]. Poniżej przedstawiono oczekiwane kierunki rozwoju metrologii optycznej oraz szeroko rozumianych sensorów fotonicznych w kontekście światowych trendów oraz priorytetów krajowych.

3.3.1. Przemysł (zaawansowana produkcja)

W obszarze zaawansowanej produkcji Polska jest na etapie wdrażania Przemysłu 4.0, w którym postawiono na efektywność i opłacalność produkcji, jednak obecnie na Zachodzie lansuje się koncepcję Przemysłu 5.0 stanowiącego poniekąd słuszną odpowiedź na zmieniającą się rzeczywistość i nowe wyzwania. Przemysł 5.0 łączy innowacyjne technologie i cyfryzację z podejściem prośrodowiskowym, gospodarką cyrkularną oraz tworzeniem „ekosystemu” firm i partnerów. Rozwój metrologii w Polsce generalnie, a metrologii optycznej w szczególności, powinien być nakierowany na uwzględnienie nowych elementów wprowadzanych przez Przemysł 5.0.

Metody pomiarowe zapewniające oczekiwaną jakość procesów produkcyjnych i produktów końcowych

Rozwój innowacyjnych technologii wytwarzania (np. technologie addytywne, techniki laserowe), wykorzystanie nowych materiałów (ceramika, polimery, materiały kompozytowe), coraz większa komplikacja kształtów (*free form*) obiektów oraz często znacznie większe wymagania dotyczące tolerancji wymiarowych produkowanych elementów, a także ich integralności strukturalnej (np. minimalizacja naprężeń resztkowych) stawiają nowe zadania przed przemysłowymi komórkami pomiarowymi i systemami kontroli jakości.

W przypadku wprowadzania nowych materiałów lub procesów technologicznych (etap prototypowania) nastawionych na znaczne oszczędności, np. materiału, niezbędne będzie stosowanie hybrydowych optyczno-numerycznych metod analizy konstrukcji, które przyspieszają proces optymalizacji i wdrożenie produktu/technologii, a także umożliwiają opracowanie cyfrowego bliźniaka (ang. *digital twin* – DT) produktu stanowiącego punkt wyjścia do dalszej optymalizacji procesu produkcyjnego

lub procesu pomiarowego. Z drugiej strony coraz częściej rozważane jest opracowywanie cyfrowych bliźniaków systemów pomiarowych, dzięki którym można przewidzieć konsekwencje metrologiczne modyfikacji procesu produkcyjnego. Metody optyczne, takie jak: obrazowanie 2D, pomiary 3D (np. z wykorzystaniem metod światła strukturalnego), interferometria laserowa (dla elementów o powierzchniach optycznych), shearografia, deflektometria oraz cyfrowa korelacja obrazu to najczęściej stosowane metody pomiarowe w warunkach laboratoriów przemysłowych lub nawet na linii produkcyjnej. Niestety większość z tych metod (także w wersjach podstawowych) nie jest akceptowana w przemyśle jako standardowe metody pomiarowe umożliwiające zachowanie spójności pomiarowej. Niepewność w pomiarze optycznym, zarówno metrologii geometrycznej oraz współrzędnościowej w skali makro i mikro, jak i w metodach pomiaru zmian obiektu, pozostaje złożonym i otwartym pytaniem badawczym. Ustanowienie identyfikowalności optycznych systemów pomiarowych, zwłaszcza w cyfrowej konfiguracji produkcyjnej, jest często skomplikowane ze względu na technologię pomiaru i złożoność mierzonych obiektów. Dla pełnego wykorzystania połowych metod optycznych w przemyśle konieczne jest opracowanie standardowych wzorców (przede wszystkim dla obiektów o znacznie większej komplikacji struktury zewnętrznej i wewnętrznej), procedur pomiarowych oraz uregulowań prawnych.

Dodatkowe wymagania formułowane obecnie w stosunku do optycznych metod pomiarowych to:

- pomiar w trakcie procesu wytwórczego (np. w trakcie druku 3D),
- pomiar aktywny w obecności niestabilności środowiska (samokalibracja systemu pomiarowego, aktywna kompensacja wpływu środowiska),
- pomiary dużych obiektów z wysokimi dokładnościami [łączenie pomiarów cząstkowych (kierunkowych) lub pomiary pól rozproszonych w przestrzeni – problem wspólnego globalnego układu współrzędnych i niepewności takiego pomiaru],
- pomiary multimodalne (pomiary różnych wielkości fizycznych i/lub z wykorzystaniem układów o różnych czułościach i polach pomiarowych, pomiary wykorzystujące różne zakresy promieniowania optycznego),

- łączenie wyników pomiarów metodami optycznymi i nieoptycznymi [np. stykowymi (maszyny współrzędnościowe), akustycznymi czy tomografii X],
- opracowanie elastycznych scenariuszy pomiarowych dla zindywidualizowanych produktów (np. wykonanych z wykorzystaniem technologii druku 3D).

Konieczne jest więc rozwijanie i udoskonalanie zaawansowanych metod pomiarowych i analizy danych oraz cyfrowych rozwiązań systemowych, które odpowiadają na nowe wyzwania stawiane przez przemysł.

Widzenie maszynowe w robotyzacji i automatyzacji procesów pomiarowych

Szybki rozwój i innowacje w dziedzinie systemów widzenia maszynowego (MVS) spowodowały falę zastosowań przemysłowych, takich jak: pojazdy autonomiczne, zaawansowane technologie kontroli, magazynowanie itp. Producenci wskazują na wiele czynników przemawiających za wdrażaniem MVS w swoich procesach produkcyjnych, począwszy od możliwości szybszej i bardziej spójnej pracy, do dłuższej pracy linii produkcyjnych, zwiększając w ten sposób produktywność swoich przedsiębiorstw. Systemy widzenia maszynowego zmieniły sposób, w jaki producenci przeprowadzają inspekcje i koordynują działania z robotami w hali produkcyjnej. Do kontroli jakości MVS wykorzystują kamery i czujniki do analizy obrazów (z różnych zakresów spektralnych), monitorowania jakości produktu i raportowania braków w procesie w czasie *quasi-rzeczywistym*. Wdrożenie takiej technologii doskonale wpisuje się w ambicje związane z produkcją bez wad i odpadów. Co więcej, MVS, obejmujące algorytmy dopasowujące (fotogrametria i wizja komputerowa) oraz techniki klasyfikacji defektów (w tym metody AI), stały się niezbędne tam, gdzie inspekcje produktów w makro- i mikroskali stanowią wyzwanie dla człowieka. Oczekuje się, że potrzeba zwiększonej kontroli jakości przez konsumentów i producentów, w połączeniu z przepisami rządowymi dotyczącymi przestrzegania zalecanych specyfikacji, doprowadzi do lawinowego stosowania MVS.

Jednakże wymaga to zapewnienia spójności pomiarowej i wiarygodności MVS stosowanych w produkcji przemysłowej zarówno w makro-, jak i mikroskali, identyfikowalnych standardów materiałowych, zweryfikowanych i zwalidowanych cyfrowych bliźniaków tych systemów,

oceny niepewności zgodnie z obowiązującymi normami, inteligentnej selekcji danych, a także solidnych i niezawodnych algorytmów dopasowywania i analizowania. Aby to osiągnąć, należałoby skoncentrować się na następujących działaniach, które można odnieść (w konkretnych realizacjach) również do metrologicznej implementacji wizyjnych metod pomiarowych stosowanych w aplikacjach pozaprodukcyjnych:

- ustalenie spójności pomiarowej istniejących i nowo opracowanych przemysłowych MVS stosowanych w uznanych czterech typach kontroli: (1) jakości wymiarowej, (2) jakości powierzchni, (3) jakości strukturalnej i (4) jakości operacyjnej, przy czym obejmuje to opracowanie odpowiednich wzorców materiałowych o kanonicznych i złożonych kształtach, strategii wzorcowań, identyfikowalnej identyfikacji parametrów MVS, budżetowania niepewności itp. (wykorzystane mogą tu zostać dodatkowe bezdotykowe systemy śledzenia w celu poprawy wiedzy o położeniu MVS w objętości roboczej),
- opracowanie DT istniejących i nowych MVS (łącznie z systemami wielokamerowymi, zlokalizowanymi na ramieniu robota, dronie lub w innej konfiguracji pomiarowej) z wykorzystaniem modeli fizycznych i/lub modeli obliczeniowych,
- opracowanie metod walidacji tych DT, a także procedur statystycznych do oceny różnic pomiędzy pomiarami wzorcowanych wzorców i odpowiadającymi im danymi z ich wirtualnego odpowiednika,
- wdrożenie metod kwantyfikacji niepewności opracowanych DT dla MVS, przy czym taka działalność wymaga uwzględnienia wpływów dynamicznych w modelach i ciągłych aktualizacji (kalibracji i wzbożania) modeli bazowych na podstawie bieżących danych.

Dodatkowo systemy widzenia maszynowego, bazujące obecnie na ogromnej gamie detektorów pracujących w różnych zakresach spektralnych, a także detektorów multispektralnych i hiperspektralnych, wymagają dostępnych usług w zakresie wzorcowania tych detektorów.

Nano- i mikrotechnologie oraz technologie kwantowe

Polski przemysł w coraz większym zakresie odpowiada na megatrendy technologiczno-gospodarcze adresujące takie obszary jak: Internet rzeczy, technologie telekomunikacyjne (rozwój technologii 5G i 6G czy też wymagania klientów sieci) oraz integracja elektro- niczno-fotoniczna (rozwój i łączenie układów elektroniki i fotoniki

scalonej)). O ile trudno wyobrazić sobie dogonienie przez polskie firmy światowego przemysłu półprzewodnikowego skoncentrowanego na czipach elektronicznych o krytycznych wymiarach na poziomie kilku nanometrów, o tyle strategiczne i uporządkowane podejście do planowania ścieżek rozwoju i inwestycji technologicznych w obszarze fotoniki zintegrowanej powinno dać wymierne efekty, a równocześnie stworzyć konkretne zapotrzebowanie na rozwiązywanie problemów metrologicznych wspomagających nano- i mikrotechnologie oraz bazujące na nich produkty. Rozpoczęte przez VIGO Photonics w 2020 r. prace koncepcyjne i badawcze w kierunku rozwoju technologii fotoniki scalonej na zakres spektralny średniej podczerwieni (MIR) są kontynuowane w ramach projektu HyperPIC realizowanego w programie IPCEI (Important Projects of Common European Interest). Celem tego projektu jest opracowanie kluczowych technologii oraz uruchomienie pierwszej na świecie fabryki układów fotoniki scalonej na zakres MIR. Potencjał aplikacyjny układów fotoniki scalonej na zakres średniej podczerwieni (ang. *mid infrared photonic integrated circuits* – MIRPIC) to głównie miniaturowe systemy czujnikowe do detekcji/monitoringu gazów i cieczy, wielokanałowe układy nadawczo-odbiorcze dla komunikacji optycznej w wolnej przestrzeni, zintegrowane systemy lidarowe, systemy diagnostyki medycznej itp. Tak więc oprócz rozwiązywania zagadnień metrologicznych na poziomie wytwarzania czipów (pomiarów parametrów strukturalnych, materiałowych, funkcjonalnych z wykorzystaniem metrologii optycznej i/lub elektrycznej) muszą rozwijać się metody pomiarowe związane z pakowaniem czipów i integracją z mikrooptyką, światłowodami, falowodami lub układami mikrofluidycznymi dla wytworzenia czujników lub innych elementów funkcjonalnych.

Optycznego wspomagania metrologicznego wymagać też będą działania strategiczne w ramach narodowego programu technologii kwantowych obejmującego takie obszary jak: elementy komputerów kwantowych, kryptografia, komunikacja kwantowa i systemy dystrybucji klucza kwantowego. Wiele z tych funkcji będzie w przyszłości realizowanych przez kwantowe fotoniczne układy zintegrowane. Optyczne wyzwania metrologiczne są w tym przypadku związane m.in. z detekcją superślabych sygnałów optycznych i minimalizacją szumów. Aby zastosować kryptografię kwantową w praktyce, konieczny jest dokładny pomiar wszystkich właściwości podstawowego sprzętu,

aby w rzeczywistości można było zagwarantować właściwości „bezpieczne kwantowo”. Zakres niezbędnych prac obejmuje podstawowe badania i rozwój metrologiczny wraz z tworzeniem specjalnych usług wzorcowania.

Należy też wspomnieć, że ze względu na zmieniające się uwarunkowania zewnętrzne i związany z nimi problem bezpieczeństwa narodowego bardzo powoli są odbudowywane (lub będą odbudowywane) możliwości produkcji własnej elektroniki (zwłaszcza do optoelektronicznego sprzętu wojskowego i telekomunikacji), co również wymaga zapewnienia odpowiedniej infrastruktury pomiarowej, generując zapotrzebowanie na pomiary w zakresie mikro- i nano, oraz zapewnienia wzorców i spójności pomiarowej w zakresie nanometrologii wymiarowej (2D i 3D), a także materiałowej. W obszarze sprzętu optoelektronicznego dla potrzeb wojskowych i technologii kosmicznych superdokładne pomiary optyczne i wzorcowania dotyczą również mikrooptyki, detektorów, modulatorów i źródeł światła (w tym laserowych).

Oddzielnym zadaniem w zakresie mikro- i nanotechnologii jest metrologia światłowodów i ich akcesoriów (w tym czujników światłowodowych). O ile kontrola jakości typowych światłowodów telekomunikacyjnych jest uregulowana, o tyle cała gama światłowodów specjalnych (w tym różnego rodzaju rozwiązań światłowodów mikrostrukturalnych, światłowodów aktywnych, z wbudowanymi siatkami Bragga i in.) oraz ich akcesoriów wymaga specjalnych procedur pomiarowych i norm.

Mikro- i nanotechnologie w obszarach, takich jak: PIC, technologie kwantowe i światłowody specjalne mają dużą szansę zaistnienia jako specjalizacja polska na rynku światowym. Metrologia w tym zakresie rozwijana jest fragmentarycznie w wielu ośrodkach uniwersyteckich i instytutach naukowo-badawczych, a także jest wspierana przez infrastrukturę, wśród których można wymienić: Narodowe Laboratorium Fotoniki i Technologii Kwantowych (NLTK), multidyscyplinarne Centrum Inżynierii Materiałowych (CIM) działające w ramach Sieci Badawczej Łukasiewicz – PORT Polski Ośrodek Rozwoju Technologii, Centrum Zaawansowanych Materiałów i Technologii (CEZAMAT) Politechniki Warszawskiej. Niezbędne jest jednak szersze włączenie się polskich jednostek w międzynarodowe działania w tym obszarze metrologicznym (bardzo mocno obecnym na mapach drogowych NMI), a nawet przejęcie pałeczki lidera np. w zakresie metrologii PIC. Oczekiwany

jest szybki rozwój kompetencji i infrastruktury pomiarowej w skali mikro i nano w ramach Świętokrzyskiego Kampusu Laboratoriów GUM.

3.3.2. Energia: przejście ze źródeł klasycznych na źródła odnawialne

Potrzeba pilnych działań na rzecz zrównoważonego rozwoju i ograniczenia emisji gazów cieplarnianych jest obecnie priorytetem zarówno na skalę globalną, jak i krajową. Związane jest to z rozwojem i implementacją zaawansowanych technologii energetycznych, w tym fotowoltaiki, energetyki wiatrowej, magazynowania energii oraz energetyki jądrowej. Rola metrologii optycznej w tym obszarze jest znaczna, chociaż ograniczona w dużej mierze do pomiarów na etapie rozwoju tych technologii oraz monitorowania sensoryki na etapach instalacji, zarządzania i użytkowania instalacji energetycznych.

Fotowoltaika

Rynek klasycznej fotowoltaiki (PV) jest obecnie zdominowany przez produkty firm chińskich, zapewniających wszystkie elementy łańcucha wartości. W Polsce prowadzone są w tym obszarze prace naukowo-badawcze na poziomie materiałowym nakierowane na wzrost wydajności paneli fotowoltaicznych (ogniwa cienkowarstwowe, perowskitowe, wielozłączowe, z kropkami kwantowymi). Na rynku fotowoltaicznym odnajdują się też niektóre polskie przedsiębiorstwa, działające w obszarze niestandardowych rozwiązań PV. Jako przykłady można wskazać produkcję transparentnych szyb PV z powłoką kwantową (ML Systems S.A.), produkcję ultracienkich, elastycznych paneli fotowoltaicznych (Saule Technologies) oraz produkcję szkła o unikatowych właściwościach, gwarantujących poprawę parametrów produkowanych paneli PV (FIBRIAN Energy). Optyczne metody pomiarowe wspomagają w pewnym zakresie te innowacyjne działania. Z drugiej strony dużej uwagi wymaga opracowanie całej gamy sensorów optycznych, mierzących natężenie światła, temperaturę oraz przepływ energii, niezbędnych dla systemów monitorowania i zarządzania energią. W elektrowniach słonecznych z systemami nadążnymi, czujniki optyczne ułatwiają regulację orientacji paneli słonecznych, maksymalizując wydajność produkcji energii. Technologie światłowodowe

i sensory fotoniczne mogą być również wykorzystywane do rozwoju inteligentnych sieci energetycznych, w szczególności do optymalizowania przepływu energii i reagowania na zmieniające się warunki w systemie energetycznym. Ważnym aspektem w tym obszarze jest zapewnienie czujników i opracowanie procedur dla efektywnego łączenia różnych źródeł energii, zarządzania zapotrzebowaniem i magazynowaniem energii.

Energetyka wiatrowa

Drugim obszarem znajdującym się w obszarze dużego zainteresowania w Europie i obecnie w Polsce [60] jest metrologia związana z energetyką wiatrową (lądową i morską). Przyjęta w 2023 r. nowelizacja ustawy o minimalnej odległości elektrowni wiatrowych od budynku mieszkalnego (zmniejszenie wymogu minimalnej odległości wiatraków od zabudowań do 700 m) pozwoli na wzrost mocy zainstalowanej w lądowej energetyce wiatrowej o 4 GW, co niestety dalej jest poniżej oczekiwań. Znacznie lepiej wygląda sytuacja z rozwojem morskiej energetyki wiatrowej. Najnowsze rządowe plany przewidują aukcje na maksymalną łączną moc zainstalowaną morskich farm wiatrowych na poziomie 12 GW. Energia elektryczna z pierwszej polskiej farmy wiatrowej na Bałtyku ma popłynąć w 2026 r. Wymagania techniczne stawiane mocnym, wysokim turbinom wiatrowym o dużych średnicach wirników dochodzących nawet do 240 m są ogromne, a efektywne badania jakości łopat oraz monitorowanie działania turbin w aspekcie ich niezawodności i bezpieczeństwa są koniecznością. Przykładem wagi problemu w skali międzynarodowej jest umieszczenie na mapie drogowej NPL [48] w obszarze „net-zero energy technologies” zadania związanego konkretnie z rozwojem wielokamerowych, szybkich systemów cyfrowej korelacji obrazu i ich implementacja do pomiarów *in situ* na farmach wiatrowych. Należy również wspomnieć o utworzeniu w PTB Centrum Kompetencji Energii Wiatrowej mającego następujące kompetencje:

- wykonywanie pomiarów bardzo dużych elementów (objętość pomiarowa 5 m × 4 m × 2 m) z najwyższą precyzją,
- rozwój najnowocześniejszych technik czujników LIDAR (wykrywanie i określanie odległości) do analiz potencjału wiatru, w tym

stosowanie tunelu aerodynamicznego do wzorcowania i precyzyjnego określania systemów LIDAR,

- opracowanie metody przewidywania zakłóceń powstających od turbin wiatrowych mających wpływ na urządzenia kontroli ruchu lotniczego dla bezpieczeństwa lotów.

Technologie wodorowe

Obszarem energetyki związanym z magazynowaniem energii są technologie wodorowe. Jako że wodór jest gazem niezwykle łatwopalnym po zmieszaniu z powietrzem, dlatego też instalacje, niezależnie od tego, czy są to zastosowania w pobliżu konsumenta (np. na stacjach benzynowych), czy w procesach przemysłowych, muszą gwarantować maksymalne bezpieczeństwo. Aktualnym zadaniem NMIs jest opracowanie procedur testowych (w dużej mierze bazujących na metodach optycznych (sensory światłowodowe, polowe metody optyczne monitorowania przemieszczeń i odkształceń)) dla urządzeń z zabezpieczeniem przeciwwybuchowym, standaryzacja tych procedur i ich wdrożenie do prawnie regulowanych procedur oceny zgodności.

Energetyka jądrowa

Nie można nie wspomnieć tutaj o bardzo ważnym dziale energetyki, jakim jest energetyka jądrowa. W krajach, w których jest ona wykorzystywana od dziesięcioleci procedury pomiarowe w dużych elektrowniach jądrowych są ustandaryzowane, chociaż zapotrzebowanie na precyzyjne pomiary jest zawsze bardzo duże. Jako przykłady należy wymienić produkcję komponentów reaktora i testy materiałów w krytycznych warunkach (polowe metody optyczne), a także monitorowanie elementów i procesów w trakcie eksploatacji reaktora (sensory światłowodowe). Współcześnie jednak zmieniło się w dużej mierze podejście do energetyki jądrowej, ponieważ przemysł nuklearny proponuje nową generację małych reaktorów modułowych (SMRs), których budowa jest tańsza, szybsza i mniej ryzykowna finansowo. Łącząc zalety energii jądrowej, takie jak: minimalna emisja gazów cieplarnianych i wysoka gęstość energii z ich modułowością i skalowalnością, SMRs mogą znacząco zwiększyć bezpieczeństwo energetyczne i dostępność energii na całym świecie. Ich mniejsze rozmiary i fabryczne procesy produkcyjne umożliwiają krótszy

czas budowy, obniżone koszty inwestycyjne i poziom elastyczności nieporównywalny z konwencjonalnymi elektrowniami jądrowymi. Energetyka jądrowa w Polsce będzie wprowadzana właśnie poprzez budowę SMRs i musimy być gotowi na rozwiązywanie problemów związanych z bezpieczeństwem radiacyjnym i pomiarowymi wyzwaniem operatorów tych reaktorów.

3.3.3. Zdrowie i rolnictwo

Zdrowie

Fotonika i metrologia optyczna są głównymi narzędziami, które mogą przyspieszyć innowacje i postęp technologiczny w medycynie poprzez skuteczne rozwiązania diagnostyczne i terapeutyczne dla znacznie szerszego zakresu chorób niż jest to możliwe obecnie. Cały czas rozwijane są techniki obrazowania optycznego *in vivo* bazujące na metodach wideo-endoskopowych i fibreroskopowych (w tym również holografii cyfrowej) oraz metodach stereoskopowych połączonych z metodami rzeczywistości rozszerzonej. Wszystkie powyżej wymienione metody umożliwiają małoinwazyjną diagnostykę i terapię. Coraz częściej obrazowanie to musi dostarczać dane ilościowe (np.: lokalizacja, wymiar, przepływ), a wynik pomiaru jest krytyczny dla zdalnego przeprowadzania ingerencji medycznej (operacji). Do intensywnie rozwijających się w Polsce technik obrazowania *in vivo* należy również koherentna tomografia optyczna (OCT), w szczególności wykorzystywana do diagnostyki chorób narządu wzroku. OCT obecnie informuje o objętościowym rozmieszczeniu struktur biologicznych w tkance, jednak są to dane pozyskane przy założeniu znanej wartości współczynnika załamania, a więc z metrologicznego punktu widzenia obarczone nieznany błądem.

Wśród zastosowań pomiarowych technologii fotonicznych w medycynie należy również podkreślić rosnące znaczenie światłowodowych i ogólnie optycznych systemów czujnikowych przeznaczonych np. do: nieinwazyjnych pomiarów parametrów życiowych pacjentów, detekcji bakterii i innych patogenów, detekcji markerów chorobowych, monitorowania poziomu glukozy lub mleczanów we krwi i in. W kontekście planowanego w Polsce intensywnego rozwoju technik fotoniki scalonej (PIC) i systemów *lab-on-chip*, umożliwiających niskokosztową

diagnostykę, ważnym zagadnieniem staje się zapewnienie odpowiedniej dokładności pomiaru tych czujników.

Najszerzej jednak stosowaną metodą pomiarową w biomedycynie jest mikroskopia wykorzystywana do obrazowania *in vitro* na poziomie komórkowym i tkankowym. Ze względu na znaczną transparentność preparatów biologicznych większość metod mikroskopowych wymaga stosowania markerów (tj.: barwienie próbek histopatologicznych, wykorzystywanie markerów fluorescencyjnych i in.), co może zmienić wynik pomiaru, zwłaszcza prowadzonego na żywej hodowli komórek. Z tego względu coraz większą popularność zyskują metody tzw. ilościowego obrazowania fazowego (QPI), które jako kontrast wykorzystują różnicę współczynnika załamania w mikroobiekcie i są źródłem informacji zarówno o morfologii, jak i rozkładzie suchej masy w preparacie. Większość metod QPI w wersji obrazowania 2D i 3D korzysta z przybliżonych metod propagacji światła i mikroskopii obliczeniowej, korzystających często z narzędzi sztucznej inteligencji. Z tego względu istnieje pilna potrzeba opracowania wspólnych protokołów pomiarowych, wzorców obiektów fazowych (w tym o różnym stopniu rozpraszania, mimikujących przejście przez różne grubości tkanki) oraz metodyki wyznaczania niepewności pomiarów w mikroskopii fazowej 2D i 3D oraz metodach mikroskopowych wykorzystujących zjawiska nieliniowe optyczne (np. z domieszkowaniem nanocząstkami), fotoakustyczne i in. Metody QPI, ze względu na swoją nieinwazyjność, mają szansę stać się kluczową metodą wspomagającą wprowadzanie nowych leków oraz wspierającą rozwój spersonalizowanej medycyny. Zapewnienie identyfikowalności metrologicznej instrumentów do diagnostyki *in vitro* (IVD) jest jednym z głównych celów działania Europejskiej Sieci Metrologicznej (Traceable Laboratory Medicine). Identyfikowalność metrologiczna powinna zapewnić dokładne wyniki testów niezależnie od laboratorium, dostawcy IVD czy oprzyrządowania użytego do badania. Zmniejsza również obciążenie finansowe systemów opieki zdrowotnej poprzez unikanie niepotrzebnych badań i pozwala producentom wyrobów medycznych do diagnostyki *in vitro* spełnić wymogi prawne, takie jak rozporządzenie UE 2017/746 (IVDR), lub też uzyskać i utrzymać dostęp do rynku. GUM dołączył w 2024 r. do EMN Traceable Laboratory Medicine i przy współpracy z polskimi partnerami naukowymi (będącymi międzynarodowymi liderami w tej tematyce) powinien sukcesywnie zwiększać swoje kompetencje w tym zakresie.

Mimo że rolnictwo jest dość konserwatywnym działem gospodarki jego cyfryzacja zachodzi obecnie krok po kroku na wszystkich etapach łańcucha towarowego żywności [61]. Bazuje przy tym na wielkoskalowym i multispektralnym obrazowaniu, Internecie rzeczy, analizie *Big Data*, a także wykorzystaniu metod sztucznej inteligencji. Na poziomie wytwarzania produktów rolnych optyczne pomiary i monitorowanie dotyczą przede wszystkim takich obszarów jak: sadownictwo, nawożenie i nawadnianie pól, zarządzanie oświetleniem i nawodnieniem w farmach wertykalnych i wodnych oraz monitorowanie warunków hodowli i zdrowia inwentarza żywego na farmach (w tym farmach morskich). W przetwarzaniu żywności główny trend w powstających technologiach cyfrowych obejmuje automatyzację lub robotykę, taką jak systemy optyczne, które automatycznie sortują owoce i warzywa, oraz technologie IoT wykorzystywane w robotach współpracujących i komunikujących się ze sobą. Niektóre firmy eksperymentują także z inteligentnymi opakowaniami i drukiem żywności. W transporcie żywności różne rodzaje czujników (głównie spektroskopowych) i analityki pozwalają na większą kontrolę nad warunkami transportu i przechowywania żywności w celu monitorowania świeżości, zwiększenia bezpieczeństwa i uniknięcia strat spowodowanych zepsuciem.

Główne kierunki rozwoju czujników fotonicznych w zastosowaniach rolno-spożywczych skupiają się na rozszerzaniu stosowanych długości fal w zakresie od UV, poprzez światło widzialne, MIR aż do THz. Mając to na uwadze, należy spodziewać się wdrażania różnorodnych metod spektroskopowych (FTIR, fluorescencja, Raman) w zminiaturyzowanych czujnikach za pomocą fotonicznych układów scalonych, światłowodów, *lab-on-chip*, MEMS/MOEMS wyposażonych w wielość funkcjonalności.

Innymi technologiami, które cieszą się obecnie dużym zainteresowaniem w rolnictwie, są bezzałogowe systemy powietrzne (UAS) z kamerami widzialnymi, IR i/lub hiperspektralnymi oraz innymi czujnikami obrazowania (np. LIDAR). Ulepszone wersje istniejących czujników są w stanie konsekwentnie i szybko zbierać obrazy o wyższej rozdzielczości na coraz większych obszarach, będąc jednocześnie wytrzymałymi, zużywającymi mało energii i niedrogimi elementami.

Rozwój różnorodnych czujników i systemów wizyjnych oraz ich łączenie w sieci pozyskiwania danych (często rozproszonych w przestrzeni i czasie) wiąże się z trendem do tworzenia w rolnictwie cyfrowych bliźniaków (DT w rolnictwie – tworzenie wirtualnych modeli naśladujących cechy i zachowanie fizycznych gospodarstw lub procesów wytwarzania żywności), których celem jest optymalizacja działalności gospodarstwa i usprawnienie procesów decyzyjnych [62]. Modele DT są budowane przy użyciu kombinacji danych z różnych źródeł, w tym z czujników, dronów, satelitów i zapisów historycznych. Dzięki ciągłemu gromadzeniu i analizowaniu danych cyfrowe bliźniaki zapewniają rolnikom cenny wgląd w stan upraw, stan gleby, wzorce pogodowe i wykorzystanie zasobów. Wzajemne połączenia pomiędzy wszystkimi komponentami odgrywają kluczową rolę, ponieważ są niezbędne do integrującego funkcjonowania systemu DT. Jednak jedną z najważniejszych kwestii jest tutaj jakość danych i ich wstępne przetwarzanie. Bez dobrych danych modele nieuchronnie będą działać słabo. Konieczne są ulepszenia w zakresie wykrywania wartości odstających, generowania danych i integracji różnorodnych źródeł danych, a także scenariuszy zapewniających ich dokładność i wiarygodność. Zagadnienia te wiążą się też z potrzebą standaryzacji na różnych poziomach struktury architektonicznej.

3.3.4. Bezpieczeństwo, obronność i technologie kosmiczne

Pełnoskalowa wojna na Ukrainie przypomniła Europie, że konflikty zbrojne na kontynencie nie są historią, lecz realnym zagrożeniem geopolitycznym, wpływającym na bezpieczeństwo energetyczne, gospodarcze i militarne całego regionu. Technologie fotoniczne są kluczowe w licznych zastosowaniach militarnych bazujących na pomiarach, zaczynając od systemów kierowania ogniem, zarządzania polem walki, poprzez systemy naprowadzania i śledzenia, aż do systemów bezpiecznej komunikacji kwantowej. Jednym z istotnych kierunków rozwoju uzbrojenia jest zapewnienie wysokiej precyzji rażenia i autonomiczności systemów (amunicja samonaprowadzająca się na cel). Wymaga to zastosowania selektywnych i czułych układów detekcyjnych w różnych zakresach spektralnych. Zaawansowane systemy wizualizacji danych, które pierwotnie wprowadzono w lotnictwie, obecnie są stosowane w pojazdach lądowych, a nawet w systemach informacji taktycznej

indywidualnych żołnierzy. Szybko rozwijają się również systemy bliskiej obserwacji, dzięki fuzji sensorów i nowoczesnym nabełmowym układom obrazującym.

Lasery i sensory optyczne (w tym sieci czujników światłowodowych) są wykorzystywane coraz szerzej w Polsce do monitorowania i ochrony strategicznych obszarów (np. długich odcinków granic) oraz infrastruktury krytycznej (tamy, elektrownie, rurociągi, infrastruktura przemysłowa i transportowa). Technologie fotoniczne pozwalają na budowanie urządzeń detekcyjnych pracujących w trybie detekcji *in situ* oraz detekcji zdalnej *stand off*. Generalnym trendem jest stosowanie różnych metod monitorowania i pomiarów (czujniki punktowe lub rozproszone, obrazowanie w różnych zakresach spektralnych z systemów wizyjnych stacjonarnych i umieszczonych np. na dronach, samolotach, a nawet satelitach). Fuzja danych z czujników wielkoskalowych i rozproszonych w przestrzeni oraz ilościowe przetwarzanie tych danych we wspólnych koordynatach są jednymi z największych współczesnych wyzwań metrologicznych. W polskich warunkach mamy do czynienia z systemami militarnymi produkcji polskiej oraz zakupionymi od naszych sojuszników. Wszystkie te systemy wymagają bieżącej integracji funkcji pomiarowych, zaś w czasie eksploatacji konieczne są działania, takie jak: testowanie, wzorcowanie, ocena ich funkcji pomiarowych, a także naprawy i kontrola jakości zaawansowanego technologicznie sprzętu.

Metrologia optyczna stanowi również podstawę oprzyrządowania kosmicznego, zapewniającą, że urządzenia wykorzystywane w eksploracji kosmosu dostarczają dokładnych i wiarygodnych danych. Instrumenty, takie jak: teleskopy, spektrometry i czujniki muszą być przetestowane na ziemi w ekstremalnych warunkach środowiskowych i eksploatacyjnych (przeciążenia, drgania) oraz wywzorcowane, aby wytrzymać trudne warunki kosmiczne i zapewnić precyzyjne zbieranie danych i pomiary w czasie misji kosmicznych. Polska włącza się w europejskie i międzynarodowe prace w programach satelitarnych, a więc i w tym zakresie niezbędny jest rozwój metod pomiarowych spełniających wymogi aparatury kosmicznej.

3.3.5. Transformacja cyfrowa

Jesteśmy obecnie w środku rewolucji cyfrowej. Cyfrowy przepływ danych stwarza wszędzie nowe możliwości, tj.: w gospodarstwach domowych, handlu, opiece zdrowotnej i przemyśle. Internet rzeczy napędza ten rozwój z zawrotną szybkością i jako przykład można wskazać maszyny wymieniające między sobą informacje za pośrednictwem interfejsów cyfrowych. Całe procesy produkcyjne w dużych firmach są już często w pełni połączone w sieć lub mają cyfrowe bliźniaki w chmurze. Przyrządy pomiarowe są również po części nierozzerwalnie związane z technologią cyfrową i zautomatyzowanym przetwarzaniem danych. Transformacja cyfrowa (TC) stanowi główne wyzwanie dla wyrafinowanego systemu infrastruktury jakości obejmującego metrologię, akredytację, ocenę zgodności, normy i standardy oraz nadzór rynku. Aby móc w dalszym ciągu gwarantować bezpieczeństwo (i pewność) mierzonych wartości, należałoby zebrać wszystkie niezbędne narzędzia w ramach kompleksowej strategii cyfryzacji – od cyfrowych świadectw wzorcowania i wirtualnych przyrządów pomiarowych po inteligentne zarządzanie danymi badawczymi i wspierane cyfrowo procesy testowania i zatwierdzania. Niektóre narodowe instytuty metrologiczne (np.: PTB, NPL) są już znacznie zaawansowane w realizacji tych zadań. Metodyka jest opracowywana zarówno na poziomach krajowych w ramach realizacji map drogowych poszczególnych NMIs, jak i w ramach EMN oraz projektów EURAMET-u. Pełna transformacja cyfrowa w metrologii prowadzi jednak do tak licznych wyzwań, że aby im sprostać, prace badawczo-rozwojowe rozłożone są na wiele lat. Przykładami tych wyzwań są:

- wykorzystanie cyfrowych bliźniaków jako wirtualnych przyrządów pomiarowych lub jako obiektów / systemów walidacyjnych,
- budowa złożonych systemów komunikacji,
- rozwój cyfrowego partnerstwa,
- opracowywanie nowych wskaźników jakości danych w szczególności dla obrazowania 2D i 3D,
- udostępnianie danych między dyscyplinami,
- budowa złożonych sieci czujników (różnoskalowych, rozproszonych w przestrzeni, często mierzących różne wielkości punktowo i/lub polowo),
- coraz szersze wykorzystanie metod sztucznej inteligencji [58] wraz z oceną wpływu AI na wiarygodność wyników.

Wszystkie te elementy TC są obecne w opisanych powyżej obszarach zastosowań metrologii optycznej [53, 61]. Specyfika polowych i objętościowych danych optycznych, w tym możliwość uzyskiwania ogromnych rozdzielczości przestrzenno-czasowych, wiąże się bezpośrednio z problemami związanymi z przepustowością danych, obliczaniem wyników w trybie *on-line* (np. w przypadku monitorowania procesów produkcyjnych) oraz magazynowaniem i dostępnością danych (np. w przypadku zdalnej diagnostyki medycznej). Wąskie gardła mogą powstać zarówno w fizycznym procesie pomiarowym, jak i w potoku agregacji oraz przetwarzania danych (problem *Big Data*, np. pojedynczy pomiar hodowli komórkowej o wymiarze 10 mm × 10 mm metodą tomografii fazowej generuje dane o objętości ok. 1 TB). Tak więc, aby wykorzystać pełen potencjał metrologii optycznej w TC konieczne jest rozwiązanie bardzo wielu problemów naukowo-badawczych i prawnych.

Międzynarodowym, długoterminowym celem TC, w której metrologia optyczna zajmuje ważne miejsce, jest tworzenie norm międzynarodowych w obszarze danych metrologicznych możliwych do wykorzystania maszynowego oraz umożliwienia realizacji jednostek SI w punkcie pomiaru. Normy te będą miały ogromny wpływ na implementację TC, ponieważ określą sposób tworzenia i przechowywania danych metrologicznych opisanych za pomocą metadanych. Przyspieszą innowacje, zapewniając dostęp do wiarygodnych informacji w trybie odczytu maszynowego danych podczas opracowywania produktów czy diagnostyki medycznej oraz poprzez zmniejszenie niepewności poprzez udostępnienie jednostek SI na miejscu pomiaru. Będą wspierać interdyscyplinarną współpracę niezbędną do stawienia czoła wielkim globalnym wyzwaniom, takim jak: kryzys klimatyczny czy zagrożenie bezpieczeństwa narodowego, gwarantując, że dane nadają się do przetwarzania maszynowego, mają znaną jakość i pochodzenie oraz są opisane w sposób zrozumiały dla użytkownika końcowego. Normy zwiększą zaufanie do danych, umożliwiając ich identyfikowalność oraz określą, jak niepewności będą przemieszczać się w łańcuchach przetwarzania danych, aż do momentu podejmowania decyzji. Te elementy TC są obecne we wszystkich mapach drogowych NMIs i muszą być sukcesywnie realizowane, przy uwzględnieniu zarówno norm międzynarodowych, jak i priorytetów krajowych.

3.4. Podsumowanie kierunków rozwoju metrologii optycznej

Metrologia jest nauką przekrojową, która ma strategiczne znaczenie dla Europy – bez nowoczesnej infrastruktury metrologicznej i nowych możliwości dla przemysłu oraz społeczeństwa, Europa nie będzie konkurencyjna w stosunku do innych regionów świata i nie będzie w stanie sprostać wyzwaniom społecznym, koniecznym do podjęcia w skali globalnej. Europejski program w dziedzinie metrologii jest dostosowany do szerszej europejskiej agendy i odpowiada na potrzeby państw członkowskich. Metrologia polska jest w dużym stopniu włączona w działania międzynarodowe, jednak zazwyczaj jako kraj wspomagający, a nie wiodący w wybranym obszarze ważnych działań metrologicznych.

Metrologia optyczna, jak pokazano w opracowaniu, spełnia ważną rolę właściwie we wszystkich działach gospodarki i zajmuje specjalne miejsce w dobie transformacji cyfrowej. Co ważne, odpowiednie wykorzystanie istniejącej już ekspertyzy/infrastruktury oraz planów rozwojowych i inwestycyjnych w nowych obszarach technologicznych, a także równoległe skoncentrowanie metrologicznych prac naukowo-badawczych na wskazanych obszarach, stwarza możliwość objęcia przez Polskę roli jednego z międzynarodowych liderów implementacji metrologii optycznej w:

- metrologii fotonicznych układów zintegrowanych (PIC) oraz światłowodów specjalnych, które mają dużą szansę zaistnienia jako specjalizacja polska na rynku światowym, przy czym należy podkreślić, że oczekiwany jest szybki rozwój kompetencji i infrastruktury pomiarowej w skali mikro i nano w ramach Świętokrzyskiego Kampusu Laboratoriów GUM, a także należy w dalszej perspektywie zaplanować rozszerzenie tych kompetencji na większą gamę czujników IoT oraz ich sieci,
- opracowaniu cyfrowych bliźniaków dla systemów ilościowego obrazowania fazowego 2D i 3D, a także udział w tworzeniu norm i specjalizacja w projektowaniu, wytwarzaniu i wzorcowaniu międzynarodowych wzorców dla walidacji systemów QPI oraz innych metod wykorzystywanych w mikroskopii obliczeniowej,
- metrologii (pomiarach i monitorowaniu) dużych obiektów technicznych i infrastruktury krytycznej z wykorzystaniem hierarchicznych, multiskalowych i multimodalnych systemów pomiarowych (w tym uwzględniono pomiary z dronów).

Do działań długofalowych w zakresie metrologii optycznej, ze względu na jej wagę dla gospodarki należą:

- opracowanie, przy współpracy z międzynarodowymi agendami, ale również z uwzględnieniem specyfiki polskiej, kompleksowej strategii cyfryzacji – od cyfrowych świadectw wzorcowania i wirtualnych przyrządów pomiarowych po inteligentne zarządzanie danymi badawczymi i wspierane cyfrowo procesy testowania i zatwierdzania – zadanie to, wymagające m.in. wzmocnienia kadrowego i rozszerzenia działań Zakładu Metrologii Cyfrowej w GUM, odnosi się również do innych działów metrologii, jednak ze względu na ogromną ilość danych dostarczanych przez optyczne systemy pomiarowe, w metrologii optycznej ma ono kluczowe znaczenie,
- opracowanie procedur metrologicznych dla systemów widzenia maszynowego reprezentujących całe dostępne spektrum, ze szczególnym uwzględnieniem kamer multispektralnych i hiperspektralnych oraz z wybranymi funkcjonalnościami (tzw. *smart cameras*),
- badania nad możliwościami wykorzystania sztucznej inteligencji w procesach pomiarowych i przetwarzania danych optycznych oraz wpływu AI na niepewność pomiaru, a także opracowanie mechanizmów efektywnego przygotowania, wdrażania i obsługi przepływów pracy AI w infrastrukturach heterogenicznych i rozproszonych.

Wszystkie wymienione powyżej działania będą wymagały dalszego znacznego rozszerzenia możliwości pomiarowych GUM i Kampusu Świętokrzyskiego (w tym nowej aparatury), podniesienia kompetencji kadry, wspomagania prac badawczych krajowych jednostek naukowych przez kontynuację programu „Polska Metrologia” oraz wielostronnej współpracy międzynarodowej w ramach EMN, projektów EURAMET-u oraz innych programów międzynarodowych.

Literatura

1. ISO 80000-7:2019 Quantities and units — Part 7: Light and radiation.
2. Libre Texts Chemistry, https://chem.libretexts.org/Courses/Lubbock_Christian_University/LCU%3A_CHE_1305_-_Introductory_Chemistry/04%3A_Ions/4.5%3A_The_Electromagnetic_Spectrum (dostęp: 1.09.2023 r.).
3. 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, vol. 22, no. 16, 6114.
4. Euramet, *European Metrology Network for Advanced Manufacturing*, <https://www.euramet.org/european-metrology-networks/advanced-manufacturing> (dostęp: 1.09.2023 r.).
5. Shimizu Y., Chen L.-Ch., Kim D.W., Chen X., Li X., Matsukuma H., *An insight into optical metrology in manufacturing*, „Measurement Science and Technology” 2021, vol. 32, no. 4, 042003.
6. Smith M.L., Smith L.N., Hansen M.F., *The quiet revolution in machine vision – a state-of-the-art survey paper, including historical review, perspectives, and future directions*, „Computers in Industry” 2021, vol. 130, 103472.
7. Patorski K., Kujawińska M., Sałbut L., *Interferometria laserowa z automatyczną analizą obrazu*, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
8. Osten W., Reingand N. (eds.), *Optical Imaging and Metrology*, Wiley-VCH, Weinheim 2012.
9. ISO 10110 Optics and photonics — Preparation of drawings for optical elements and systems.
10. ISO 14999 Optics and photonics — Interferometric measurement of optical elements and optical systems.

11. ISO/TR 16743:2013 Optics and photonics – Wavefront sensors for characterising optical systems and optical components.
12. ISO 17411:2022 Optics and photonics – Optical materials and components – Test method for homogeneity of optical glasses by laser interferometry.
13. ISO/TR 14997 Optics and photonics – Test surface imperfections of optical elements.
14. PN-EN ISO 14880-2:2007 Optyka i fotonika – Matryce z mikrosoczewkami – Część 2: Metody badań aberracji czoła fali.
15. ISO 12233 Photography – Electronic still picture imaging – Resolution and spatial frequency responses.
16. ISO/TR 17321-2:2012 Graphic technology and photography – Colour characterization of digital still cameras (DSCs) – Part 2: Considerations for determining scene analysis transforms.
17. ISO 10360-13:2021 Geometrical product specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) – Part 13: Optical 3D CMS.
18. ISO/IEC 23488:2022 Information technology – Computer graphics, image processing and environment data representation – Object/environmental representation for image-based rendering in virtual/mixed and augmented reality (VR/MAR).
19. ISO/IEC JTC 1/SC 41 Working Documents, https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:30:10216433564091:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:20486,25 (dostęp: 1.09.2023 r.).
20. ISO 16063-11 Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry.
21. Mendels D.-A., Hack E., Siegmann P., Patterson E.A., Salbut L., Kujawińska M., et al., *Round robin exercise for optical strain measurement*, [in:] C. Pappalettere, *Proceedings of the 12th International Conference On Experimental Mechanics, Advances in Experimental Mechanics*, McGrawHill, Milano 2004, s.695–698.
22. Patterson E.A., Hack E., Brailly P., Burguete R.L., Saleem Q., Siebert T., et al., *Calibration and evaluation of optical systems for full-field strain measurement*, „Optics and Lasers in Engineering” 2007, vol. 45, no. 5, s. 550–564.
23. Jones E.M.C., Iadicola M.A. (eds.), *A Good practices guide for digital image correlation*, International Digital Image Correlation Society, 2018.

24. ISO 10934:2020 Microscopes Vocabulary for light microscopy.
25. PN-EN ISO 25178-604:2013-12 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS): struktura geometryczna powierzchni: przestrzenna – Część 604: Charakterystyki nominalne przyrządów bezstykowych (interferometrów skaningowych koherentnych).
26. ISO/IEC 30141:2018 Internet of Things (IoT) – Reference Architecture.
27. PN-EN ISO 25178-607:2019-07 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS): struktura geometryczna powierzchni: przestrzenna – Część 607: Charakterystyki nominalne przyrządów bezstykowych (mikroskopów konfokalnych).
28. PN-EN ISO 17511:2021-09 (wersja angielska) Wyroby medyczne do diagnostyki in vitro – Wymagania dotyczące ustalania spójności pomiarowej wartości wyznaczonych dla kalibratorów, materiałów do kontroli poprawności pomiaru oraz próbek pochodzących od ludzi.
29. de Groot P., *Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography*, „Advances in Optics and Photonics” 2015, vol. 7, no. 1, s. 1–65.
30. Emery Y., Colomb T., Cuhe E., *Metrology applications using off-axis digital holography microscopy*, „Journal of Physics: Photonics” 2021, vol. 3, no. 3, 034016.
31. Pluta M., *Mikroskopia optyczna*, PWN, Warszawa 1982.
32. Pluta M. (red.), *Holografia optyczna*, PWN, Warszawa 1980.
33. Patorski K., *Handbook of the moire fringe technique*, Elsevier, Amsterdam 1993.
34. Sutton M.A., Orteu J.J., Schreier H., *Image correlation for shape, motion and deformation measurements*, Springer, New York 2009.
35. Thienpont H., Van Erps J., Kujawinska M., Mohr J., *The European Network of Excellence in Micro-Optics (NEMO)*, [in:] *Frontiers in Optics, OSA Technical Digest (CD)*, Optica Publishing Group, 2006, paper OFMD1.
36. Wojtkowski M., *Obrazowanie za pomocą tomografii i optycznej OCT z detekcją fourierowską*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń 2009.
37. Park Y, Depeursinge C., Popescu G., *Quantitative phase imaging in biomedicine*, „Nature Photonics” 2018, vol. 12, s. 578–589.

38. Balasubramani V., Kus A., Tu H.-Y., Cheng C.-J., Baczewska M., Krauze W., Kujawinska M., *Holographic tomography: techniques and biomedical applications* [Invited], „Applied Optics”, 2021, vol. 60, no. 10, B65–B80.
39. Ziemczonok M., Kuś A., Kujawińska M., *Optical diffraction tomography meets metrology—Measurement accuracy on cellular and subcellular level*, „Measurement” 2022, vol. 195, 111106.
40. Wróbel M.S., Popov A.P., Bykov A.V., Tuchin V.V., Jędrzejewska-Szczerska M., *Nanoparticle-free tissue-mimicking phantoms with intrinsic scattering*, „Biomedical Optics Express” 2016, vol. 7, no. 6, s. 2088–2094.
41. Len Y.L., Gefen T., Retzker A., Kołodyński J., *Quantum metrology with imperfect measurements*, „Nature Communications” 2022, vol. 13, 6971.
42. The gateway to Europe’s integrated metrology community. EURAMET 2030 Strategy, Version 2.0 (06/2021), <https://www.euramet.org/about-euramet/strategy-2030> (dostęp: 21.04.2024 r.).
43. Metrology for a stronger Europe. A European Metrology Agenda for the next decade, EURAMET Draft strategy paper, Version 1.0 (02/2024), <https://www.euramet.org/about-euramet/metrology-for-a-stronger-europe-white-paper> (dostęp: 21.04.2024 r.).
44. New Horizons. Securing Europe’s strategic autonomy through Photonics. Multi-annual Strategic Research and innovation Agenda of the Horizon Europe Photonics Partnership, <https://www.flipsnack.com/photonics21/photonics21-strategic-research-and-innovation-agenda-2023-2030/full-view.html> (dostęp: 21.04.2024 r.).
45. International Roadmap for Devices and System., 2022 Edition. Metrology, https://irds.ieee.org/images/files/pdf/2022/2022IRDS_MET.pdf (dostęp: 21.04.2024 r.).
46. European Chips Act: The Chips for Europe Initiative, <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/factpages/european-chips-act-chips-europe-initiative> (dostęp: 21.04.2024 r.).
47. Chips for America – Metrology Program, <https://www.nist.gov/chips/research-development-programs/metrology-program> (dostęp: 21.04.2024 r.).

48. NPL Metrology Research Roadmap, <https://www.npl.co.uk/getattachment/resources/Metrology-Research-Roadmap/NPL-Metrology-Research-Roadmaps-1-Sept-2022-pdf.pdf.aspx?lang=en-GB> (dostęp: 21.04.2024 r.).
49. Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) – Quantum Technology Competence Center (QTZ), <https://www.ptb.de/cms/nc/en/ptb/competence-centers/qtz.html> (dostęp: 21.04.2024 r.).
50. Luo W., Cao L., Shi Y., Wan L., Zhang H., Li S., et al., *Recent progress in quantum photonic chips for quantum communication and internet*, „Light: Science & Applications” 2023, vol. 12, no. 1, s. 175.
51. FAIR Principles, <https://www.go-fair.org/fair-principles/> (dostęp: 21.04.2024 r.).
52. Hippolyte J.-L., Romanchikova M., Bevilacqua M., Duncan P., Hunt S.E., Grasso Toro F., et al., *Using ontologies to create machine-actionable datasets: two case studies*, „Metrology” 2023, vol. 3, no. 1, s. 65–80.
53. Catalucci S., Thompson A., Piano S., Branson III D.T., Leach R., *Optical metrology for digital manufacturing: a review*, „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology” 2022, vol. 120, s. 4271–4290.
54. EMN for Laboratory Medicine, <https://www.euramet.org/european-metrology-networks/laboratory-medicine> (dostęp: 21.04.2024 r.).
55. *Putting in vivo cellular imaging at your fingertips. ZEISS CONVIVO*, <https://www.zeiss.com/meditec/en/products/confocal-endomicroscopes.html> (dostęp: 21.04.2024 r.).
56. Purcell W., Neubauer T., *Digital twins in agriculture: a state-of-the-art review*, „Smart Agricultural Technology” 2023, vol. 3, 100094.
57. Markets and Markets, *Smart Cities Market by Focus Area, Smart Transportation, Smart Buildings, Smart Utilities, Smart Citizen Services (Public Safety, Smart Healthcare, Smart Education, Smart Street Lighting, and E-Governance) and Region – Global Forecast to 2028*, <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/smart-cities-market-542.html> (dostęp: 21.04.2024 r.).
58. Zuo C., Qian J., Feng S., Yin W., Li Y., Fan P., et al., *Deep learning in optical metrology: a review*, „Light: Science & Applications” 2022, vol. 11, 39.

59. Stowarzyszenie Elektryków Polskich, Polski Komitet Optoelektroniki, *Fotonika.pl*- w którą stronę? Stan obecny i perspektywy rozwoju fotoniki w Polsce, IV Kongres Elektryki Polskiej, <http://pkopto.ise.pw.edu.pl/sites/pkopto.ise.pw.edu.pl/files/Fotonika.pl%20-%20materia%C5%82y%20do%20dyskusji%20programowej%20IVKEP.pdf> (dostęp: 21.04.2024 r.).
60. Raport/Report 2023. Energetyka wiatrowa w Polsce/Wind energy in Poland, https://windenergy-tpa.pl/wp-content/uploads/sites/25/2024/05/TPA-Poland_Baker-Tilly-TPA_Energetyka-wiatrowa-w-Polsce_2023_2.pdf (dostęp: 30.04.2024).
61. Prause L., Hackfort S., Lindgren M., *Digitalization and the third food regime*, „Agriculture and Human Values” 2021, vol. 38, s. 641–655.
62. Peladarinos N., Piromalis D., Cheimaras V., Tserepas E., Munteanu R.A., Papageorgas P., *Enhancing smart agriculture by implementing digital twins: A Comprehensive Review*, „Sensors” 2023, vol. 23, no. 16, 7128.

W rozdziale przedstawiono diagnozę stanu metrologii optycznej w Polsce oraz opisano strategiczne kierunki jej dalszego rozwoju. Przeprowadzono analizę aktualnych wyzwań, potrzeb i możliwości w tym istotnym dziale. W pierwszej części określono obszar merytoryczny, będący przedmiotem opracowania, a w kolejnej zaprezentowano charakterystykę ośrodków akademickich i instytutów badawczych zajmujących się metrologią optyczną. Omówiono bardzo szczegółowo wyposażenie w optyczne systemy pomiarowe, w tym także w zakresie mikro- i nanotechnologii, oraz realizowane projekty badawcze. Dodatkowo zaprezentowano ogólnopolskie i międzynarodowe inicjatywy aparaturowe i organizacyjne w analizowanym zakresie. Następnie skoncentrowano się na przyszłości metrologii optycznej, nakreślając kierunki jej rozwoju, w tym odnosząc się do współczesnych i światowych trendów rozwojowych, co jest niezwykle ważne. Uwzględniono priorytetowe obszary, takie jak: przemysł, energia, zdrowie i rolnictwo, bezpieczeństwo, obronność i technologie kosmiczne oraz transformacja cyfrowa. Stwierdzono przede wszystkim, że metrologia optyczna spełnia ważną rolę właściwie we wszystkich działach gospodarki i zajmuje specjalne miejsce w dobie transformacji cyfrowej. Odpowiednie wykorzystanie istniejącej już infrastruktury oraz wzięcie pod uwagę planów rozwojowych i inwestycyjnych w nowych obszarach technologicznych, a także równoległe skoncentrowanie metrologicznych prac naukowo-badawczych na kluczowych obszarach, stwarza możliwość objęcia przez Polskę roli jednego z międzynarodowych liderów implementacji metrologii optycznej. Podkreślono również znaczenie metrologii optycznej dla rozwoju polskiej gospodarki i nauki. Jej rozwój umożliwi wzmocnienie pozycji Polski w globalnym ekosystemie technik optycznych, przyczyniając się do wzrostu innowacyjności, poprawy jakości pomiarów oraz wsparcia sektorów przemysłowych.

Słowa kluczowe: metrologia optyczna, „Polska Metrologia”, diagnoza stanu metrologii, strategiczne kierunki rozwoju metrologii

CZĘŚĆ SIÓDMA

Metrologia wielkości geometrycznych



Prof. dr hab. inż. Adam Woźniak

ORCID: 0000-0002-3293-898X

Politechnika Warszawska

ROR: <https://ror.org/00y0xnp53>

Profesor nauk technicznych i wykładowca akademicki. Specjalizuje się w metrologii wielkości geometrycznych, głównie w zakresie opracowania algorytmów, modelowania i badania dokładności szeroko rozumianych systemów pomiarowych na potrzeby przemysłu motoryzacyjnego, lotniczego, energetycznego oraz precyzyjnego. Jest autorem dwóch monografii oraz ponad 170 publikacji, w tym kilkudziesięciu w uznanych prestiżowych czasopismach naukowych.

Prowadził kilkanaście projektów badawczych finansowanych m.in. ze środków: Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz Fundacji Nauki Polskiej. Uczestniczył w badaniach międzynarodowych zespołów badawczych w ramach grantów Collaborative Research and Development Grants NSERC (Kanada). Wypromował sześciu doktorów nauk technicznych, w tym również we współpracy międzynarodowej w programie Thesis co-supervision. Promotor kilkudziesięciu prac magisterskich i inżynierskich. Recenzent w postępowaniach habilitacyjnych, doktorskich, a także w wielu czasopismach naukowych.

Członek kolegiów redakcyjnych i rad naukowych. W latach 2012–2020 pełnił funkcję dyrektora Instytutu Metrologii i Inżynierii Biomedycznej, a potem dziekana Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej (PW). Obecnie jest prorektorem ds. rozwoju PW. W latach 2005–2006 pracował jako visiting professor w Polytechnique de Montréal w Kanadzie. W okresie 2008–2011 był członkiem Rady Normalizacyjnej II kadencji, a w 2017 r. został powołany przez Ministra Rozwoju do Rady Metrologii I kadencji (2017–2022). Aktualnie jest przewodniczącym Rady Metrologii II kadencji (2022–2027). Jest członkiem prezydium Komisji Ewaluacji Nauki w kadencji 2023–2027, American Society for Precision Engineering, Rady Naukowej TVP Nauka oraz Towarzystwa Naukowego Warszawskiego. Za osiągnięcia naukowe otrzymał m.in. nagrodę Prezesa Rady Ministrów RP. Odznaczony Srebrnym Krzyżem Zasługi za działalność na rzecz rozwoju nauki.

Określenie obszaru merytorycznego metrologii wielkości geometrycznych

Metrologia wielkości geometrycznych jest elementem metrologii stosowanej i zajmuje się szeroko rozumianymi pomiarami grupy wielkości używanych do liczbowego opisu cech geometrycznych elementów materialnych. Do tej grupy wielkości z pewnością zaliczyć należy: długość (wymiary liniowe), kąt (wymiary katowe), odchyłki kształtu, kierunku i położenia, mikro- i makrogeometrię powierzchni (chropowatość i falistość) oraz wady struktury geometrycznej materiału (pory, pęknięcia, wżery, zużycie). Wielkości te występują w bardzo wielu obszarach działalności człowieka, co sprawia, że metrologia wielkości geometrycznych ma charakter uniwersalny i jest szeroko stosowana.

W dobie dynamicznego rozwoju gospodarczego metrologia wielkości geometrycznych pełni bardzo ważną rolę w zakresie potrzeb dotyczących kontroli jakości przemysłowych procesów wytwórczych. Obecnie zautomatyzowane przyrządy stosowane do pomiarów wielkości geometrycznych pozwalają na szybkie wyznaczanie wymiarów oraz odchyłek kształtu, kierunku i położenia części maszyn o często skomplikowanej i przestrzennej konstrukcji. Rosnące wymagania dotyczące jakości oraz niezawodności masowo produkowanych urządzeń technicznych wymagają ciągły rozwój metod pomiarowych służących do weryfikacji poprawności ich wykonania. Dzięki odpowiedniej kontroli wymiarów oraz odchyłek kształtu, kierunku i położenia części urządzeń produkowanych w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym, AGD i w każdym innym, można uzyskać dobrą współpracę tych elementów i wysoką niezawodność wytworzonych urządzeń.

W ramach obszaru metrologii wielkości geometrycznych podejmowane są również czynności związane z: gospodarką przyrządami pomiarowymi (ocena i utrzymanie odpowiedniej niepewności pomiaru), rozwijaniem nowych, zoptymalizowanych metod i procedur pomiarowych,

statystyczną analizą wyników pomiaru oraz tolerowaniem i pasowaniem części maszyn i urządzeń. Zbiór wymagań określających geometrię przedmiotu lub zespołu zmontowanych przedmiotów określa specyfikacja geometrii przedmiotu (ang. *geometrical product specification* – GPS). Są to wymagania służące do kompleksowego opisu przedmiotu z uwzględnieniem wymiarów zewnętrznych i wewnętrznych, tolerancji geometrycznych oraz geometrycznych wymagań dotyczących powierzchni.

Metrologia wielkości geometrycznych zapewnia ujednolicające i koncepcyjne ramy do opisu geometrycznego wytwarzanych przedmiotów, pozwala na uogólnienie i ocenę spełnienia warunków tolerancji wymiarowych oraz zapewnia środki do klasyfikacji, kategoryzacji i kwantyfikacji wytwarzanych obiektów. Pomiary wielkości geometrycznych obejmują kilka obszarów, wśród których najczęściej występują pomiary długości rozumiane obecnie jako odległość dwóch elementów geometrycznych, takich jak: punkt, prosta, płaszczyzna lub profil mierzonego przedmiotu oraz kąta definiowanego również przez dwa elementy geometryczne w postaci prostych lub płaszczyzn. Pozostałe pomiary geometryczne dotyczą głównie odchyłek kształtu (płaskości, okrągłości, walcowości, prostoliniowości) oraz pomiarów chropowatości powierzchni.

W pomiarach wielkości geometrycznych wykorzystywane są różne środki pomiarowe określane jako sprzęt pomiarowy, do których zalicza się w szczególności: wzorce, przyrządy pomiarowe, sprawdziany, przetworniki pomiarowe i pomocnicze narzędzia pomiarowe, które zapewniają właściwe warunki pomiaru (np. termiczne, ochrony przed wstrząsami) oraz mocują elementy pomiarowe (stoły pomiarowe, uchwyty, pryzmy, statywy).

Podstawowymi wzorcami w metrologii wielkości geometrycznych są wzorce długości i kąta, dlatego też metrologia wielkości geometrycznych nazywana jest powszechnie metrologią długości i kąta.

2.1. Wzorce państwowe w metrologii wielkości geometrycznych

Główny Urząd Miar (GUM) jako NMI (ang. *National Metrology Institute*) utrzymuje państwowy wzorzec długości, który jest realizowany za pomocą lasera He-Ne stabilizowanego jodem oraz syntezerą częstotliwości optycznych. Stanowisko pomiarowe umożliwia bezpośrednie odniesienie generowanego sygnału do częstotliwości wzorcowego zegara cezowego, a przez to bezpośrednią, zgodną z definicją i zaleceniami Międzynarodowego Komitetu Miar (Comité International des Poids et Mesures – CIPM) realizację jednostki długości. Stanowisko służy do zapewnienia spójności pomiarowej w dziedzinie pomiarów długości poprzez wzorcowanie stabilizowanych laserów metrologicznych i głowic interferometrów laserowych w zakresie długości fali promieniowania (525–1070) nm, przy wykorzystaniu metody zdudnienia optycznego, z niepewnością rozszerzoną względną $U_w = 10^{-13}$ [1–4].

Wysoka stabilność lasera He-Ne (tzw. fr. *mise en pratique*) stabilizowanego jodem (510^{11}) oraz udział GUM w porównaniach międzylaboratoryjnych zapewnia powiązanie państwowego wzorca jednostki długości z międzynarodowym systemem miar, co gwarantuje wysoki poziom realizacji i zachowania spójności pomiarowej przez przekazywanie jednostki miary długości na wzorce niższego rzędu. Przekazywanie jednostki miary od wzorca państwowego do wzorców niższego rzędu jest realizowane w szerokim zakresie, począwszy od interferometrów aż do przyrządów pomiarowych użytkowych, stosowanych i zapewniających spójność pomiarową w pracy laboratoriów akredytowanych, okręgowych urzędów miar i ich wydziałów zamiejscowych, laboratoriów wojskowych, policji, oddziałów inspekcji, instytutów naukowych oraz przemysłowych i innych.

Utrzymywany przez GUM wzorzec kąta płaskiego jest realizowany za pomocą precyzyjnego stołu obrotowego z łożyskowaniem powietrznym oraz autokolimatora fotoelektrycznego bardzo wysokiej rozdzielczości (0,005"). Odtwarzanie jednostki miary jest wykonywane poprzez podział kąta pełnego. Na stanowisku pomiarowym wzorcowane są pryzmy wielościenne oraz płytki kątowe przywieralne, z niepewnością rozszerzoną, przy $k = 2$, ok. 0,1" ($U \geq 0,07''$). Pryzmy wielościenne stosowane są do wzorcowania złożonych przyrządów pomiarowych, takich jak: goniometry, stoły obrotowe i głowice podziałowe.

Odtwarzanie jednostki kąta płaskiego w zakresie małych kątów jest realizowane za pomocą generatora małych kątów działającego na zasadzie liniału tangensowego poprzez wyznaczanie stosunku dwóch długości. Podstawowym elementem generatora jest liniał powierzchniowy o znanej długości oparty na dwóch podporach – stałej i ruchomej. Wielkość przemieszczenia podpory ruchomej liniału mierzona jest za pomocą interferometru laserowego. Zakres pomiarowy generatora małych kątów wynosi od 0' do 40'. Za pomocą generatora małych kątów możliwe jest wzorcowanie autokolimatorów i poziomicy elektronicznych dużej rozdzielczości, podczas którego wyznaczane są błędy wskazań z niepewnością rozszerzoną U rzędu 0,3" ($k = 2$) [2–4].

2.2. Charakterystyka stanu metrologii wielkości geometrycznych w zależności od rodzaju i skali wielkości mierzonej

Powiązanie wzorców pomiarowych GUM z międzynarodowym systemem miar jest zapewnione poprzez jego współpracę z instytucjami metrologicznymi w ramach Konwencji Metrycznej i Europejskiego Stowarzyszenia Krajowych Instytucji Metrologicznych (ang. European Association of National Metrology Institutes – EURAMET). Komitet Techniczny ds. Długości (ang. Technical Committee for Length – TC-L) Międzynarodowego Biura Miar (fr. Bureau International des Poids et Mesures – BIPM) wspiera natomiast przemysł i naukowców poprzez koordynację i dalszy rozwój pomiarów w obszarach związanych z jednostką długości.

Aktualnie GUM oferuje ok. 150 różnych usług wzorcowania w zakresie pomiarów wielkości geometrycznych. Większość z nich posiada

wpis oferowanej zdolności pomiarowej (ang. *calibration and measurement capability* – CMC), który opublikowany jest w bazie danych porównań kluczowych (ang. *key comparison database* – KCDB) BIPM w ramach porozumienia o „Wzajemnym uznawaniu państwowych wzorców jednostek miar oraz świadectw wzorcowania i świadectw pomiarów wydawanych przez Krajowe Instytucje Metrologiczne” (ang. *The CIPM Mutual Recognition Arrangement* – CIPM MRA) [5]. Baza ta obejmuje m.in.: możliwości wzorcowań i pomiarów CMC, które zostały zadeklarowane przez Krajowe Instytucje Metrologiczne (ang. *National Metrology Institute* – NMI) albo Instytucje Desygnowane (ang. *Designated Institutes* – DI), będące depozytariuszami wzorców państwowych.

Oprócz Głównego Urzędu Miar w kraju pracuje ok. 50 laboratoriów wzorcujących, które posiadają aktywną akredytację Polskiego Centrum Akredytacji (PCA) i świadczą usługi w zakresie pomiarów długości i kąta, w tym geometrii powierzchni i pomiarów współrzędnościowych [6].

W Polsce w ramach struktur laboratoriów metrologii wojskowej utrzymywane są wzorce odniesienia w zakresie metrologii wielkości geometrycznych oraz realizowane są usługi wzorcowania i sprawdzania przyrządów pomiarowych w celu zapewnienia jednolitości miar i dokładności pomiarów związanych z obronnością. Usługi te są wykonywane przez wojskowe ośrodki metrologii oraz upoważnione laboratoria metrologiczne, na podstawie upoważnienia Wojskowego Centrum Metrologii (WCM) [7].

Prezentacja realizowanych usług przez różne podmioty nie jest łatwa do porównania pod względem wzorcowanych obiektów, jak i mierzonych parametrów, a tym bardziej deklarowanej zdolności pomiarowej ze względu na niejednolite sposoby kategoryzowania usług w zakresie pomiarów wielkości geometrycznych.

Klasyfikacja CMC w dziedzinie długości została kompleksowo zebrana i opracowana w ramach Komitetu Doradczego ds. Długości BIPM (ang. *Consultative Committee for Length* – CCL) przy Grupie Roboczej CIPM MRA (ang. *Working Group on the Mutual Recognition Arrangement* – WG-MRA) w postaci *CCL Length Services Classification* (Dim-VIM) [8]. Na podstawie tej klasyfikacji podawany jest zakres usług realizowanych przez GUM.

Trudna do oszacowania jest pozostała liczba podmiotów zapewniających spójność pomiarową w zakresie pomiarów wielkości

geometrycznych, takich jak: ośrodki badawcze, uczelnie wyższe, laboratoria wewnętrzne w przedsiębiorstwach czy laboratoria nieakredytowane. Ze względu na uniwersalny charakter metrologii wielkości geometrycznych oraz jej wagę w zakresie oceny jakości wszystkich materialnych elementów stosowanych szczególnie w inżynierii mechanicznej, należy uznać, że każda uczelnia techniczna, instytut badawczy oraz zakład przemysłowy posiadają, w zależności od potrzeb, mniej lub bardziej zaawansowane instrumentarium pomiarowe realizujące zadania pomiarowe w zakresie długości i kąta.

2.2.1. Pomiary długości (wymiarów)

Metrologia wielkości geometrycznych ma charakter uniwersalny i obejmuje szeroki zakres zastosowań. Analizując metrologię wymiarową pod względem różnej skali długości, można zauważyć, iż najczęściej wykonywane pomiary nie dotyczą pomiarów w skali nano i makro, lecz mikro oraz mezo i są wykonywane za pomocą podstawowych narzędzi pomiarowych.

W klasyfikacji DimVIM została wyróżniona grupa narzędzi ręcznych, do której zaliczane są przyrządy czujnikowe, mikrometryczne, suwmiarkowe, przeznaczone do pomiaru wymiarów zewnętrznych, wewnętrznych, głębokości czy przemieszczenia. O powszechności stosowania tych przyrządów pomiarowych świadczy liczba wzorcujących je laboratoriów akredytowanych. Suwmiarki pojawiają się w ok. 60 % zakresów akredytacji podmiotów świadczących usługi wzorcowania przyrządów stosowanych w pomiarach długości. Nieco rzadziej, bo w ok. połowie zakresów akredytacji występują obiekty w postaci: przyrządów czujnikowych i mikrometrycznych. Podobna liczba laboratoriów świadczy usługi związane z wzorcowaniem głębokościomierzy zarówno mikrometrycznych, jak i czujnikowych oraz średnicówek mikrometrycznych i czujnikowych. Warto również dodać, iż nie do oszacowania jest liczba innych podmiotów realizujących podobne usługi poza systemem akredytacji lub we własnym zakresie w ramach kontroli wewnętrznej, gdyż równie liczna, co grupa laboratoriów wzorcujących suwmiarki, jest grupa wykonująca usługi wzorcowania płytek wzorcowych. Fakt ten może potwierdzać zapotrzebowanie rynku na akredytowane usługi wzorców końcowych, stosowanych później do

realizacji wewnętrznych procedur pomiarowych, w ramach nadzoru nad wyposażeniem metrologicznym.

W zakresie pomiarów liniowych szeroki zakres wzorcowań płytek wzorcowych (0,5–3000) mm oferuje GUM, w ramach usług, dla których posiada wpis CMC opublikowany w bazie danych KCDB BIPM. Oprócz płytek wzorcowych wykonywane są tam także usługi wzorcowania wzorców schodkowych, kul i pierścieni wzorcowych oraz wzorców nastawczych, przy czym wzorcowanie pierścieni i wzorców nastawczych do wymiarów zewnętrznych oferowane jest także w ramach usług objętych systemem akredytacji [3, 4]. Oprócz GUM tylko nieliczne laboratoria wzorcują komparatory płytek wzorcowych. Analizując zakresy akredytacji laboratoriów wzorcujących oraz zakresy usług realizowanych przez GUM, wyraźnie można zauważyć, iż wraz ze stopniem zaawansowania wyposażenia pomiarowego i dokładności maleje liczba podmiotów świadczących usługi wzorcowania, stąd nie dziwi fakt, iż np. tylko cztery laboratoria akredytowane wzorcują dalmierze, a laserowe systemy interferometryczne wyłącznie GUM.

Ciekawym przykładem pomiarów długości w medycynie jest opracowana na Politechnice Warszawskiej nowa metoda precyzyjnego pomiaru wzrastania dzieci w krótkich interwałach czasowych. Opracowany przyrząd pomiarowy umożliwia pomiary obserwowanego przyrostu podudzia dziecka w odstępach tygodniowych.

2.2.2. Pomiary kąta

Naturalnym i łatwym do zrealizowania wzorcem kąta jest kąt pełny zawierający 360° lub 2π radianów. Pozostałe wzorce innych wartości kąta można uzyskać poprzez podział kąta pełnego i zrealizować np. za pomocą znaczników naniesionych na obwodzie koła lub walca. Innym sposobem jest realizacja wzorca kąta poprzez odpowiednio nachylone względem siebie płaszczyzny o pomijalnie małych odchyłkach płaskości.

W ciągu ostatnich kilku dekad obserwowano rosnące wykorzystanie technologii enkoderów do pomiaru kąta, podczas gdy historycznie ważne artefakty, takie jak płytki kątowe, prawie całkowicie zniknęły. Weryfikacja enkoderów jest jednak krytycznie zależna od osiowania części podczas wzorcowania, które często jest wstępnie ustawione

przez producenta. W związku z tym niepewności związane z artefaktami prawdopodobnie zdominowałyby takie sytuacje.

W GUM znajduje się stanowisko z generatorem małych kątów i jest ono wykorzystywane do wzorcowania poziomice elektronicznych oraz autokolimatorów [2–4]. Należy dodać, iż precyzyjne poziomice elektroniczne i autokolimatory fotoelektryczne są szeroko stosowane np.: do pomiarów odchyłek kształtu dużych powierzchni pomiarowych oraz do precyzyjnego kąтового pozycjonowania elementów w procesach produkcyjnych, montażowych i pomiarowych.

2.2.3. Pomiary odchyłek kształtu

Pomiary odchyłek od okrągłości obejmują pomiary okrągłości powierzchni sferycznych i walcowych w zakresie: odchyłek od okrągłości kul (sfer), walców wewnętrznych (pierścieni), walców zewnętrznych (wałków i tłoczków) oraz wzorców powiększenia (w postaci wałka ze ścięciem) i są realizowane za pomocą okrągłościomierza. Oferowana zdolność pomiarowa CMC na wzorcowanie takich obiektów w GUM jest potwierdzona w KCDB BIPM. Poza tym GUM dysponuje zestawem wzorców materialnych służących do pomiaru odchyłek od okrągłości. W jego skład wchodzi: wzorzec sferyczny w postaci szklanej półkuli, wzorce okrągłości w postaci wałków ze ścięciem, wzorzec walca i walca pochylonego oraz płytki wzorcowe wraz z płytkami interferencyjnymi [2–4].

W kraju usługi pomiaru odchyłek od okrągłości oferuje kilka laboratoriów badawczych i tylko jedno wzorcujące. Pomiary wykonywane poza GUM w tym obszarze realizowane są za pomocą maszyny współrzędnościowej, zatem dotyczą odchyłek okrągłości o większych wartościach.

Pomiary płaskości wykonywane przez GUM są związane głównie z wzorcowaniem płytek płaskorównoległych za pomocą interferometru laserowego z laserem He-Ne. Służy on do pomiaru odchyłek od płaskości nie tylko wzorców płaskości, ale także innych powierzchni optycznych i precyzyjnych o wielkości ograniczonej przez okrąg o średnicy 150 mm, dla których odchyłka od płaskości nie przekracza $5,7\text{ }\mu\text{m}$, np. powierzchni pryzm wielościennych, pryzmatów, płytek wzorcowych, płytek krzemowych, wzorców płaskości do mikroskopów elektronicznych itp. Zapewnienie spójności pomiarowej dla materialnego wzorca płaskości stosowanego przy pomiarach interferometrem zapewnia

wzorcowanie w Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). Inną grupę usług stanowią pomiary płaskości płyt pomiarowych wykonywane za pomocą autokolimatora używanego również przy wyznaczaniu błędów prostoliniowości. Najszerszy zakres usług w zakresie pomiaru płaskości płyt pomiarowych wykonywany jest za pomocą maszyny współrzędnościowej. W tej grupie usług jedynie spójność pomiarowa dla pomiarów wykonywanych za pomocą autokolimatora została potwierdzona w ramach porównań kluczowych. Płaskorównoległe płytki interferencyjne poza GUM w kraju wzorcują przede wszystkim Okręgowe Urzędy Miar oraz nieliczne akredytowane laboratoria wzorcujące. Do wyznaczania błędów płaskości laboratoria stosują także współrzędnościowe maszyny pomiarowe oraz poziomice różnicowe.

W zakresie pomiaru prostoliniowości GUM zapewnia wzorcowanie walcowych wzorców prostoliniowości oraz liniałów krawędziowych. Liniały krawędziowe wzorcują także nieliczne laboratoria akredytowane, podobnie jak liniały powierzchniowe, wzorcowane zarówno w zakresie prostoliniowości, jak i płaskości.

Znacznie częściej niż wzorcowanie wzorców stosowanych do oceny błędów kształtu, przeprowadzane są badania elementów konstrukcyjnych wykonanych z różnych materiałów (stopów metali, tworzyw sztucznych, kompozytów, spieków czy ceramiki). Odchyłki kształtu dla tych obiektów oceniane są przez laboratoria badawcze za pomocą współrzędnościowych maszyn pomiarowych.

2.2.4. Pomiary tekstury i chropowatości powierzchni

Pomiary chropowatości powierzchni są stosowane najczęściej w procesie kontroli jakości obróbki mechanicznej, a zapotrzebowanie na usługi związane z oceną topografii powierzchni dotyczy głównie przemysłu związanego z mechaniką precyzyjną. Nierzadko również pomiary tego rodzaju wykonywane są w innych, nieco mniej oczywistych obszarach, jak np. medycyna, w szczególności w procesach związanych z wytwarzaniem implantów.

GUM dysponuje stanowiskiem wyposażonym w profilometr stykowy, które jest stosowane do utrzymania spójności pomiarowej w zakresie pomiarów topografii powierzchni. Ponadto laboratorium posiada zestaw wzorców materialnych służących do pomiaru parametrów struktury geometrycznej powierzchni (wzorców chropowatości),

określanych jako wzorce typu A, B, C, D i E (zgodnie z PN-EN ISO 5436-1 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa – Wzorce – Część 1: Wzorce materialne), płytki wzorcowe wraz z płytkami interferencyjnymi oraz wzorzec kreskowy.

Wzorcowania wzorców głębokości nierówności lub wysokości schodka (wzorców typu A wg PN-EN ISO 5436-1 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa – Wzorce – Część 1: Wzorce materialne), wzorców stanu ostrza (np. wzorców chropowatości należących do grupy B wg PN-EN ISO 5436-1 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa – Wzorce – Część 1: Wzorce materialne) w zakresie wartości parametru $d \leq 1$ mm oraz wzorców geometrycznych (wzorców typu C1, C2, C3 i C4 (inaczej zwanych wzorcami odstępów) wg PN-EN ISO 5436-1 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa – Wzorce – Część 1: Wzorce materialne) są realizowane w GUM za pomocą mikrointerferometru oraz kamery TV CCD połączonej z komputerem wraz z systemem akwizycji obrazów. Należy dodać, iż GUM brał udział w porównaniach kluczowych związanych z wzorcowaniem wzorców w każdej z grup – wzorców wysokości schodka, wzorców odstępów, okrągłości [wzorców typu D wg PN-EN ISO 5436-1 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa – Wzorce – Część 1: Wzorce materialne], jak i wzorców współrzędnościowych (wzorców typu E wg PN-EN ISO 5436-1 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa – Wzorce – Część 1: Wzorce materialne) [2–4, 9].

Warto zauważyć, że korzystanie z usług wzorcowania wyposażenia pomiarowego w tym zakresie nie jest powszechne, o czym może świadczyć liczba akredytowanych w tym obszarze laboratoriów. Zaledwie bowiem cztery laboratoria akredytowane oferują usługi wzorcowania profilometrów stykowych, dwa wzorców chropowatości, a tylko jedno porównawczych wzorców chropowatości [6]. Stan ten można tłumaczyć wyposażeniem zarówno profilometrów stykowych, jak i optycznych, zwłaszcza jeśli są to stanowiska pomiarowe wysokiej klasy, w przewidziane przez producenta wzorce kalibracyjne. Jednakże trudna do oceny jest powszechność wykonywania okresowych

kontroli i regularność przeprowadzania oceny kondycji metrologicznej zarówno profilometrów, jak i stosowanych wzorców chropowatości. Nie można także wykluczyć, iż podmioty stosujące tego rodzaju wyposażenie pomiarowe korzystają z usług wzorcowania poza granicami kraju, np. w laboratoriach producenta.

Częściej niż wzorcowanie profilometrów i wzorców chropowatości wykonywane są pomiary topografii powierzchni elementów konstrukcyjnych, przeprowadzane przez akredytowane laboratoria badawcze.

2.2.5. Pomiary wad struktury geometrycznej materiału

Tomografia komputerowa (ang. *computed tomography* – CT) w metrologii wielkości geometrycznych przyniosła przełom w dziedzinie pomiarów nieniszczących, stając się kluczowym narzędziem w wielu sektorach, m.in. takich jak: przemysł precyzyjny, motoryzacyjny, lotniczy oraz energetyczny. Pomiary tomograficzne dostarczają przede wszystkim wyników pomiarów geometrycznych przestrzennych, uwzględniających wnętrze mierzonego elementu, w tym nieciągłości materiałowe. Jest to właściwie nieosiągalne innymi metodami pomiarowymi. Jednak ten rodzaj pomiaru również obarczony jest wieloma problemami wynikającymi ze sposobu pomiaru, analizy danych objętościowych oraz braku wzorców objętości wewnętrznej. W efekcie problematyczne staje się uzyskiwanie dokładnych pomiarów objętościowych obiektów, które charakteryzują się złożoną strukturą i różnorodnością materiałów. Kluczowym aspektem analizy CT jest interpretacja (przypisanie do materiału lub powietrza) wokseli, czyli trójwymiarowych pikseli, które tworzą obraz tomograficzny. Ich poprawna interpretacja, na podstawie wartości ze skali odcieni szarości, jest niezbędna do dokładnego określenia granic pomiędzy materiałem a powietrzem.

Współczesne badania w dziedzinie CT dotyczą precyzyjnego wyznaczania granicy materiał/materiały – powietrze, co stanowi podstawę analizy wymiarowej. Jakikolwiek błąd w tym krytycznym etapie mogą prowadzić do błędnych szacunków objętości, co jest szczególnie problematyczne w przypadku pomiaru przedmiotów o złożonej strukturze wewnętrznej. Istnieje wiele algorytmów służących do wyznaczania granicy materiał/materiały – powietrze, z których najpopularniejszym jest algorytm ISO50 %, przy czym jego skuteczność może być zmienna w zależności od specyfiki badanego materiału i bliskości

pików odpowiadających powietrzu i materiałowi na histogramie. Wielu badaczy podkreśla potrzebę rozwijania bardziej zaawansowanych metod analizy, które uwzględniają specyfikę różnych materiałów i kształtów, a także możliwość automatycznego wyznaczania wymiarów geometrycznych bez konieczności angażowania doświadczonego operatora.

2.2.6. Pomiary w skali makro

Pomiary geodezyjne

Globalne Systemy Nawigacji Satelitarnej (ang. *global navigation satellite systems* – GNSS), uzupełnione o nowe technologie bezwzględного pomiaru odległości, mają coraz większy wpływ na pomiary w skali makro. Zastosowania w geodezji, wykrywaniu klęsk żywiołowych czy monitorowaniu stabilności dużych konstrukcji wymagają wzorców odniesienia długości, które są stabilne w czasie i charakteryzują się wysoką dokładnością.

Ukierunkowana na potrzeby gospodarcze geodezja spełnia zadania wchodzące w zakres inżynierii geoprzestrzennej, która jest pomocna w zarządzaniu procesami inwestycyjnymi, społecznymi oraz bezpieczeństwem zarówno w skali mikro, jak i makro.

Instrumentarium geodezyjne można podzielić na kilkadziesiąt grup przyrządów posługujących się technikami laserowymi, optycznymi, detekcjami radiowymi i łącznością oraz zdobyczami technologii kosmicznych GNSS. Obecna geodezja nie przypomina dyscypliny naukowej, za jaką większość społeczeństwa uważa ją od lat. W skali globalnej służy do realizacji i stałego utrzymywania w stanie aktualności układów odniesienia przy użyciu najdokładniejszych urządzeń pomiarowych. Zapewnia również odniesienie dla prac wykonanych w skalach regionalnej i lokalnej.

Wyniki pomiarów geodezyjnych zasilają danymi wiele istotnych dla funkcjonowania państwa systemów informacyjnych m.in.: banki osnów geodezyjnych, banki danych ewidencyjnych nieruchomości i ich granic oraz księgi wieczyste. Co więcej, dane geodezyjne stanowią ważną informację w procesach sądowych czy dotyczących spraw podatkowych. Współczesne geodezyjne urządzenia pomiarowe: odbiorniki GNSS, tachimetrie elektroniczne, grawimetrie, skanery laserowe 3D, poziomice, pionowniki i inne wykorzystywane są także w wielu

dziedzinach gospodarki poza geodezją. Do zastosowań tych można zaliczyć: pozycjonowanie obiektów ruchomych, lokalizowanie zagrożeń, tworzenie zaawansowanych modeli matematycznych (np. prognozowanie pogody), inwentaryzację architektoniczną dóbr kultury i przyrody czy wdrażanie nowoczesnej technologii precyzyjnego rolnictwa [10, 11].

Instrumenty pomiarowe geodezyjne, mimo ich istotnego znaczenia w obszarach takich jak: bezpieczeństwo, działalność prawna, zakładanie osnów geodezyjnych, grawimetrycznych i magnetycznych czy też w realizacji innych celów niegeodezyjnych, nie posiadają uregulowania prawnego w zakresie nadzoru metrologicznego. Uporządkowanie zagadnień w zakresie zapewnienia spójności pomiarowej mierników geodezyjnych umożliwiłoby potwierdzenie wiarygodności wykonywanych nimi pomiarów. Wspomnianą problematyką zajęła się Grupa Robocza WG6 ds. pomiarów przestrzennych, geodezyjnych, geofizycznych i zastosowań technik satelitarnych powołana przez Prezesa Głównego Urzędu Miar, która działała w ramach Konsultacyjnego Zespołu Metrologicznego ds. Infrastruktury i Zastosowań Specjalnych.

Aktualnie w zakresie usług oferowanych przez GUM znajdują się wyłącznie wzorcowania dalmierzy laserowych. Planowe kierunki rozwoju GUM dotyczą zarówno regulacji prawnych w tym obszarze, jak i prac badawczo-rozwojowych, które obejmują certyfikowanie i kompleksową komparację pomiarowych urządzeń geodezyjnych, komparację łat niwelacyjnych (zwykłych i kodowych) oraz wyznaczanie baz drogowych będących wzorcami dla wzorcowania odbiorników GPS (ang. *global positioning system*).

Pomiary dużych obiektów 3D

Wiele stanowisk pomiarowych wykorzystywanych w nauce i przemyśle wymaga bardzo precyzyjnej kontroli wymiarowej dużych obiektów (o wymiarach liniowych od jednego metra do setek metrów) lub obiektów zbyt trudnych, ze względu na swoje gabaryty, do umieszczenia w przestrzeni pomiarowej współrzędnościowej maszyny pomiarowej. Ponadto zdolność do dokładnego działania wielu urządzeń, niezbędnych do fundamentalnej nauki i posiadających bardzo duże wymiary, wymaga bardzo precyzyjnej kontroli wymiarów, np.: teleskopy optyczne nowej generacji (średnica 40 m, przy nierówności

powierzchni w granicach nm), wiązki synchrotronowe (od 10 nm do 50 m) itp. W takich sytuacjach występuje konieczność mierzenia obiektów bezpośrednio w miejscu produkcji lub montażu. Takie zadanie pomiarowe wiąże się z szeregiem wyzwań, innych niż te występujące w laboratoriach wzorcujących, tj.: efekty cieplne, współczynnik załamania światła i stabilność urządzenia, które mogą zakłócać pomiar.

Pomiar współczynnika załamania światła w niejednorodnych środowiskach stanowi ważne wyzwanie zarówno dla produkcji w skali makro, jak i średniej, ze względu na wpływ na skalę długości, opartą na długości fali lasera, i refrakcję, powodującą efekty ugięcia wiązki. W chwili obecnej brakuje przyrządów pomiarowych oferujących szeroki zakres pomiarowy z konieczną do uzyskania dokładnością wyników pomiarów (precyzyjne określanie wartości współczynnika załamania światła w powietrzu w 3D, dokładna metrologia kąta powiązana z efektem refrakcji i słabą kompensacją rozszerzalności temperaturowej w warunkach użytkowania).

Doświadczenie i szerokie wsparcie w zakresie metrologii dużych objętości zapewnia National Physical Laboratory (NPL) w Wielkiej Brytanii. Swoimi badaniami, usługami i wzorcowaniami laboratorium NPL wspiera szczególnie użytkowników w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym, a także w robotyce, wytwarzaniu energii i inżynierii lądowej. Z kolei niemieckie Physikalisch-Technische Bundesanstalt posiada stanowisko pomiarowe ze ścianą referencyjną do testowania i wzorcowania mobilnych systemów pomiarowych 3D dla dużych zakresów pomiarowych (do 10 m). Ponadto przy PTB powstało centrum kompetencyjne dla energetyki wiatrowej (ang. Competence Center for Wind Energy – CCW) zapewniające niemieckiemu sektorowi energetyki wiatrowej unikalną na skalę światową infrastrukturę metrologiczną zapewniającą m.in. pomiar wielkości geometrycznych (np. kół zębatach) za pomocą dużej współrzędnościowej maszyny pomiarowej (objętość pomiarowa: 5 m × 4 m × 2 m).

Oczywistym jest fakt, iż ze zwiększenia dokładności pomiarów wynikają wymierne korzyści ekonomiczne, takie jak: mniejsza ilość materiału, mniejsza masa, lepsza aerodynamiczność oraz ograniczenie ilości spalanej energii. Spójność pomiarowa zapewnia natomiast kompatybilność wymiarową komponentów pochodzących od wielu producentów. Obecnie w kraju nie ma stanowisk pomiarowych pozwalających na wzorcowanie przyrządów do pomiaru dużych obiektów 3D.

Należy podkreślić, że jest zapotrzebowanie przemysłu na takie usługi w przypadku przyrządów, takich jak: laser trackery, tachimetry czy skanery laserowe.

Kluczowe zadania na przyszłość to opracowanie i wdrożenie programu nadzoru dokładności pomiarów 3D dla polskiego przemysłu oraz opracowywanie metod pomiarowych ograniczających niepewność pomiarów wielkogabarytowych, innowacyjnych systemów pomiarowych redukujących koszty i czas, które mogą w przyszłości zostać wdrożone do produkcji w postaci procedur pomiarowych dla pomiarów wielkogabarytowych 3D.

2.2.7. Nanometrologia

Nanometrologia to szybko rozwijająca się dziedzina, w której już nastąpiły przełomowe zmiany i prawdopodobnie będą one kontynuowane w przyszłości. Obecnie występuje kilka istotnych obszarów związanych z rozwojem nanometrologii. Jednymi z nich są potrzeby w zakresie opracowania wzorców długości opartych na siatce krystalicznej, atomowo zdefiniowanych wzorców wysokości stopnia do wzorcowania osi w instrumentach z głowicą skanującą, wykorzystania siatki krzemowej do wzorcowania skali w transmisyjnym mikroskopie elektronowym (ang. *transmission electron microscopy* – TEM) o wysokiej rozdzielczości oraz interferometrii rentgenowskiej do nanopozycjonowania i oceny czujników przemieszczenia. Na świecie istnieje rosnąca potrzeba osiągnięcia konsensusu i opracowania praktycznych wytycznych dotyczących stosowania takich wzorców, a także innych alternatywnych dróg realizacji jednostki długości w metrologii wymiarowej w nanoskali. Innym zagadnieniem jest stale rosnąca liczba definicji wielkości nanocząstek. Wiele z tych definicji jest ze sobą niezgodnych, a certyfikacja w obszarze dotyczącym nanocząstek staje się ważną kwestią.

Nanotechnologia już obecnie jest dziedziną o dużym znaczeniu ekonomicznym, a wiele krajów opracowało narodowe strategie rozwoju nanotechnologii i uruchomiło stosowne programy. Prowadzą one szeroką gamę działań i programów nanotechnologicznych, takich jak: rozwój nanomateriałów, powierzchnie nanostrukturalne, obliczenia kwantowe, nanobiotechnologia, nanoelektronika, nanowytwarzanie, technologia nanooptyczna, powierzchnia i nanoanaliza. W dziedzinie nanometrologii wymiarowej prace dotyczą przede wszystkim

ustanowienia odpowiedniej infrastruktury pomiarowej. Bardzo odmienny charakter zjawisk w skali nano oznacza, że konwencjonalne metody pomiaru i oprzyrządowanie coraz częściej nie są w stanie zapewnić niezbędnych parametrów pomiarowych, zakresu, niepewności i dokładności. Inne rosnące problemy dotyczą niepewności pomiaru w nanometrologii wymiarowej, rozbieżności metod – np. między mikroskopem sił atomowych (ang. *atomic force microscope* – AFM), skaningowym mikroskopem elektronowym (ang. *scanning electron microscope* – SEM) i optyczną metrologią – stają się coraz większe w stosunku do ich niepewności, co znacznie komplikuje interpretację wyników pomiarów i porównań obejmujących różne techniki. Odpowiedzią są wówczas metody hybrydowe stosowane np. przez Narodowy Instytut Normalizacji i Technologii (ang. National Institute of Standards and Technology – NIST), który badał spójność pomiarów AFM i optycznych. Rozwijająca się na świecie oferta usług pomiarowych w skali nano obejmuje pomiary takich parametrów wzorców geometrii powierzchni jak: szerokości linii i wysokości schodków, a także wzorcowanie mikroskopów sił atomowych (stosując wzorce siatkowe lub poprzez wzorcowanie pozycjonerów za pomocą interferometrycznych i nanometrycznych czujników przemieszczenia) czy fotomasek stosowanych w przemyśle mikroelektronicznym.

Polska już obecnie dysponuje obszarami kompetencji w nanotechnologii, w których znajduje się w ścisłej czołówce światowej, np.: wytwarzanie grafenu, nanometale i nanokompozyty polimerowe, nanostruktury półprzewodnikowe i spintronika, informatyka kwantowa, syntezy nanoproszków, modelowanie i synteza nanomateriałów dla katalizy i sorpcji, nanowarstwy i nanopokrycia. Badaniami nad nanotechnologią zajmują się głównie ośrodki akademickie, instytuty Polskiej Akademii Nauk, jednostki badawczo-rozwojowe oraz krajowe ośrodki przemysłowe.

2.3. Integracja pomiarów wielkości geometrycznych z procesem wytwórczym

Obecnie obserwuje się nieustającą integrację procesu wytwórczego części maszyn i urządzeń z procesem pomiarowym wielkości geometrycznych. Najbardziej odpowiednim przykładem w zakresie pomiarów

długości i kąta jest proces wytwarzania elementów na obrabiarkach CNC. Ich odpowiednie uzbrojenie w przyrządy do pomiarów geometrycznych (np. głowice (sondy) pomiarowe) sprawiło, że stały się one zdolnymi do wykonywania pomiarów charakterystyk geometrycznych w trakcie obróbki lub po jej zakończeniu (ang. *on-machine measurement*).

Dzięki temu potencjalnie zbędne staje się stosowanie zewnętrznych urządzeń pomiarowych, np. zautomatyzowanych maszyn pomiarowych lub jednozadaniowych przyrządów do pomiarów wielkości geometrycznych. Oznacza to również znaczne skrócenie czasu oraz ograniczenie kosztów produkcji, co ma ogromne znaczenie dla dynamicznie rozwijającej się gospodarki naszego kraju.

Niestety dotychczas nie opracowano zasad wzorcowania pomiarów współrzędnościowych charakterystyk geometrycznych wykonywanych na obrabiarkach CNC, dlatego też takie pomiary są traktowane jako pomiary pomocnicze i nie są uwzględniane w odbiorczej kontroli jakości produkowanych części maszyn i urządzeń.

2.4. Podmioty zajmujące się naukowo metrologią wielkości geometrycznych

2.4.1. Główne obszary prowadzonych prac naukowych

Prowadzone w kraju prace naukowe i rozwojowe w zakresie metrologii wielkości geometrycznych obejmują badania w skali od nano do makro. Badania te realizowane są w kooperacji z szeroko rozumianym przemysłem podczas wspólnych projektów badawczych oraz bezpośrednich zleceń pomiarowych. W ujęciu ogólnym obszary te obejmują pomiary obiektów wielkogabarytowych, pomiary wymiarów, pomiary konturów, pomiary odchyłek kształtu, kierunku i położenia oraz nierówności powierzchni (chropowatość/topografia). W nieco innej klasyfikacji badania w tym zakresie można podzielić na dotyczące pomiarów stykowych i bezstykowych czy też badania z zastosowaniem multisensorycznych narzędzi pomiarowych. Zakres pomiarów bezstykowych to także zagadnienia dotyczące opracowywania i badania urządzeń laserowych,

pomiarów interferometrycznych, pomiarów mikrododchylen kątowych wiązki laserowej oraz badań z wykorzystaniem skanerów optycznych.

Z użyciem niemedycznej tomografii komputerowej (micro-CT) w kraju prowadzone są badania nieniszczące obejmujące stosowanie urządzeń termografii pasywnej. Realizowane w tym zakresie prace dotyczą analizy struktury wewnętrznej, grubości ścian, porowatości, poprawności montażu oraz inżynierii odwrotnej – od pomiaru do wykonania parametrycznego modelu CAD (ang. *computer aided design*).

Szeroki zakres badań dotyczy pomiarów wymiarów geometrycznych realizowanych przy użyciu technik współrzędnościowych, które obejmują głównie pomiary wykonywane na maszynach współrzędnościowych, ale także z użyciem ramion pomiarowych, laser trackerów czy trackerów optycznych działających na zasadzie fotogrametrii bliskiego zasięgu. Kolejna grupa badań obejmuje pomiary geometryczne 3D z wykorzystaniem skanerów dotykowych i optycznych. We wszystkich wymienionych przypadkach podstawowym problemem jest szacowanie niepewności pomiaru. Od lat zagadnieniami niepewności pomiarów współrzędnościowych zajmują się różne zespoły badawcze. W Polsce tematyka ta jest rozwijana z dużym sukcesem przede wszystkim na Politechnice Krakowskiej oraz Uniwersytecie Bielsko-Bialskim. Na świecie znanymi i aktywnymi zespołami zajmującymi się oceną niepewności są Uniwersytet w Północnej Karolinie (USA) oraz narodowe instytucje metrologiczne, np. PTB (Niemcy), NPL (Wielka Brytania) i NIST (USA). Działalność ta doprowadziła do opracowania norm, w których przyjęto, że niepewność pomiaru współrzędnościowego może być wyznaczana jedną z trzech metod: eksperymentalną, analityczną lub symulacyjną. Metody eksperymentalne wyznaczania niepewności pomiarów współrzędnościowych polegają na wielokrotnym pomiarze przedmiotu wzorcowego. Należy tu jednak pamiętać, że w takim przypadku wykorzystanie wyników oceny dokładności współrzędnościowej maszyny pomiarowej na podstawie kontrolnego pomiaru wzorca do oszacowania niepewności pomiarów innych obiektów może odbywać się tylko wtedy, gdy są zachowane warunki podobieństwa w zakresie mierzonego wymiaru, materiału przedmiotu, strategii pomiaru oraz konfiguracji głowicy pomiarowej. Metody analityczne umożliwiają szacowanie niepewności pomiarów na podstawie zależności geometrycznych występujących w tym pomiarze. Do tego celu należy określić model pomiaru osobno dla każdej mierzonej charakterystyki geometrycznej. Metody symulacyjne

realizowane są poprzez implementację tzw. wirtualnej maszyny współrzędnościowej lub innego wirtualnego systemu pomiarowego, jak np. wirtualne ramię pomiarowe.

Innym aktualnym zagadnieniem jest zapotrzebowanie przemysłu dotyczące opracowania podstaw wzorcowania obrabiarek CNC wyposażanych w głowice pomiarowe jako współrzędnościowych przyrządów pomiarowych realizujących pomiary wielkości geometrycznych. W tym zakresie konieczna jest dokładna analiza źródeł błędów w pomiarach realizowanych na obrabiarkach CNC ze zwróceniem szczególnej uwagi na charakterystykę błędów głowicy pomiarowej. Politechnika Warszawska opracowała unikatowy na skalę światową opatentowany system pomiarowy przeznaczony do bezpośredniego badania charakterystyk metrologicznych stykowych głowic stosowanych w obrabiarkach CNC. System ten umożliwia przeprowadzenie badań zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak również przemysłowych – bezpośrednio na obrabiarkach CNC. Wyniki takich badań umożliwiają nie tylko szczegółowe badanie właściwości metrologicznych sond (głowic) pomiarowych będących na wyposażeniu obrabiarek CNC, ale również modelowanie oraz korekcję błędów.

Problematyka dotychczasowych badań naukowych w zakresie obrabiarkowych sond przedmiotowych nie dotyczy zagadnień związanych z oceną właściwości metrologicznych tych narzędzi pomiarowych w czasie, przy czym podlegają one degradacji na skutek eksploatacji i pracują zazwyczaj w trudnych warunkach przemysłowych, takich jak: wysokie temperatury, chłodziwo czy wióry. Kontrola oraz kompensacja parametrów metrologicznych sond związana jest wyłącznie z realizowaną procedurą kwalifikacji. Okoliczności przeprowadzania cyklu kwalifikacji, wynikające np.: ze zmiany konfiguracji lub parametrów pracy, wyboru procedury kwalifikacji oraz związanej z nią liczby punktów kwalifikacyjnych, nie pozwalają na śledzenie zmiany parametrów metrologicznych sond w czasie oraz ich łatwe porównywanie. Ponadto sam proces kwalifikacji zapewnia tylko częściową kompensację błędów głowicy. Dlatego konieczne są również badania dotyczące zmiany właściwości metrologicznych sond w trakcie eksploatacji z uwzględnieniem poziomu obciążeń (ang. *stress level*) oraz granicy niesprawności (ang. *hard failure*).

W innym ujęciu prowadzony zakres prac naukowych i zleconych usług badawczych związany jest z tematyką dotyczącą projektowania i diagnostyki urządzeń oraz systemów pomiarowych, ale także analizy

dokumentacji pod względem poprawności metrologicznej. Projektowane systemy pomiarowe to zarówno złożone układy pomiarowe do badań mikro-, jak i makrogeometrii. Systemy te obejmują czujniki do pomiarów kontaktowych, systemy wizyjne i oświetlacze, a także oprogramowanie do budowy samych systemów oraz ich sterowania czy testowania algorytmów do pomiarów automatycznych.

W zakresie badań topografii powierzchni prowadzone prace dotyczą projektowanych, nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych, badań metalograficznych (mikrostruktury), ale też elementów maszyn po procesach produkcyjnych oraz po eksploatacji. Zakres badań mikrogeometrii powierzchni to także tematy dotyczące przygotowania dokumentacji z badań materiałów konstrukcyjnych oraz elementów maszyn.

Inny obszar badań to szeroko pojęta diagnostyka. W tym zakresie odnaleźć można np. usługi oceny stanu technicznego geodezyjnego sprzętu pomiarowego oraz jego rektyfikację (niwelatory, teodolity, tachimetry, pionowniki i inne) opartą na terenowych bazach testowych, a także stanowiska badawcze (kolimatory geodezyjne).

Jednostki w różny sposób prezentują zakres prowadzonych prac, realizowanych projektów, oferowanych usług oraz proponowanych obszarów współpracy. Niektóre mają postać katalogów B+R, w których przedstawiona jest oferowana przez zespoły tematyka badawcza oraz dostępna infrastruktura, a inne mają postać baz danych, zwłaszcza w przypadku realizacji zleceń komercyjnych. Inną formą są zakresy akredytacji prezentowane przez jednostki świadczące usługi w ramach działalności akredytowanych laboratoriów badawczych i wzorcujących.

2.4.2. Syntetyczna informacja o infrastrukturze badawczej

Opierając się na danych Głównego Urzędu Statystycznego (GUS) dotyczących stanu posiadania aparatury badawczo-rozwojowej, z której co prawda trudno wyodrębnić aparaturę stosowaną w wyłonionym obszarze metrologii, ale można otrzymać ogólny ogłód nad wykorzystaniem specjalistycznego sprzętu z podziałem na podmioty. Dane te wskazują, iż taką aparaturę posiada ok. 50 % podmiotów zarówno w sektorze usług, jak i produkcji, ponad 90 % Państwowych Instytutów Badawczych oraz mniej niż połowa podmiotów z obszaru edukacji. Aparatura o największej wartości jest w posiadaniu sektora usług, natomiast charakteryzująca się najwyższym stopniem zużycia, powyżej

80 %, jest w dyspozycji podmiotów z sekcji edukacji oraz profesjonalnej działalności naukowo-technicznej [7].

Wiele jednostek nadal nie dysponuje katalogiem posiadanej infrastruktury badawczej nawet na potrzeby współpracy wewnętrznych interdyscyplinarnych zespołów badawczych. Część takich baz jest w trakcie tworzenia, co potwierdzają informacje na stronach internetowych. Niekiedy dane te są zebrane i usystematyzowane, lecz dostęp do nich dla podmiotów zewnętrznych niekoniecznie jest łatwy do odnalezienia. Niemniej jednak można zaobserwować trend zmian w tym aspekcie, o czym świadczą powstające platformy komercjalizacji nauki i współpracy z otoczeniem społeczno-gospodarczym. Niektóre podmioty naukowe dysponują już własnymi platformami, na których przedstawiają oferowane usługi, proponowane obszary współpracy zarówno dla innych zespołów badawczych, jak i dla biznesu. Platformy te zawierają szczegółowe katalogi aparatury badawczej w postaci unikatowych stanowisk pomiarowych/badawczych lub konkretnych typów przyrządów pomiarowych wraz z informacjami o zakresach pomiarowych, metodzie pomiaru itp.

Oddzielną grupę infrastruktury stanowią laboratoria i pracownie metrologiczne, prezentowane wraz z ofertą dydaktyczną jednostek realizujących kształcenie.

Wśród podstawowych i najliczniejszych narzędzi pomiarowych stosowanych przez podmioty związane z metrologią wielkości geometrycznych można wyłonić kilka grup:

- współrzędnościowe maszyny pomiarowe, tomografy komputerowe, ramiona pomiarowe, laser trackery, optyczne maszyny pomiarowe, skanery optyczne, skanery laserowe 3D, współrzędnościowe maszyny skanujące,
- profilometry stykowe i optyczne, mobilne stanowiska mikroskopowe, mikroskopy optyczne do pomiaru topografii powierzchni w 2D i 3D, konturografy, okrągłościomierze,
- mikroskopy warsztatowe, narzędziowe, długościomierze poziome i pionowe Abbego, wysokościomierze,
- interferometry,
- dalmierze geometryczne i laserowe, ławy optyczne, monochromatory i układy lunetowe, wieloosiowe stanowiska do badania głowic optyczno-śledzących, stanowiska do badania parametrów detektorów oraz parametrów elementów optycznych i laserów,
- indukcyjne czujniki przemieszczeń.

2.4.3. Syntetyczna informacja o realizowanych projektach

Międzynarodowy program pn. European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR), na rzecz innowacji i badań w dziedzinie metrologii, umożliwia europejskim instytucjom metrologicznym, organizacjom przemysłowym i medycznym oraz środowiskom akademickim współpracę w określonych dziedzinach. W minionej dekadzie, w ramach tej współpracy GUM uczestniczył w pięciu projektach związanych z pomiarem wielkości geometrycznych. Trzy projekty dotyczyły pomiarów dużych obiektów/objętości oraz pomiarów geodezyjnych. Dwa pozostałe dotyczyły pomiarów w skali nano i problemów związanych z zapewnieniem spójności pomiarowej w pomiarach mikrogeometrii. Pomiary kąta oraz pomiary dużych obiektów stanowiły także wcześniej obszar współpracy GUM w programie European Metrology Research Programme (EMRP).

W ramach tematyki projektów podejmowanych w kraju w ostatnim czasie związanych z metrologią wielkości geometrycznych najczęściej znajdują się zagadnienia dotyczące pomiarów wykonywanych w geodezji (według bazy Narodowego Centrum Nauki). Nieliczne projekty związane były z metrologią w skali nano.

Prace zespołów metrologicznych realizujących badania projektowe w ramach programu „Polska Metrologia” obejmują problematykę pomiarów dużych obiektów. Ponadto rozwijają zagadnienia dotyczące pomiarów nierówności powierzchni, także w technikach addytywnych czy też dokładności wymiarowo-kształtowej.

W ramach programu naukowo-badawczego związanego z budową Świętokrzyskiego Kampusu Laboratoryjnego Głównego Urzędu Miar (GUM) wskazano podstawowe tematy/obszary badawcze do realizowania przy wykorzystaniu stanowisk kampusu samodzielnie przez GUM lub Politechnikę Świętokrzyską (PŚk), razem lub też we współpracy z innymi podmiotami. Najwięcej, bo aż 11 tematów planowanych dla GUM dotyczy obszaru długości i kąta. Najliczniejsze grupy spośród wszystkich tematów planowanych dla PŚk są związane z problematyką pomiarów geodezyjnych (siedem tematów) oraz nanometrologii (pięć tematów), a jeden w zakresie pomiarów kąta.

Wytwarzanie produktów nowej generacji o wysokiej wartości w większym stopniu będzie się opierać na metrologii zapewniającej odpowiednią jakość i niezawodność. Postęp technologiczny uzależniony jest od dokładności produkcji i rozwoju nowoczesnej metrologii wymiarowej. Metrologia wielkości geometrycznych zapewniająca wymaganą jakość procesów produkcyjnych to przede wszystkim pomiary wymiarów liniowych i kątowych, odchyłek kształtu, kierunku i położenia oraz mikro- i makrogeometria powierzchni. Uniwersalność metrologii długości i kąta oraz jej powszechne stosowanie powodują ciągłe doskonalenie metrologii wkomponowanej w system produkcyjny.

Poprawa możliwości pomiarowych w zakresie metrologii wymiarowej związana jest głównie z postępującą automatyzacją i cyfryzacją procesów produkcyjnych oraz ich licznymi ulepszeniami. Nowe wyzwania rozwojowe dotyczą przede wszystkim możliwości pomiarowych w zakresie skrajnych wymiarów (nanotechnologii oraz pomiarów dużych odległości i długości obiektów wielkogabarytowych), a także innowacyjnych technik poszerzających możliwości pomiarowe, np. tomografia rentgenowska w zastosowaniach inżynierskich umożliwia pomiar objętości wewnętrznych, w tym porowatości materiału. Wszechobecnymi i niezmiennymi tematami wszystkich aspektów metrologii wymiarowej są dokładność i szybkość pomiaru.

Kolejny wyraźnie rysujący się trend w obszarze metrologii wielkości geometrycznych to integracja procesu wytwarzania i procesu pomiarowego. W przypadku wytwarzania elementów mechanicznych, szczególnie na potrzeby przemysłu motoryzacyjnego i lotniczego z wykorzystaniem obróbki skrawaniem, integracja ta oznacza pomiary bezpośrednio na obrabiarkach CNC z pominięciem odrębnych przyrządów pomiarowych.

Osobnym trendem metrologii wielkości geometrycznych, rozwijanym głównie w środowiskach akademickich, jest wzbogacanie w informacje procesu pomiarowego (ang. *information rich metrology* – IRM). Polega ono na włączaniu dowolnego rodzaju dostępnych informacji do procesu gromadzenia i przetwarzania danych pomiarowych w celu osiągnięcia poprawy jakości i dokładności pomiaru.

3.1. Przemysł (zaawansowana produkcja)

Metrologia wielkości geometrycznych pełni fundamentalną rolę w nowoczesnym przemyśle produkcyjnym, stanowiąc kluczowy element jej kontroli jakości. Ulega ona ciągłej ewolucji i dopasowuje się do rosnących potrzeb w zakresie wspomnianej kontroli jakości. W dobie automatyzacji i robotyzacji procesów przemysłowych istotną rolę odgrywa zrobotyzowana metrologia wielkości geometrycznych, która pozwala na wyznaczanie wymiarów oraz odchyłek kształtu, kierunku i położenia części maszyn o skomplikowanej i przestrzennej konstrukcji, często w rytmie dostosowanym do rytmu produkcji. Mimo znacznego już zaawansowania metrologia wielkości geometrycznych przeżywa ciągły rozwój, szczególnie w zakresie możliwości pomiarowych skrajnych wymiarów: dużych objętości oraz mikro- i nanoobjętości. Niezależnie od skali wymiarowej, jedno jest niezmiennie – produkcja najbardziej innowacyjnych i zaawansowanych technologicznie części maszyn i urządzeń wymaga zwykle wysokiej i stale rosnącej dokładności. W dokumentacji technicznej takich wyrobów spotyka się coraz węższe tolerancje wymiarowe i geometryczne, które zobowiązują do stosowania przyrządów lub całych systemów pomiarowych o coraz większej dokładności.

3.1.1. Metrologia dużych objętości

W ostatnich latach zaobserwowano rosnące zainteresowanie metrologią dużych objętości ($> 10 \text{ m}^3$). Główną siłą napędową są zastosowania w przemyśle lotniczym i morskim oraz zastosowania naukowe. Celem w tym obszarze wciąż pozostaje osiągnięcie w pełni identyfikowalnej „przestrzeni metrologicznej”, w której współrzędne przestrzenne można łatwo wyprowadzić w jednym układzie odniesienia w całym

dużym budynku, jak hangar lub hala produkcyjna. Jest to postrzegane jako niezbędny czynnik nowej generacji, w pełni zautomatyzowanych fabryk i zakładów produkcyjnych, a także jest to konieczne do zapewnienia wymaganej dokładności w robotyce.

Kluczowe zadania na przyszłość to opracowanie i wdrożenie programu nadzoru dokładności pomiarów 3D dla polskiego przemysłu oraz opracowywanie metod pomiarowych ograniczających niepewność pomiarów wielkogabarytowych, innowacyjnych systemów pomiarowych minimalizujących koszty i czas. Mogłyby one zostać wdrożone w przyszłości w postaci procedur pomiarowych dla pomiarów wielkogabarytowych 3D.

Wiele stanowisk pomiarowych, wykorzystywanych w nauce i przemyśle, wymaga bardzo precyzyjnej kontroli wymiarowej obiektów dużych lub zbyt trudnych ze względu na swoje gabaryty do umieszczenia w przestrzeni pomiarowej współrzędnościowej maszyny pomiarowej. W takich sytuacjach występuje konieczność mierzenia obiektów bezpośrednio w miejscu produkcji lub montażu. Takie zadania pomiarowe wiążą się z kolei z szeregiem wyzwań innych niż te występujące w przestrzeni laboratoryjnej, jak np.: efekty cieplne czy stabilność urządzenia.

Istnieje konieczność zaspokojenia zapotrzebowania przemysłu na usługi wzorcowania przyrządów do pomiarów w dużych objętościach, takich jak: laser trackery, tachimetry czy skanery laserowe. Należy zaznaczyć, że w kraju nie ma stanowisk pomiarowych pozwalających na wzorcowanie przyrządów do pomiaru dużych obiektów 3D. Z poprawy dokładności takich pomiarów wynikają określone korzyści ekonomiczne, wśród których można wymienić m.in.: mniejszą ilość materiału, mniejszą masę, lepszą aerodynamiczność i ograniczenie ilości spalanej energii. Spójność pomiarowa zapewnia zaś kompatybilność wymiarową komponentów pochodzących od wielu producentów.

Coraz większy wpływ na pomiary w skali makro mają systemy GNSS uzupełnione o nowe technologie bezwzględного pomiaru odległości. Choć mogą one osiągnąć dokładność milimetrową, to wciąż rozwijane są metody konieczne do weryfikowania, czy deklarowana dokładność jest zachowana. Dokładności wymiarowe, zwłaszcza w niestabilnych środowiskach, gdzie współczynnik załamania światła nie jest stały, nakreślają kierunki rozwoju technologii, które mogą sprostać wyzwaniom dla systemów weryfikacji.

Konieczne jest rozwijanie i udoskonalanie zaawansowanych procedur pomiarowych na potrzeby metrologii długości w geodezji oraz nowych technologii pomiarowych w zakresie metrologii odległości możliwych do wdrożenia w przemyśle. Poprawa dokładności monitorowania dużych konstrukcji budowlanych, takich jak mosty, czy wsparcie geometrycznej weryfikacji procesu w produkcji – to przyszłe wyzwania metrologii geometrycznej realizowanej w skali makro. Wyniki pomiarów geodezyjnych pełnią istotną rolę dla funkcjonowania państwa i systemów informacyjnych (banki danych ewidencyjnych nieruchomości i ich granic, księgi wieczyste) [10]. Co więcej, szerokie stosowanie współczesnych pomiarowych urządzeń geodezyjnych także w wielu dziedzinach gospodarki, poza geodezją (pozycjonowanie obiektów ruchomych, lokalizowanie zagrożeń, inwentaryzacja architektoniczna, precyzyjne rolnictwo itp.), sprawia, iż niezbędne są wzorce odniesienia długości, które są stabilne w czasie i charakteryzują się wysoką dokładnością. Wsparciem w tym obszarze byłyby także standardy dobrych praktyk w zakresie metrologii długości o wysokiej dokładności opartej na GNSS.

3.1.2. Nanometrologia

Potrzeba stosowania mikro- i nanometrologii wielkości geometrycznych pojawiła się wraz z rozwojem technologii wytwarzania mikroukładów elektromechanicznych (ang. *micro-electromechanical systems* – MEMS) i dalej nanoukładów elektromechanicznych (ang. *nano-electromechanical systems* – NEMS), tzn. zintegrowanych urządzeń lub systemów, które łączą elementy mechaniczne i elektryczne, a przynajmniej jeden wymiar szczególny takich struktur jest rzędu odpowiednio (0,1–100) μm (MEMS) lub (1–100) nm (NEMS). Rozwój nanometrologii umożliwi przesuwanie granic technologicznych w zaawansowanym przemyśle produkcyjnym ciągle stymulowanym do dynamicznego rozwoju poprzez potrzeby wynikające z popularności Internetu Rzeczy (ang. *Internet of Things* – IoT).

Przejście z pomiarów w skali makro- przez mikro- dalej do nanometrycznej nie jest tylko prostym skalowaniem znanych metod pomiarowych. Ze względu na to, że mamy do czynienia z niemal molekularną powierzchnią, konieczne jest zdefiniowanie na nowo wielkości pomiarowych oraz lepsze zrozumienie samego procesu pomiaru i interakcji

między przyrządem pomiarowym a mierzoną powierzchnią. Do ulepszenia i wzrostu dokładności oprzyrządowania pomiarowego brakuje również odpowiednich wzorców kalibracyjnych w skali nanometrycznej zapewniających spójność pomiarową w odniesieniu do stosowanych jednostek miary w układzie SI. Wyzwaniami w tym zakresie są opracowanie wzorców długości opartych na siatce krystalicznej oraz atomowo zdefiniowanych wzorców wysokości stopnia z wykorzystaniem siatki krzemowej do wzorcowania skali w TEM. Istnieje potrzeba opracowania praktycznych wytycznych dotyczących stosowania takich wzorców, a także innych alternatywnych dróg realizacji jednostki długości w metrologii wymiarowej w nanoskali.

Zapewnienie wzorców i spójności pomiarowej w zakresie nanometrologii wymiarowej jest podstawowym krokiem w tworzeniu infrastruktury metrologicznej niezbędnej dla użytkowników zaawansowanych urządzeń pomiarowych prowadzących badania w skali nano. Pierwszym krokiem rozszerzenia możliwości pomiarowych GUM byłoby wyposażenie laboratorium w mikroskop sił atomowych AFM oraz wzorce stosowane w nanometrologii.

Kolejnym zagadnieniem jest stale rosnąca liczba definicji wielkości nanocząstek, a dodatkowo certyfikacja w obszarze nanocząstek staje się ważną kwestią. Wyzwaniem związanym z metrologią wymiarową nanomateriałów, np.: nanocząstek i materiałów nanostrukturalnych, jest pomiar w zakresie poniżej 10 nm. Nanocząstki są często osadzone w stałej matrycy i mogą być aglomerowane. Metrologia w skali nano musi być zatem połączona z analitycznymi metodami wieloparametrycznymi, potrzebnymi do identyfikacji cząstek w złożonej matrycy, zanim zostaną one zmierzone, np. za pomocą AFM. Ponadto konieczna jest ocena możliwych interferencji między metrologią wymiarową a analityczną. Z kolei pomiary z użyciem AFM dotyczą głównie zastosowań do powierzchni swobodnych, natomiast w przypadku powierzchni ukrytych możliwości pomiarowe są ograniczone. Istnieje potrzeba ulepszonej metrologii wymiarowej złożonych form. Suplementarne mogą być np. techniki tomograficzne, a także wykorzystanie materiałów replikacyjnych.

Nanotechnologia jest dziedziną o dużym znaczeniu ekonomicznym i obejmuje szereg zagadnień. W obszarze nanometrologii wymiarowej istotną kwestią jest zapewnienie odpowiedniej infrastruktury pomiarowej, gdyż odmienny charakter zjawisk w skali nano oznacza,

że konwencjonalne metody pomiaru i oprzyrządowanie coraz częściej nie są w stanie zapewnić niezbędnych parametrów, zakresu czy dokładności pomiaru.

Odrębnym zagadnieniem jest problem szacowania niepewności w nanometrologii wymiarowej, która jest konieczna do interpretacji i oceny spójności wyników pomiarów obejmujących różne techniki.

Możliwości pomiarów trójwymiarowych, zarówno w skali mikro, jak i nano, ulegają powolnej poprawie, przy czym ciągle jednak istnieje zapotrzebowanie w obszarze metrologii 3D w zakresie dostępu do faktycznych cech 3D, w tym głębokich mikrootworów, ścian bocznych, podcięć itp. Wszystkie aspekty identyfikowalności na poziomie mikro i nano podlegają rosnącym wymaganiom. Powiązaniem trendem jest rosnąca popularność powierzchni swobodnych, które są trudne do zmierzenia ze względu na konieczność odniesienia się do geometrycznych wzorców (płaszczyzn, sfer) o dużych różnicach w stosunku do powierzchni o dowolnym kształcie. Potrzebne są normy i procedury, aby wypełnić luki w łańcuchach identyfikowalności. Niezaspokojone potrzeby w zakresie identyfikowalności są szczególnie wyraźne w przypadku nowych technologii pomiarowych, jak np. metody skatometryczne.

3.1.3. Tomografia do zastosowań inżynierskich

Rentgenowska tomografia komputerowa (CT) to bardzo szybko rozwijająca się technologia, która staje się coraz bardziej popularna w przemyśle. Rewolucjonizuje ona sposób wykonywania pomiarów wymiarowych. Wyzwaniem są wciąż jednak fundamentalne kwestie metrologiczne wymagające pełnego zrozumienia i rozwiązania. Są one głównie związane ze złożonymi zjawiskami fizycznymi występującymi podczas pomiaru, analizą danych objętościowych oraz brakiem wzorców objętości wewnętrznej. W efekcie problematyczne staje się uzyskiwanie dokładnych pomiarów objętościowych obiektów, które charakteryzują się złożoną strukturą i różnorodnością materiałów. Kluczowym aspektem analizy CT jest interpretacja trójwymiarowych pikseli (wokseli; tworzących obraz tomograficzny) niezbędna do dokładnego określenia granic pomiędzy materiałem a powietrzem. Istnieje również potrzeba rozwijania bardziej zaawansowanych metod analizy uwzględniających specyfikę różnych materiałów i kształtów, a także

możliwość automatycznego wyznaczania wymiarów geometrycznych. Przykładem potrzeb w zakresie rozwoju metrologii wielkości geometrycznych opartej na tomografii rentgenowskiej jest tematyka konkursu w ramach programu INFOSTRATEG VII Narodowego Centrum Badań i Rozwoju zgłoszona przez Główny Urząd Miar: „Wyznaczanie granic ośrodków o różnej gęstości w radiografii przemysłowej oraz w przemysłowej tomografii komputerowej dla celów precyzyjnego wyznaczania objętości”. Celem głównym projektu jest rozwinięcie i optymalizacja technologii tomografii komputerowej (CT) w metrologii przemysłowej, aby sprostać wyzwaniom związanym z precyzyjnymi pomiarami objętościowymi specjalistycznych elementów, takich jak: komory jonizacyjne czy popularne opakowania (np. puszki aerozolowe), które również podlegają pomiarowi objętości wewnętrznej. W ramach realizacji projektu opracowany zostanie zaawansowany system analizy danych pomiarowych z tomografu, który umożliwi automatyczne i dokładne wyznaczanie objętości wewnętrznej elementów bez konieczności angażowania doświadczonego operatora, co zwiększy efektywność i dokładność procesu pomiarowego. Aby było to jednak możliwe, konieczne są prace badawcze w zakresie opracowania odpowiednich wzorców objętości wewnętrznej. Dotychczasowym problemem występującym w pomiarach tomograficznych jest brak odpowiedniego wzorca umożliwiającego prawidłowe wzorcowanie urządzenia w przypadku badań zamkniętych objętości. Istnieją wzorce oraz metody do wyznaczania podstawowych błędów tomografu, jednak są one wzorcami zewnętrznymi. Zatem kluczowe jest opracowanie odpowiednich wzorców oraz norm wdrażających właściwe procedury kalibracyjne i pomiarowe. Również w przypadku tomografii rentgenowskiej ocena niepewności pomiaru wymaga głębszego ugruntowania.

3.1.4. Robotyka i automatyzacja procesów pomiarowych

Skrócenie czasu przestoju obrabiarki i przeniesienie czynności związanych z kontrolą jakości obrabianego przedmiotu, wykonywanych w trybie metrologii *off-line*, do centrum obróbczego pozwala skutecznie usprawnić proces produkcji. W porównaniu do tradycyjnych metod, procesy ustawiania i pomiaru cech części, również w celu określenia naddatku na obróbkę oraz reagowania na zmiany w procesie obróbki, takie jak: odkształcenia czy efekty termiczne, są wówczas

przeprowadzane automatycznie. Dalszy rozwój przemysłu to sukcesywne zastępowanie kontroli jakości wyrobów, przeprowadzanej po zakończonej produkcji, na realizowaną równolegle z produkcją lub bezpośrednio w cyklu produkcyjnym. Takie operacje nie tylko przyspieszają produkcję, ale także czynią ją bardziej efektywną przez szybsze wykrywanie niezgodności. Postępująca automatyzacja procesów pomiarowych to zatem stopniowe sprowadzanie roli laboratoriów pomiarowych, realizujących obecnie pomiary *ex-situ*, do roli nadzorcy i gwaranta jakości przedsiębiorstwa.

Istotą optymalizacji jest jednak zawsze zapewnienie odpowiedniego poziomu jakości produkcji. Wiąże się to z wymaganiami dla przyrządów pomiarowych, które wspierają działania metrologii *in-line* i pozwalają na zapewnienie odpowiedniej dokładności i miarodajności pomiaru dla danej kontroli. Krokiem w rozwoju metrologii przemysłowej byłoby opracowanie zasad wzorcowania pomiarów charakterystyk geometrycznych realizowanych na obrabiarkach CNC, tak aby mogły być one stosowane bezpośrednio w odbiorczej kontroli jakości produkowanych elementów, a nie pośrednio, jak dotąd, jako pomiary pomocnicze. Skrócenie procesu produkcyjnego, a tym samym redukcja kosztów wymagają określenia procedur do wyznaczania wartości mierzonych cech wraz z niepewnością pomiaru bezpośrednio na obrabiarce, co stanowi kluczowe zagadnienie w ocenie jakości wyniku pomiaru obrabiarkowego.

Jak już wspomniano, uwzględnienie wyników pomiarów wykonywanych bezpośrednio na obrabiarkach CNC w odbiorczej kontroli jakości poprzez odpowiednie ich wzorcowanie pozwoliłoby na znaczne skrócenie procesu produkcyjnego oraz redukcję kosztów. Dlatego badania dotyczące opracowania podstaw wzorcowania pomiarów geometrycznych wykonywanych na obrabiarkach CNC są bardzo oczekiwane przez przemysł, gdyż przyczyniają się do rozwoju innowacyjnej gospodarki. Dotyczy to szczególnie przemysłu motoryzacyjnego, lotniczego, kolejowego oraz energetycznego.

Włączenie do procesu kontroli jakości produkowanych wyrobów pomiarów geometrycznych wykonywanych bezpośrednio na obrabiarkach CNC jest zgodne z najnowszymi trendami badań prowadzonych zarówno przez najlepsze ośrodki naukowe w Polsce, jak również na świecie. Obserwowana jest również wyraźna tendencja rozwoju metrologii wielkości geometrycznych polegająca na zastępowaniu

jednozadaniowych przyrządów pomiarowych zintegrowanymi i zautomatyzowanymi systemami pomiarowymi. W trend ten wpisują się zasadnicze cele i kierunki działań GUM określone w czteroletnim strategicznym planie działania, szczególnie w zakresie wsparcia polskiej gospodarki, jej innowacyjności i konkurencyjności [9].

Niepewność pomiarów jest ważnym aspektem rozwoju metrologii przemysłowej. Należy zaznaczyć, że metrologia stosowana w laboratoriach, jako że ma ograniczone zastosowanie w przemyśle, daje tylko częściowe odpowiedzi na pytania użytkowników dotyczące jej wykorzystania w rutynowej działalności przemysłowej. Co więcej, brak właściwej oceny niepewności na ostatnim etapie kontroli wymiarowej części stanowi zagrożenie dla pełnego łańcucha identyfikowalności. Jego paradygmatem jest weryfikacja zgodności ze specyfikacjami, dla której niepewność odgrywa istotną rolę. Stan ten pociąga za sobą konieczność doskonalenia modeli szacowania niepewności, a także udział w porównaniach międzylaboratoryjnych w celu sprawdzenia tych metod.

Wyzwania metrologii wymiarowej w tym obszarze są ściśle związane z zapewnieniem spójności pomiarowej w warunkach przemysłowych. Nowe wymagania stawiane wobec systemów kontroli metrologicznej, będących integralną częścią systemów produkcyjnych, ustalają kierunki rozwoju metrologii *in-line*.

Trendy w zaawansowanej produkcji (także w skali mikro i nano) mogą ostatecznie wymagać włączenia metrologii do procesu technologicznego, co w niektórych przypadkach może oznaczać opracowanie zupełnie nowego podejścia do metrologii wymiarowej. Przykładem takiego obszaru jest ciągle rozwijana technika pomiarów realizowanych na obrabiarkach stosowanych do obróbki precyzyjnej. Rosnące wymagania prowadzą do doskonalenia zarówno technik oceny wymiarowej, jak i błędów pozycjonowania, w których pomiary dużych dokładności realizowane są w skali nanometrycznej.

Kolejnym wyzwaniem jest zwiększenie nie tylko dokładności, ale także szybkości, dynamiki i identyfikowalności w warunkach *in-situ* systemów metrologicznych od 1D do 3D o średnim zasięgu (10–100) m. Rozwój metrologii wymiarowej to również odpowiedź na rosnące zapotrzebowanie na narzędzia *on-line* do efektywnej i wielkopowierzchniowej oceny grubości, struktury, składu, aktywności oraz wykrywania wad podczas wytwarzania.

Zmiany w praktyce przemysłowej napędzają dyskusje na temat możliwych zmian w zakresie metrologii kąta. W ciągu ostatnich kilku dekad obserwowano rosnące wykorzystanie technologii enkoderów do pomiaru kąta. Należy dodać, iż np. precyzyjne poziomice elektroniczne i autokolimatory fotoelektryczne są szeroko stosowane do pomiarów odchyłek kształtu dużych powierzchni pomiarowych, a także do precyzyjnego kąтового pozycjonowania elementów w procesach produkcyjnych, montażowych i pomiarowych. Konieczne w tym zakresie jest zapewnienie spójności pomiarowej dla przyrządów pomiarowych o wysokich rozdzielczościach (autokolimatory, poziomice elektroniczne) służących do pomiarów kątów pochylenia różnych powierzchni. Kluczowe zadania na przyszłość to dokładna metrologia kąta o większej rozdzielczości powiązana z efektem refrakcji i kompensacji rozszerzalności temperaturowej w warunkach użytkowania.

3.2. Energetyka i ochrona środowiska

Bezzałogowe statki powietrzne (ang. *unmanned aerial vehicle* – UAV), powszechnie zwane dronami, są coraz częściej wykorzystywane w przemyśle do różnorodnych zadań transportowych. Znalazły one również zastosowanie w metrologii do przenoszenia sensorów pomiarowych umożliwiających m.in.: badanie charakterystyk promieniowania anten, wykrywanie gazów czy też monitorowanie stanu środowiska naturalnego. Obecnie trwają prace badawcze, które mają na celu zastosowanie dronów w metrologii wielkości geometrycznych do fotogrametrii wielkoskalowej. Do zrealizowania takiego pomiaru konieczny jest dokładny pomiar jego pozycji. Zastosowanie klasycznej techniki GPS często jest niewystarczające, gdyż błąd pozycjonowania satelitarne wynosi od 0,5 m do 1 m. Dokładniejszym rozwiązaniem nawigacji satelitarnej jest technologia RTK GPS (ang. *real time kinematic*), która umożliwia pozycjonowanie obiektów z dokładnością pojedynczych centymetrów. Jeszcze lepsze pozycjonowanie można uzyskać z zastosowaniem trackera laserowego, który może służyć do precyzyjnych pomiarów wymiarów geometrycznych obiektów energetycznych o dużych gabarytach. Zastosowanie drona do przenoszenia retroreflektora wbudowanego w sondę sferyczną i użycie trackera laserowego do pomiaru jego pozycji otwiera nowe możliwości pomiarowe obiektów, do których bezpośredni dostęp człowieka jest utrudniony. Mówimy

tu np. o precyzyjnych pomiarach łopat turbiny wiatrowej lub turbiny elektrowni wodnej. Dokładność tego typu pomiarów zależy tylko od dokładności trackera laserowego. Błąd pomiaru długości wzdłuż osi wiązki laserowej zwykle nie przekracza kilku setnych milimetra w zakresie pomiarowym kilkudziesięciu metrów.

Oczywiście metrologia ma również zastosowanie w pomiarach mniejszych elementów stosowanych w energetyce. Precyzyjnych pomiarów geometrycznych wymagają m.in. elementy gazociągów w postaci: kryz, odcinków dopływowych i odpływowych czy zestawów montażowych gazomierzy turbinowych. Jednak tego typu pomiary mogą być wykonywane zarówno przy użyciu znanych i jednozadaniowych przyrządów do pomiarów geometrycznych, jak i zaawansowanych oraz zautomatyzowanych systemów pomiarowych, jakimi są współrzędnościowe maszyny pomiarowe.

3.3. Zdrowie

Choć zastosowanie metrologii wielkości geometrycznych w obszarze związanym ze zdrowiem człowieka czy zwierząt nie jest oczywiste, to jednak istnieją cenne przykłady przedstawiające zależność pomiędzy tymi dwoma obszarami. Należy podkreślić, że rozwój medycyny, w tym implantologii, wprost wymusza takie rozwiązania. Pomiary długości, które w rzeczywistości towarzyszą każdej okresowej kontroli zdrowia dzieci w postaci pomiarów wysokości, są jednym z podstawowych narzędzi badania przedmiotowego w pediatrii. Pozwalają one na ocenę prawidłowego przebiegu procesów rozwoju młodego organizmu oraz jego dojrzewania. Pomiary wzrostu dziecka pozwalają również na identyfikację czynników zaburzających ten proces. Standardowo wykonywane pomiary przeprowadzane są z użyciem znanych lekarzom przyrządów, takich jak: stadiometr czy antropometr, o stosunkowo małej dokładności pomiaru do 0,5 cm. Dlatego u dzieci przy wzrastaniu w tempie (4,5–6,5) cm/rok w okresie przedpokwitaniowym, wykluczając okres noworodkowy, pomiary w krótszych odstępach czasowych niż co 6–12 miesięcy są niemiarodajne. Zdecydowanie częstszych pomiarów wymagają sytuacje kliniczne związane z diagnostyką czy stosowaniem leczenia, kiedy to roczny okres oczekiwania na stwierdzenie zmian jest zbyt długi. Wiele sytuacji wymaga bowiem pomiaru przyrostu dzieci

z interwałem kilkutygodniowym. Jako przykład można wskazać monitorowanie procesu wzrastania w sytuacjach, w których stosuje się środki farmakologiczne o skutkach ubocznych spowalniających tempo wzrostu pacjenta. Ponieważ dynamika wzrostu jest ważnym elementem oceny rozwoju fizycznego i zdrowia dziecka, a w przypadku choroby – elementem oceny skutecznego leczenia, precyzyjny pomiar wzrostu dzieci w krótkich interwałach czasowych znajdzie zastosowanie w wielu obszarach medycznych i biologicznych. Krótkoterminowe pomiary przyrostu kości długich mogą być wykorzystane m.in. do: dokładnego opisu dynamiki wzrostu w poszczególnych grupach wiekowych (wcześniaki, noworodki, niemowlęta, dzieci w okresie przedpokwitaniowym i w okresie dojrzewania), charakterystyki dynamiki wzrostu w innych szczególnych grupach (np.: sportowcy, wcześniaki), oceny wpływu wielu znanych czynników na wzrost kości długich i wysokość ciała u dzieci (tj.: czynniki psychosocjalne, żywieniowe, środowiskowe i genetyczne), określenia wpływu chorób przewlekłych oraz chorób i stanów związanych z niskorosłością. W przypadku podjęcia leczenia dokładne pomiary geometryczne kości długich dzieci pozwolą na określenie wpływu leczenia na dynamikę wzrostu, ocenę odpowiedzi na leczenie substytucyjne (hormonem wzrostu) oraz identyfikację czynników dotychczas nieznanymi, oddziałujących w sposób istotny na wzrastanie krótkoterminowe. Osiągnięcia w zakresie precyzyjnego i nieinwazyjnego pomiaru przyrostu długości kości długich i wzrostu dzieci w tygodniowych odstępach czasowych uzyskano dotychczas na Politechnice Warszawskiej przy współpracy z Warszawskim Uniwersytetem Medycznym. Jednak istnieje potrzeba dalszego rozwoju tych metod oraz ich wdrożenie do praktyki klinicznej. Ma to kluczowe znaczenie dla przyspieszenia diagnozy oraz ewentualnej modyfikacji leczenia dzieci.

Innym przykładem zastosowania metrologii wielkości geometrycznych w obszarze szeroko rozumianego zdrowia jest rekonstrukcja 3D oraz ocena dokładności odwzorowania ubytków tkanki chrzęstnej lub kostnej z wykorzystaniem rentgenowskiej tomografii komputerowej, rezonansu magnetycznego, a po wypreparowaniu również z użyciem bezstykowych lub stykowych współrzędnościowych technik pomiarów geometrycznych. Takie badania prowadzono z powodzeniem na Politechnice Krakowskiej z rozszerzeniem o tematykę identyfikacji błędów dokładności odwzorowania kształtów rzeczywistych przez

wygenerowane modele przestrzenne. Przykładem takich badań jest np. odwzorowanie kształtu powierzchni stawu kolanowego w rekonstrukcjach 3D wyznaczonych na podstawie obrazowania tomografem rentgenowskim.

Bez rozwoju metrologii wielkości geometrycznych ukierunkowanego na nauki o zdrowiu trudno sobie wyobrazić współczesną implantologię. Chodzi nie tylko o pomiary długości, ale również o pomiary odchyłek kształtu i chropowatości powierzchni, co ma szczególne znaczenie dla prawidłowości rekonstrukcji, uniknięcia komplikacji pooperacyjnej i prawidłowego zrastania.

3.4. Transformacja cyfrowa

Transformacja cyfrowa wpływa na prawie wszystkie obszary technologiczne, co ma zarazem istotny wpływ na metrologię wymiarową. Normy i usługi pomiarowe winny zatem odpowiadać rozwiązaniom metrologicznym dla złożonych, cyfrowych scenariuszy pomiarowych, w coraz większym stopniu wykorzystujących sztuczną inteligencję i uczenie maszynowe z uwzględnieniem także cyberbezpieczeństwa przetwarzanych danych pomiarowych. Nowe rozwiązania metrologiczne są potrzebne nie tylko dla sprzętu pomiarowego, umożliwiającego generowanie i przetwarzanie danych na wysokim poziomie, ale także do oceny ich jakości. Zapewnienie wysokiej jakości danych pomiarowych jest szczególnie istotne dla ich wzajemnego uznawania i ponownego wykorzystania.

3.4.1. Sztuczna inteligencja (AI) i uczenie maszynowe (ML)

Odrębną kwestią związaną z cyfrowym rozwojem produkcji jest potrzeba identyfikowalności wyników pomiarów, a także ich powiązanie z metadanymi. Metody eksploracji danych wymagają dokładności i identyfikowalności wszystkich danych w celu podejmowania ważnych decyzji dotyczących procesów produkcyjnych. Informacja o niepewności pomiaru określa natomiast jakość tych danych, co stanowi podstawę cyfrowego partnerstwa i ułatwia podejmowanie decyzji w całym cyklu produkcyjnym.

Postęp transformacji cyfrowej, oprócz rosnącej ilości przetwarzanych danych pomiarowych, to także nowe możliwości pozwalające na tworzenie wirtualnych maszyn pomiarowych, symulację procesów pomiarowych czy wykorzystanie IoT w układach metrologii produkcyjnej. Należy podkreślić, iż w zakresie zapewnienia spójności pomiarowej cyfryzacja stanowi szerokie wsparcie, do którego można zaliczyć oferowane coraz częściej cyfrowe świadectwa wzorcowania, ale także doskonalone procesy wzorcowania czy samokalibracji zdalnej.

3.4.2. Big Data

Cyfrowa produkcja napędza popyt na znacznie większą ilość przetwarzanych danych pomiarowych. Głowice skanujące, tomografia komputerowa, systemy światła strukturalnego lub podobne techniki generują ogromne zbiory danych, których interpretacja stanowi nowe wyzwanie (podobnie jak przechowywanie i ich transmisja).

W rozwiniętych gospodarkach stosowane są obecnie elementy i procesy ze wzajemnie połączonymi (poprzez szybki intranet) inteligentnymi systemami pomiarowymi, testowymi i diagnostycznymi. Charakteryzuje się to wysoką dynamiką i lepszą dokładnością pomiarów, a także umożliwia podejmowanie natychmiastowych działań korygujących w produkcji. Rozszerzająca się cyfryzacja w całkowicie zintegrowanych, zautomatyzowanych i stale optymalizowanych środowiskach produkcyjnych zwiększa wymagania dotyczące niezawodności technologii komunikacyjnych, nie wyłączając z tego systemów pomiarowych.

Metrologia bogata w informacje IRM to stosunkowo nowy termin określający pomiary, w których do osiągnięcia poprawy ich dokładności lub usprawnienia samego procesu wykorzystuje się dodatkowe informacje związane z przyrządem i przedmiotem mierzonym. Choć, tak jak wspomniano, sam termin jest nowy, podobnie jak trend w badaniach naukowych związanych z tym zagadnieniem, to tego typu rozwiązania są znane od lat. Doskonałym przykładem może być korekcja temperaturowa powszechna w metrologii geometrycznej, szczególnie gdy warunki termiczne pomiaru różnią się od temperatury odniesienia. Obecne dążenia do wzbogacania procesu pomiarowego w informacje polegają na uwzględnianiu dowolnego rodzaju dodatkowo dostępnych informacji m.in.: o procesie produkcyjnym mierzonego elementu, jego

właściwościach fizyko-chemicznych oraz zasadach leżących u podstaw samej technologii pomiarowej. Te dodatkowe informacje wzbogacające proces pomiarowy mogą być znane *a priori* lub mogą zostać uzyskane w wyniku innych procesów pomiarowych, wykonywanych nawet jednocześnie z pomiarem, który chcemy ulepszyć. Aby jednak proces pomiarowy mógł zostać wzbogacony, informacje te powinny być homogenizowane, agregowane i zastosowane w odpowiednim modelu pomiaru. W rzeczywistości dodanie potencjalnie dużej liczby heterogenicznych strumieni informacji stwarza cały szereg wyzwań na wszystkich etapach łączenia danych. Równoległe przetwarzanie dużej ilości danych w czasie rzeczywistym stwarza problemy podobne do tych z dużymi zbiorami danych. Pewien przełom w tym zakresie może przynieść rozwój sztucznej inteligencji (AI), która w znaczący sposób może wesprzeć rozwój inteligentnych rozwiązań pomiarowych przyszłości.

Niezależnie od problemów i wyzwań związanych z przetwarzaniem oraz modelowaniem dużych połączonych zbiorów informacji, rozwój metrologii wielkości geometrycznych wzbogacanej w dodatkowe informacje wydaje się nieunikniony. W dobie cyfrowego projektowania konstrukcji maszyn i urządzeń (modele CAD) oraz cyfrowego planowania i nadzorowania procesu produkcyjnego, wykorzystanie dostępnych informacji dotyczących wytworzonych części, które chcemy poddać kontroli jakości poprzez odpowiedni pomiar, wydaje się być czymś naturalnym. W klasycznej metrologii wielkości geometrycznych ta ogromna ilość informacji o przedmiocie nie jest w żaden sposób przenoszona do przyrządu pomiarowego i nie jest stosowana do projektowania procesu pomiarowego. Rozwój zaawansowanych systemów pomiarowych, wyposażonych w procesory, które mogą przetwarzać ogromne ilości informacji, w tym również informacji o procesie produkcyjnym, wykorzystywanych materiałach, mikro- i makrogeometrii powierzchni przedmiotów, a także warunkach pomiarowych, może sprawić, że informacje te będą użyteczne do poprawy dokładności procesu pomiarowego.

Pewnym przykładem stosowania metrologii wielkości geometrycznych wzbogacanej w dodatkowe informacje jest również łączenie strumieni informacji pochodzących z pomiarów tej samej powierzchni geometrycznej różnymi metodami pomiarowymi: stykową (mechaniczną) i bezstykową (optyczną). Pomiary stykowe charakteryzują się małą

gęstością punktów pomiarowych i dużą dokładnością. Z kolei metody optyczne pozwalają uzyskać w krótkim czasie dane pomiarowe o dużej gęstości, ale z dokładnością co najmniej o jeden rząd wielkości mniejszą niż w przypadku pomiarów stykowych. Zatem wadą metod stykowych jest mała gęstość danych, natomiast w przypadku metod bezstykowych – mała dokładność. Prace prowadzone na PW umożliwiły stworzenie fuzji danych z dwóch pomiarów o zasadniczo różnym charakterze: wysokiej gęstości o niskiej dokładności (ang. *high density low accuracy* – HDLA) i niskiej gęstości o wysokiej dokładności (ang. *low density high accuracy* – LDHA), aby przezwyciężyć ograniczenia obu metod pomiarowych. W proponowanej metodzie koncepcja znaczników wirtualnych wykorzystywana jest do znalezienia reprezentacji par odpowiadających sobie punktów charakterystycznych w obu zbiorach danych. W każdej parze współrzędne punktu z pomiarów kontaktowych traktowane są jako odniesienie dla odpowiedniego punktu z pomiaru bezkontaktowego. Następnie wyznacza się transformację umożliwiającą przesunięcie punktów charakterystycznych z pomiaru optycznego na ich dopasowanie z pomiarów kontaktowych i stosuje się ją do całej chmury punktów. Skuteczność zaproponowanego algorytmu potwierdzono w zastosowaniach różnych powierzchni elementów, wśród których można wymienić: poszycie samolotu, łopaty turbiny i pokrywy silnika, co potwierdza sens wzbogacania informacji pomiarowych.

3.5. Bezpieczeństwo i dobrobyt

3.5.1. Krajowe, europejskie i światowe regulacje prawne

Rozwój i doskonalenie metod pomiarowych zapewniających wysoką jakość procesów produkcyjnych i powstających produktów wymaga stałej współpracy międzynarodowej w obszarze metrologii geometrycznej. Ważną rolę w tym obszarze odgrywają zagadnienia związane z zapewnieniem spójności pomiarowej. Kluczowa jest zatem stała kooperacja GUM z instytucjami metrologicznymi w ramach Konwencji Metrycznej oraz prac Komitetów Technicznych EURAMET-u w obszarach czasu i częstotliwości oraz długości.

Ponadto zaangażowanie GUM w prace Europejskiej Sieci Metrologicznej działającej na rzecz Zaawansowanej Produkcji (ang. *European Metrology Network (EMN) for Advanced Manufacturing*) pozwala na korzystanie z międzynarodowego wsparcia społeczności metrologicznej na wysokim szczeblu w zakresie rozwoju metrologii dla zaawansowanej produkcji.

Dla odpowiedniego opisanie zadań pomiarowych dla różnych materiałów i przyrządów pomiarowych, a także dla dokładnego odzwierciedlenia zakresu możliwości pomiarowych elastycznych systemów pomiarowych, istotne jest spójne i zrozumiałe prezentowanie zakresu usług wzorcowania. Potrzebom krajowym w obszarze metrologii geometrycznej powinny odpowiadać usługi wzorcowania wraz z określeniem CMC oferowanych przez NMI oraz laboratoria akredytowane. Oferta usług wzorcowania GUM przygotowana na podstawie klasyfikacji DimVIM, sukcesywnie rozszerzana na skutek zmian wprowadzanych w ramach Komitetu CCL przy WG-MRA, to także odzwierciedlenie krajowego rozwoju w obszarze metrologii geometrycznej w zakresie zapewnienia spójności pomiarowej.

3.5.2. Kontrola i ocena zgodności podlegających regulacjom prawnym wyrobów i czynności

Mając na uwadze wzrost tempa innowacji, konieczne jest bieżące wsparcie przemysłu krajowego w celu ograniczenia skutków sytuacji występujących między momentem, w którym przemysł potrzebuje najlepszych praktyk pomiarowych, a momentem, w którym międzynarodowe normy i rekomendacje są faktycznie dostępne. Metrologia jest bowiem jednym z czterech podstawowych filarów infrastruktury jakości wraz z normalizacją, akredytacją oraz oceną zgodności.

W obszarze metrologii geometrycznej można zauważyć, iż zgodnie z potrzebami gospodarczymi geodezja realizuje zadania wchodzące w zakres inżynierii geoprzestrzennej, która jest pomocna w zarządzaniu procesami inwestycyjnymi i społecznymi, a także bezpieczeństwem zarówno w skali mikro, jak i makro. Geodezyjne instrumenty pomiarowe mają istotne znaczenie w obszarach związanych bezpośrednio z geodezją (tj.: bezpieczeństwem czy działalnością prawną), ale także są wykorzystywane do realizacji innych celów niegeodezyjnych. Biorąc pod uwagę rolę geodezji dla funkcjonowania państwa, kluczowym

zagadnieniem pozostają uregulowania prawne w zakresie nadzoru metrologicznego nad stosowanym w tym celu wyposażeniem metrologicznym. Działania w zakresie zapewnienia spójności pomiarowej geodezyjnych narzędzi pomiarowych poprzez certyfikowanie i kompleksową komparację umożliwiłoby potwierdzenie wiarygodności wykonywanych nimi pomiarów.

Krokiem rozwoju dla przemysłu byłoby z kolei ustalenie zasad realizacji procesu, w którym stosowana obrabiarka CNC, wyposażona w sondę pomiarową, traktowana jest jako system pomiarowy, a otrzymane w ten sposób wyniki pomiaru uznawane są za pełnowartościowe wyniki końcowe. Wspierającym etapem wdrażania takiego podejścia byłoby opracowanie wytycznych dotyczących dobrej praktyki pomiarowej w zakresie wspomnianych pomiarów. Docelowo wytworzone elementy, których cechy zostałyby opisane za pomocą pomiarów wykonywanych według ustalonych procedur, bezpośrednio na obrabiarce CNC, i zapisane w postaci wyniku pomiaru wraz z niepewnością pomiaru, mogłyby być wynikami certyfikowanymi, uwzględnianymi w procesie kontroli jakości produkowanych elementów.

3.6. Podsumowanie kierunków rozwoju metrologii wielkości geometrycznych

Podstawowym celem rozwoju metrologii wielkości geometrycznych jest stałe zapewnianie spójności pomiarowej (na najwyższym poziomie) odpowiadające aktualnym potrzebom polskiej gospodarki.

Intensywnie rosnące zapotrzebowanie na większą dokładność jest wszechobecnym tematem wszystkich aspektów metrologii wymiarowej. Pojawiające się potrzeby obejmują szereg zastosowań w różnych skalach długości, od akceleratorów cząstek po nanotechnologię, i dotyczą one pomiarów wymiarów, odchyłek kształtu, lokalizacji cech półprzewodników i nanoelektroniki, nanocząstek czy systemów nanobiologicznych. Nanotechnologia stawia obecnie wiele wyzwań przed metrologią geometryczną. Praktyczna realizacja wzorca długości dla zapewnienia spójności pomiarowej w nano skali, budżety niepewności pomiaru, problematyka związana z identyfikowalnością faktycznie mierzonych cech (mikrootworów, podcięć), pozycjonowanie subnanometrowe, rozwój metod numerycznych i lepsze modelowanie – to tylko

niektóre wyzwania metrologii z tego zakresie. Istotnym warunkiem rozwoju nanometrologii wciąż pozostaje odpowiednia i dostępna infrastruktura pomiarowa umożliwiająca prowadzenie prac naukowych o zasięgu międzynarodowym i zapewniająca spójność pomiarową.

Rosnące zapotrzebowanie przemysłu w obszarze pomiarów dużych odległości oraz wymiarów obiektów o dużych gabarytach wyznacza kolejne kierunki rozwoju współczesnej metrologii wymiarowej. Dokładna metrologia dużego zasięgu niesie z kolei szereg wyzwań, zwłaszcza gdy występuje konieczność mierzenia obiektów bezpośrednio w miejscu produkcji lub montażu. Pomiary w zupełnie innych warunkach niż te występujące w laboratorium to nowe zagadnienie dotyczące identyfikowania przestrzeni pomiarowej i zapewnienia spójności, które jest szczególnie ważne dla osiągania wygórowanych oczekiwań wobec niepewności pomiaru. Warunkiem rozwoju metrologii odległościowej o wysokiej dokładności, opartej na GNSS i mającej coraz większy wpływ na pomiary w skali makro, pozostają wzorce odniesienia długości stabilne w czasie i charakteryzujące się wysoką dokładnością.

Samokalibrujące systemy pomiarowe, skrócenie łańcucha spójności pomiarowej i ograniczenie wymagań kalibracyjnych stanowią dziś kolejne wyzwania dla metrologii produkcyjnej. Zaawansowane metody produkcji mogą ostatecznie wymagać nowych procedur i norm, które umożliwią włączenie metrologii do procesu produkcyjnego i integrację tradycyjnych narzędzi w systemach produkcyjnych. Obrabiarki CNC wyposażone w sondy pomiarowe mogą być używane jako urządzenia metrologiczne w trakcie procesu wytwarzania *in-situ*. Proces ten wymaga jednak ustalenia warunków zapewnienia spójności pomiarowej i określenia niepewności przemysłowej. Modelowanie niepewności pomiaru w procesach przemysłowych, IoT do sterowania sprzężeniem zwrotnym systemów sterowania i cyfrowe bliźniaki stwarzają kolejne możliwości do monitorowania i weryfikowania pomiarów geometrycznych realizowanych w warunkach *in-situ*.

Zmieniająca się technologia powinna być ściśle monitorowana w celu określenia, w jaki sposób krajowe instytucje metrologiczne mogą zaspokoić pojawiające się potrzeby otoczenia społeczno-gospodarczego. Śledzenie aktualnych potrzeb wynikających ze zmian w metodach produkcyjnych wymaga stałego dialogu pomiędzy zainteresowanymi stronami. Konieczne jest tworzenie platform i programów pozyskiwania informacji o bieżących problemach metrologicznych

przemysłu, ale także przekazywania stanu wiedzy i aktualnych osiągnięć naukowych w obszarze metrologii wymiarowej. Wzajemna poprawa świadomości obu stron, wymiana kompetencji oraz przenikanie się różnych dziedzin metrologii są więc kluczowe do pełnego zrozumienia potrzeb współczesnej gospodarki oraz jej wsparcia w zakresie metrologii wielkości geometrycznych.

Pełna literatura w zakresie pomiarów wielkości geometrycznych zawiera tysiące publikacji książkowych, w czasopismach oraz materiałach konferencyjnych. Nie jest możliwe umieszczenie jej w tak skrótowym opracowaniu dotyczącym diagnozy stanu metrologii wielkości geometrycznych w Polsce. W związku z tym bibliografię ograniczono do minimum i podano jedynie niezbędne pozycje w zakresie danych pochodzących z instytucji.

Literatura

1. Czulek D., Szumski R., *Modernizacja państwowego wzorca jednostki długości poprzez zastosowanie syntezy częstotliwości*, „Metrologia. Biuletyn Głównego Urzędu Miar” 2010, vol. 3, nr 18, s. 44–47.
2. Wzorce pomiarowe o najwyższych właściwościach metrologicznych w kraju przechowywane w Głównym Urzędzie Miar, Główny Urząd Miar, Warszawa 2018.
3. Czulek D., Przybylska J., Szumski R., Sosinowski P., Wiśniewski M., *Długość. Przewodnik po dziedzinie*, Główny Urząd Miar, Warszawa 2017.
4. Główny Urząd Miar, www.gum.gov.pl (dostęp: 15.09.2023 r.).
5. Międzynarodowe Biuro Miar, www.bipm.org/kcdb (dostęp: 15.09.2023 r.).
6. Polskie Centrum Akredytacji, www.pca.gov.pl (dostęp: 15.09.2023 r.).
7. Wojskowe Centrum Metrologii, wcm.wp.mil.pl (dostęp: 15.09.2023 r.).
8. CCL Length Services Classification (DimVIM), ver. 12 (March 2020), BIPM, 2020.
9. Czteroletni strategiczny plan działania Głównego Urzędu Miar 2022–2025, Główny Urząd Miar, Warszawa 2021.
10. Raport końcowy z prac Grupy Roboczej WG6 ds. pomiarów przestrzennych, geodezyjnych, geofizycznych i zastosowań technik satelitarnych, działającej w ramach Konsultacyjnego Komitetu Metrologicznego ds. Infrastruktury i Zastosowań Specjalnych (KZM4), raport, Główny Urząd Miar, Warszawa 2019.
11. *Nauka i technika w 2020 r. Analizy statystyczne*, pod kierunkiem Wagner M., Główny Urząd Statystyczny, Urząd Statystyczny w Szczecinie, Warszawa, Szczecin 2022.

W rozdziale przedstawiono diagnozę stanu metrologii wielkości geometrycznych w Polsce oraz opisano strategiczne kierunki jej dalszego rozwoju. W pierwszej części określono obszar merytoryczny, będący przedmiotem opracowania, a w kolejnej omówiono polskie wzorce państwowe oraz charakterystykę obecnego stanu w analizowanym zakresie. Zaprezentowano także zagadnienie związane z integracją pomiarów z procesem wytwórczym. Dodatkowo przeprowadzono analizę dotyczącą podmiotów zajmujących się metrologią wielkości geometrycznych i zawarto syntetyczne informacje o infrastrukturze badawczej i realizowanych projektach. Następnie skoncentrowano się na przyszłości metrologii wielkości geometrycznych w priorytetowych obszarach, takich jak: przemysł, energetyka i ochrona środowiska, zdrowie, transformacja cyfrowa oraz bezpieczeństwo i dobrobyt. Stwierdzono, że konieczne jest zapewnianie spójności pomiarowej (na najwyższym poziomie) odpowiadające aktualnym potrzebom polskiej gospodarki. Zmieniająca się technologia powinna być ściśle monitorowana w celu określenia, w jaki sposób krajowe instytucje metrologiczne mogą zaspokoić pojawiające się potrzeby otoczenia społeczno-gospodarczego. Śledzenie aktualnych potrzeb wynikających ze zmian w metodach produkcyjnych wymaga stałego dialogu pomiędzy zainteresowanymi stronami. Podkreślono, że rozwój metrologii wielkości geometrycznych wzmocni pozycję Polski w dziedzinie metrologii. Jest to kluczowe dla poprawy jakości i precyzji procesów produkcyjnych, a tym samym zwiększenia konkurencyjności polskiego przemysłu na arenie międzynarodowej.

Słowa kluczowe: metrologia wielkości geometrycznych, „Polska Metrologia”, diagnoza stanu metrologii, strategiczne kierunki rozwoju metrologii

CZĘŚĆ ÓSMA

Metrologia współrzędnościowa



Prof. dr hab. inż. Jerzy A. Sładek

ORCID: 0000-0002-5991-4988

Politechnika Krakowska

ROR: <https://ror.org/00pdej676>

Od ponad 45 lat jest związany zawodowo z Politechniką Krakowską (PK). Wszystkie uzyskane stopnie i tytuły naukowe były pierwszymi w Polsce w rozwijanej przez niego specjalności naukowej – metrologii współrzędnościowej, która zawiera się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Opracował oryginalną i unikalną metodę macierzową identyfikacji błędów systemów współrzędnościowych. Zbudował pionierskie modele tych systemów, tzw. wirtualne maszyny współrzędnościowe (bliźniaki cyfrowe), oparte na sztucznych sieciach neuronowych i metodzie Monte Carlo. Założył Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej PK – obecnie jedno z najlepszych na świecie, które działa jako akredytowane przez Polskie Centrum Akredytacji laboratorium wzorcujące. Był kierownikiem 23 grantów, w tym trzech międzynarodowych, finansowanych przez UE, KBN, MNiSW i NCBR. Jest autorem i współautorem ok. 400 prac naukowych i badawczych, w tym ok. 200 publikacji, z czego ponad 50 w czasopiśmie z listy JCR oraz trzech książek naukowych (w tym monografii wydanej w 2016 r. w wydawnictwie o zasięgu światowym – Springer Verlag). Był promotorem 14 doktoratów, a kolejne trzy przewody doktorskie są zgłoszone.

Był recenzentem w kilkudziesięciu postępowaniach na stopień doktora i doktora habilitowanego, doktora honoris causa oraz licznych recenzji dorobku do tytułu profesora. Jest członkiem Rady Doskonałości Naukowej w kadencji 2024–2027. W latach 1998–2002 był inicjatorem utworzenia Specjalnej Strefy Ekonomicznej – Krakowskiego Parku Technologicznego i pełnił funkcję wiceprezesa spółki skarbu państwa. W okresie 2016–2024 był dziekanem Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej. Od pięciu kadencji członek Komitetu Budowy Maszyn Polskiej Akademii Nauk (zasiada w prezydium), członek Rady Metrologii przy Prezesie Głównego Urzędu Miar w kadencji 2022–2027, członek Rady Innowacyjno-Naukowej Zakładów Mechanicznych „Tarnów” S.A. Aktywny członek szeregu międzynarodowych organizacji naukowych: European Virtual Institute for Geometry Measurements (EVIGeM) – członek rady naukowej od 2004 r., International Measurement Confederation (IMEKO) – członek komitetu technicznego TC 14 i innych. Z jego inicjatywy powstała Narodowa Sieć Metrologii Współrzędnościowej (NSMET).

Określenie obszaru merytorycznego metrologii współrzędnościowej

Metrologia, czyli konieczność i celowość pomiarów, zawsze towarzyszyła człowiekowi na jego drodze rozwoju cywilizacyjnego, wpisując się we wszystkie cztery rewolucje przemysłowe. Wytwarzanie zaś coraz doskonalszych produktów, poszerzanie granic poznania, a przede wszystkim rozwój techniki i informatyki są związane z ukształtowaniem nowego podejścia do nauki o pomiarach, które polega na metodzie opartej o identyfikację współrzędnych punktu na powierzchni obiektu pomiaru.

Metrologia współrzędnościowa (MW), jako istotny dział współczesnej metrologii, zapewnia podstawy naukowe i techniczne dla pomiarów oraz obrazowania wielowymiarowych obiektów geometrycznych – przedstawianych jako zbiory punktów – wraz z konieczną oceną dokładności przeprowadzonego pomiaru. Aktualnie pomiar może być realizowany zarówno w warunkach statycznych, jak i dynamicznych, w zakresie od nano- do makrowymiarów. W obszarze przemysłu wpisuje się w jego intensywną automatyzację i robotyzację w warunkach tzw. Przemysłu 4.0.

Dzięki nowym technologiom oraz rozwojowi nauki, zakres zastosowań tych systemów ciągle się zwiększa, a dokładność pomiarów wzrasta.

Początków metrologii współrzędnościowej należy szukać w pracach niezależnie od siebie działających matematyków francuskich: Pierre’a de Fermata (1601–1665) i Rene Descartesa (1596–1650), którym zawdzięczamy pomysł wprowadzenia układu współrzędnych jako podstawy opisu relacji: obiekt materialny – układ odniesienia. Pomiar obiektu trójwymiarowego określa bowiem wycinek przestrzeni zarysowany jego geometrią w przyjętym układzie współrzędnych. Odkrycie to skutkowało z jednej strony opisem wymiarów i ich relacji, a z drugiej połączeniem geometrii z algebrą. Wraz z rozwojem geometrii analitycznej okazało się, że układ współrzędnych pozwala poznawać własności geometryczne na

gruncie przestrzeni wektorowej, co odkrył w XIX w. niemiecki matematyk Hermann Günther Grassmann (1809–1877), wprowadzając właśnie jej aksjomatykę i tworząc tym samym fundament naukowy współczesnej metrologii współrzędnościowej. Opracowane przez Grassmanna podstawy nie mogły wprost prowadzić do metod i konstrukcji narzędzi pomiarowych, gdyż stan rozwoju techniki je ograniczał. Początkowo współrzędnościowe systemy pomiarowe umożliwiały co prawda wyznaczenie współrzędnych punktów, lecz w praktyce sprowadzało się to do realizacji pomiarów długości w kierunku trzech współrzędnych. Pierwsze współrzędnościowe maszyny pomiarowe (WMP) zostały opracowane przez szkocką firmę Feranti (1956 r.) oraz amerykańską Moore Tool Company (1957 r.). Nie należy też zapominać o konstrukcjach szwajcarskiego przedsiębiorstwa SIP (1961 r.) oraz inżyniera Franco Sartorio – współzałożyciela włoskiej firmy DEA (1962 r.). Dopiero jednak rozwój techniki komputerowej i informatyki, jaki nastąpił pod koniec lat 60., pozwolił na skorzystanie w pełni z podstaw geometrii wektorowej oraz rachunku wyrównawczego Gaussa, co w połączeniu z techniką identyfikacji punktów na powierzchni obiektu mierzonego związaną z konstrukcją głowic (sond) stykowych, doprowadziło do zbudowania pierwszej sterowanej numerycznie maszyny współrzędnościowej (CNC WMP). Dokonał tego Zeiss, który opracował i wprowadził na rynek w 1973 r. maszynę pomiarową UMM 550. Można więc stwierdzić, że to właśnie firmie Zeiss zawdzięczamy początek współczesnej techniki współrzędnościowej i jej zastosowania przemysłowego.

Metrologia współrzędnościowa to także technologie obrazowania oparte na skanowaniu powierzchni i całych obiektów z wykorzystaniem techniki optycznej i tomografii komputerowej. Bez współrzędnościowej techniki pomiarowej nie można obecnie wyobrazić sobie inżynierii produkcji, w tym wytwarzania, szybkiego prototypowania, inżynierii rekonstrukcyjnej oraz wzornictwa przemysłowego (ang. *industrial and automotive design*) czy systemów biomedycznych. Ponadto technika ta znajduje coraz szersze zastosowanie w inwentaryzacji dzieł sztuki i ochronie zabytków (wirtualne muzea), architekturze oraz opracowywaniu konstrukcji budowlanych. Szybko rozwijającymi się obszarami są również sport oraz media. Wykorzystywane są tu innowacje w zakresie elektroniki, mechaniki, mechatroniki, optyki czy też informatyki. Te innowacje nie byłyby możliwe do zastosowania bez rozwoju naukowego w obszarze metrologii współrzędnościowej, który objął i rozszerzył

tradycyjną metrologię wielkości geometrycznych, stając się płaszczyzną najnowocześniejszych rozwiązań technologicznych [1].

1.1. Obszar naukowy, badawczy oraz techniczny metrologii współrzędnościowej

Metrologia współrzędnościowa ma kluczowe znaczenie dla rozwoju innych obszarów metrologii, gdyż bez precyzyjnych pomiarów problematyczna jest realizacja celów, takich jak: transformacja cyfrowa (w tym np.: wytwarzanie procesorów, automatyzacja i robotyzacja wytwarzania, sztuczna inteligencja), nowoczesna diagnostyka medyczna, systemy energetyczne (w tym systemy energetyki rozproszonej), ochrona środowiska, a także komplementarność i samowystarczalność metrologiczna Europy w obszarze wzorców oparta na krajowych kompetencjach w zakresie metrologii oraz na krajowej specjalizacji metrologicznej [2–4].

Metrologia współrzędnościowa ciągle się rozwija, przekraczając bezustannie granice poznania dzięki nowym technologiom wzorcowania oraz metodom oceny dokładności pomiaru.

Podstawami techniki pomiarów współrzędnościowych są:

- współrzędnościowe maszyny pomiarowe:
 - stykowe – pracujące w układzie 3D,
 - optyczne – pracujące w układzie 2D,
 - multisensoryczne 2D/3D,
- współrzędnościowe systemy redundantne, w skład których wchodzi:
 - współrzędnościowe ramiona pomiarowe (WRP),
 - laserowe systemy nadążne (LSN) – laser trackery,
- bezstykowe współrzędnościowe systemy pomiaru i obrazowania, czyli systemy:
 - wykorzystujące światło strukturalne,
 - fotogrametryczne,
 - realizujące triangulację laserową,
 - oparte na pomiarze czasu powrotu wiązki detekcyjnej (ang. *time of flight*),
 - tomografii komputerowej (CT),
 - rezonansu magnetycznego (RM),

- systemy stykowe i bezstykowe pomiaru nanometrologii i mikrogeometrii oraz topografii powierzchni.

Metrologia współrzędnościowa idealnie wpisuje się w idee Przemysłu 4.0 i Internetu rzeczy (ang. *Internet of Things* – IoT). Wkracza również intensywnie w świat mediów czy medycyny i nauki o zdrowiu (metrologia czwartego wymiaru – 4D).

Współrzędnościowe systemy pomiarowe to obecnie najbardziej zaawansowane technologicznie rozwiązania stosowane w inżynierii produkcji. Praktycznie każda nowa instalacja stanowi o wysokim poziomie rozwoju i innowacyjności zakładu przemysłowego czy laboratorium badawczego. Przyjęło się uważać liczbę zastosowanych systemów współrzędnościowych jako miernik poziomu technologicznego nie tylko zakładu, ale i całego regionu czy kraju. Tylko najbardziej zaawansowane przedsiębiorstwa są zdolne do zaadaptowania tej technologii. W naszym kraju, mimo ciągłego rozwoju, mamy niskie nasycenie we współrzędnościową technikę pomiarową, konieczne są więc inwestycje wspomagane ze środków Unii Europejskiej (UE). Wzrasta też zapotrzebowanie na specjalistów z zakresu metrologii współrzędnościowej oraz znaczenie laboratoriów wzorcujących specjalizujących się w tej technice.

Nadal, mimo widocznego postępu w ostatnich latach, za graniczne wartości błędów wskazania systemu współrzędnościowego w przestrzeni trójwymiarowej należy przyjąć: $E = (0,1 + L/1000) \mu\text{m}$, gdzie L to mierzona długość podawana w milimetrach. Granice dokładności wyznacza tu technologia wykonania i weryfikacja wzorców koniecznych do powiązania z jednostką miary wzorcowanego systemu pomiarowego.

1.2. Dokładność systemów i pomiarów współrzędnościowych

Z punktu widzenia inżynierii wytwarzania, kluczową rolę odgrywa dokładność pomiaru, która powinna być dostosowana do tolerancji wykonania. Problem ten zauważył już prof. Georg Berndt (1880–1972) w pierwszej połowie XX w., formułując relacje pomiędzy konieczną do uzyskania tolerancją wykonania a dokładnością pomiaru: „Die Meßunsicherheit beim Nachprüfen einer Toleranz – T nur ein Zehntel bis ein Fünftel von – T betragen soll”, tj.: „Niepewność pomiaru przy sprawdzanej tolerancji T powinna wynosić od jednej dziesiątej do jednej piątej tej tolerancji” (tłumaczenie autora). Zasada ta wyznaczyła nie tylko nowy kierunek

rozwoju konstrukcji przyrządów pomiarowych, ale pozwoliła szerzej spojrzeć na proces oceny dokładności pomiaru. Od końca lat 60. ubiegłego wieku ocena ta jest rozumiana jako złożony proces, którego tylko jednym ze składników jest dokładność narzędzia (urządzenia, systemu) pomiarowego. Rozwijając tę problematykę, w przypadku pomiaru współrzędnościowego zauważono jego odmienność w stosunku do klasycznego pomiaru długości. Inny jest też model pomiaru i, co za tym idzie, inny jest również opis pola błędów i źródeł jego zmienności. Zidentyfikowano więc dwa ściśle ze sobą związane problemy naukowe: dokładność współrzędnościowych systemów pomiarowych oraz dokładność pomiarów współrzędnościowych.

Pierwszy problem naukowy był związany z zadaniami, takimi jak: wzorcowanie, czyli określenie błędu wskazania poprzez powiązanie z jednostką długości, opracowanie metodyki pozwalającej na ocenę bieżącej dokładności systemu współrzędnościowego oraz nadzorowanie jego dokładności w całym okresie użytkowania z zapewnieniem jej utrzymania w przyjętych granicach. Ocena dokładności systemu współrzędnościowego realizowana na podstawie pomiaru długości jest konsekwencją pracy grupy roboczej „Me” International Academy for Production Engineering (CIRP), pod kierunkiem Theodora Stöferlego, oraz opracowań zespołu prof. Herberta Pfeifera z RWTH Aachen University. Wprowadzono wtedy pojęcie niepewności urządzenia pomiarowego (rozumianej zgodnie z normami przedstawionymi przez Niemiecki Instytut Normalizacyjny (DIN)) jako jedno-, dwu- i trójwspółrzędnościowej, obejmującej zarówno błędy przypadkowe, jak i nieskorygowane błędy systematyczne oraz ujęto wspomnianą niepewność w postaci granic obszaru jej wyznaczenia i zapisano w postaci funkcji liniowej. W konsekwencji opracowano serię norm ISO 10360 dotyczących weryfikacji dokładności urządzeń pomiarowych, operując następującymi pojęciami: błąd wskazania, błędy graniczne oraz błędy graniczne dopuszczalne (MPE) [1, 5]. Dzięki takiemu podejściu mamy obecnie spójny system oceny dokładności systemu pomiarowego i możliwe jest wypełnienie wymagań normy PN-EN ISO 9001 – Systemy zarządzania jakością – Wymagania w zakresie nadzorowania sprzętu pomiarowego. Odmienne spojrzenie na ocenę dokładności systemów współrzędnościowych reprezentuje autor z opracowaną (oryginalną) Metodą Macierzową (MM), uznając za podstawę informacji o dokładności systemu współrzędnościowego wynik identyfikacji wskazania systemu w wybranych punktach referencyjnych [1, 5].

Bardzo zatem istotne są badania dokładności maszyn i systemów współrzędnościowych. Tu kluczowe badania dotyczące dokładności głowic (sond) stykowych prowadzone były przez: prof. Jerzego A. Śladka, prof. Eugeniusza Ratajczyka, prof. Adama Woźniaka, dr. inż. Grzegorza Krajewskiego, dr. inż. Macieja Jankowskiego czy ostatnio dr. inż. Piotra Gąskę. Badania błędów składowych geometrii i kinematyki maszyn współrzędnościowych to prace: dr. inż. Marka Kowalskiego, dr. inż. Marcina Krawczyka i dr. inż. Michała Muzyka-Żmudzkiego. Badanie wpływów termicznych to natomiast prace: dr. inż. Roberta Kupca, dr. inż. Marcina Adamczyka i dr. inż. Jacka Gogóla. Systemy bezstykowe badali m.in. dr. inż. Danuta Owczarek, dr. inż. Tomasz Kowaluk i dr. inż. Piotr Siekański. Badania te dały podstawy do identyfikacji błędów wskazania E_0 dla maszyn pomiarowych oraz głowic stykowych. Z uwagi jednak na rozwój systemów współrzędnościowych powinno się inaczej podejść do problematyki błędów granicznych, opierając się nie na mierzonej długości, lecz na wyznaczeniu błędu wskazania współrzędnych w danym obszarze działania systemu pomiarowego. Dlatego aktywność komitetów i grup roboczych ISO powinna się skupić na tak zarysowanym problemie, gdyż z uwagi na uwarunkowania techniczne doszliśmy do granicy rozwoju najdokładniejszych systemów pomiarowych, czyli maszyn współrzędnościowych. Przekroczenie granicy $E_{\text{OMPE}} = (0,2 + L/1000) \mu\text{m}$ staje się technicznie niezwykle trudne, a osiągnięcie wartości $E_{\text{OMPE}} = (0,1 + L/1000) \mu\text{m}$ wymaga innowacji sprzętowych, nowych technologii wykonania wzorców i zapewnienia stałych warunków pomiarów. Prace w tym kierunku rozpoczęto na Politechnice Krakowskiej we współpracy z Leitz-Hexagon. Osobnym problemem jest ustalanie obszaru błędów granicznych dopuszczalnych dla tzw. nanomaszyn współrzędnościowych, dla których powinno się też określić niepewność pomiaru – tu też podjęto prace na Politechnice Krakowskiej wspólnie z Głównym Urzędem Miar.

Rozwój metrologii współrzędnościowej w jej wszystkich obszarach zależy zatem od ustanowienia, konstrukcji i utrzymania krajowego wzorca miar pośrednich współrzędnych punktów pomiarowych. Na Politechnice Krakowskiej, w Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej, buduje się od lat i utrzymuje taki wzorzec w postaci maszyny PMM 12.10.6 firmy Leitz wraz z laser trackerem Etalon i systemem stabilności temperatury odniesienia $\pm 0,05 \text{ K}$. Rozwój tego wzorca postawiła sobie za cel Narodowa Sieć Metrologii Współrzędnościowej (NSMET), tworząc Laboratorium

Ultraprecyzyjnych Pomiarów Współrzędnościowych i wyposażając je w maszyny Leitz Infinity 12.10.7, Leitz PMM-G oraz NMM-1.

Drugim problemem naukowym, sformułowanym w obszarze metrologii współrzędnościowej, jest ocena dokładności realizowanych pomiarów. Problem ten nie znalazł dotychczas skutecznego rozwiązania, mimo że był podejmowany przez wielu badaczy, o czym świadczy liczba publikacji czy opracowanie serii norm ISO 15530 dotyczących współrzędnościowych maszyn pomiarowych i metod wyznaczania niepewności pomiaru. Nadal brakuje opisu całościowego problemu, zebrania informacji o metodach dostępnych dla użytkowników oraz wyznaczenia kierunku skutecznego rozwiązania zadania oceny dokładności pomiaru współrzędnościowego.

Problem oceny dokładności pomiaru współrzędnościowego pojawia się z całą ostrością wtedy, gdy powstaje konieczność orzekania o zgodności wymiarów mierzonego obiektu ze specyfikacją, który opisano w normie PN-EN ISO 14253-1 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Kontrola wyrobów i wyposażenia pomiarowego za pomocą pomiarów – Część 1: Reguły orzekania zgodności lub niezgodności ze specyfikacją. Szersze ujęcie tego zagadnienia prowadzi do ustalenia zdolności systemu pomiarowego do realizacji przewidzianego zadania jako relacji rzeczywistej niepewności pomiaru do tolerancji wykonania. Rozstrzyganie o zgodności wymiarowej ze specyfikacją geometrii wyrobu (GPS) staje się obecnie jednym z podstawowych zadań dla inżynierii wytwarzania, co przy jednoczesnym imperatywie ekonomicznym, niesie niebezpieczeństwo błędnych decyzji, których skutki obserwujemy w postaci fali reklamacji produktowych. Jest to szczególnie zauważalne w takich obszarach przemysłu jak: samochodowy, lotniczy, kosmiczny, zbrojeniowy, telekomunikacyjny, urządzeń medycznych, a także w obszarze nanowytwarzania układów procesorów. Wiodącą rolę przypisuje się tu właśnie możliwości ustalenia dokładności pomiaru współrzędnościowego. W przypadku współrzędnościowych technik pomiaru jest to zadanie szczególnie trudne i nie zawsze jednoznaczne. Dlatego zarówno użytkownicy tej techniki, jak i producenci pomijają ten problem, przyjmując za dokładność pomiaru dokładność urządzenia pomiarowego, określaną dla prostego zadania pomiaru długości (wymiarowo zbliżonej do wymiarów przedmiotu mierzonego) i wyliczaną wprost z równania błędu granicznego dopuszczalnego (MPE). Tak określona dokładność znacznie różni się od rzeczywistej dokładności realizowanego zadania i prowadzi do błędnych decyzji w obszarze produkcji. Potwierdzają to oceny przeprowadzone przez

stowarzyszenie Ausbildung Koordinatenmesstechnik e.V. (AUKOM) zrealizowane dla przemysłu niemieckiego, jak i obserwacje autora poczynione w warunkach krajowych (wyniki prac laboratorium wzorcującego – Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Politechniki Krakowskiej (LMW PK)). Zagadnienie dokładności realizowanego pomiaru ma więc kluczowe znaczenie w przypadku stosowania współrzędnościowej techniki pomiarowej. Należy podkreślić, że dokładność urządzenia pomiarowego (podawana w postaci MPE) jest tylko jedną ze składowych dokładności realizowanego pomiaru. Wiemy, że miarą dokładności pomiaru jest jego niepewność. Rozpatrując problem niepewności pomiaru współrzędnościowego, przyjęto, że jest on klasycznym pomiarem pośrednim i można zauważyć dwa nurty teoretycznego podejścia do tego zagadnienia.

Pierwszy zakłada, że pomiarem pośrednim jest najprostszy pomiar długości jako różnica współrzędnych dwóch punktów pomiarowych, co ma swe źródło w powiązaniu z tradycyjną metrologią długości i kąta, gdzie np. pomiar zbieżności stożka z użyciem wałeczków pomiarowych składa się z pomiarów bezpośrednich długości i wyliczonego kąta stożka jako pomiaru pośredniego. Podobnie jest w przypadku wyznaczania średnicy okręgu jako mierzonej długości ze współrzędnych punktów. Takie podejście prowadzi do poszukiwania rozwiązania oceny dokładności w klasycznym rachunku obliczenia niepewności standardowej złożonej. Zagadnieniem tym zajmował się, formułując metodę analityczną, prof. Władysław Jakubiec z Akademii Techniczno-Humanistycznej (ATH Bielsko-Biała) w Bielsku-Białej (od 1 września 2023 r. Uniwersytet Bielsko-Bialski) [6]. Dalsze rozwinięcie tej koncepcji zrealizował, poprzez wprowadzenie analizy wrażliwości, prof. Wojciech Płowucha (ATH Bielsko-Biała) [7].

Można też oszacować niepewność, stosując pewne uproszczenia zakładające, że obszar zmienności poszczególnych składowych niezależnych jest opisany np. rozkładem normalnym, a następnie oszacować niepewność standardową jako iloczyn szerokości danego obszaru odpowiadającego możliwemu błędowi wskazania (uzyskanemu dla danej długości, np. ze świadectwa wzorcowania) i odwrotności przyjętego współczynnika rozszerzenia. Oczywiście należy to odnieść do obszaru błędów granicznych wykorzystywanego systemu współrzędnościowego (prof. Jerzy A. Sładek, PK) [1].

Drugi nurt, podobnie jak pierwszy, pozwala na przyjęcie, że pomiar współrzędnościowy jest pomiarem pośrednim z tym jednak, że pomiarem bezpośrednim jest wyznaczenie współrzędnych punktu pomiarowego i na

tym powinno się oprzeć wyznaczenie dokładności systemu pomiarowego, a nie na pomiarze długości. Zbiór współrzędnych wzorcowych, a nie długość wzorca, powinien stanowić tu odniesienie (prof. J.A. Sładek, PK) [5].

Zmienia to całkowicie podejście do konstrukcji wzorca rozumianego jako zbiór pojedynczych punktów równo oddalonych. Konsekwencją takiego podejścia jest przyjęcie, że w każdym punkcie styku następuje kumulacja błędów. Miarą ich jest więc wektor, będący sumą wektora błędów geometrycznych WMP, błędów głowicy i błędów styku. Ma on swą część systematyczną i przypadkową, opisywaną elipsoidą niepewności, tworząc podstawy nowej koncepcji rozwiniętej przez autora – wektorowego modelu dokładności pomiaru współrzędnościowego. Wiąże się z tym też problem propagacji niepewności pomiaru poprzez algorytmy wyrównawcze stosowane do obliczania elementów zastępczych, mierzonych wielopunktowo elementów kształtu. W tym miejscu należy podkreślić zasługi m.in. Wernera Lotze za opracowanie tego zagadnienia dla przypadku płaskiego, które następnie zostało rozwinięte przez autora dla przypadku trójwymiarowego (prof. J.A. Sładek, PK) [5].

Zaprezentowany drugi nurt podejścia do oceny dokładności pomiarów to też nowa metoda oceny dokładności systemu współrzędnościowego, jaką jest opracowana przez autora metoda macierzowa (prof. J.A. Sładek, PK) [8]. Metoda ta jest niezależna od sposobu identyfikacji punktu pomiarowego, może więc znaleźć zastosowanie, zarówno w przypadku pomiaru stykowego na WMP, jak i bezstykowego, np. w przypadku systemu tomografu komputerowego (CT). W metodzie MM wykorzystuje się wzorce z referencyjnymi elementami kształtu w postaci kul lub otworów lub też siatki wirtualne tworzone z punktów w przestrzeni badanej z zastosowaniem laser trackerów.

Konsekwencją takiego podejścia są nowoczesne modele symulacyjne oparte o sztuczną inteligencję (ang. *artificial intelligence* – AI), maszyny wirtualne (bliźniaki cyfrowe, ang. *digital twins* – DT) i najnowsze narzędzia szacowania niepewności, opracowane w LMW PK, a wykorzystujące w tym zakresie: sztuczne sieci neuronowe (prof. J.A. Sładek) [8] czy metodę Monte Carlo (prof. Adam Gąska) [9]. Ważnym kierunkiem jest unikalna koncepcja modelowania tak popularnych ostatnio systemów redundantnych (współrzędnościowych ramion pomiarowych), opracowana też w LMW PK przez prof. Ksenię Ostrowską [10]. Pokazuje ona, że modelowanie współrzędnościowych systemów pomiarowych (WSP) nie ogranicza się tylko do maszyn pomiarowych, ale może być

stosowane w przypadku innych systemów. Jest to ważne, gdyż otwiera nowe obszary badawcze, które mogą objąć też systemy optyczne (praca doktorska dr. inż. Wiktora Harmatysa) [11] i laserowe (praca doktorska dr. inż. Macieja Gruzy) [12].

Konieczne są też badania, które poszerzają obszar modelowania na systemy obrazowania, w tym tomografy. Istotne badania nad ich stosowaniem zawarto w monografii habilitacyjnej prof. Bartosza Gapińskiego [13]. Można więc stwierdzić, że problematyka opracowania, a przede wszystkim upowszechnienia metod oceny dokładności pomiaru współrzędnościowego, jest zadaniem kluczowym dla rozwoju metrologii stosowanej m.in. w inżynierii produkcji.

Istotny obszar metrologii współrzędnościowej to pomiar w warunkach dynamicznych, tj. obiektów w ruchu – czyli metrologia 4D. W kraju istotne zasługi w tym obszarze zawdzięczamy prof. Małgorzacie Kujawińskiej i zespołowi kierowanemu przez prof. Roberta Sitnika z Politechniki Warszawskiej [14, 15], który skupia się na obrazowaniu i pomiarze w warunkach dynamicznych osób (media, diagnostyka medyczna) oraz, wraz z LMW PK, na pomiarze w trakcie ruchu linii produkcyjnej (metrologia *in-line*).

Wszystkie jednak obszary zastosowań integruje idea czwartej rewolucji przemysłowej – Przemysłu 4.0. (czy już obecnie 5.0). Jej istotą jest przetwarzanie wielkiej ilości danych pomiarowych z obszaru pomiaru i obrazowania, produkcji czy eksploatacji obiektów (nie tylko technicznych) oraz ich gromadzenie w chmurze informacyjnej (ang. *cloud computing*). We współczesnym przemyśle i mediach, danych o wymiarach może dostarczyć tylko metrologia współrzędnościowa. Realizuje ona identyfikację w wybranym obszarze przestrzeni obiektów fizycznych i łączy je z warstwą obliczeniową, kreującą z punktów pomiarowych wirtualny obraz 3D przedmiotu pomiaru (model cyber-fizyczny pomiaru współrzędnościowego). Operuje zatem wielkimi zbiorami danych (ang. *Big Data*), a w sprzężeniu z imperatywem decyzji wpływa zasadniczo na efekt jakościowy procesu wytwarzania (ang. *smart factory*) i wprowadza takie koncepcje jak *in-line 4D metrology*. Metrologia współrzędnościowa wpisuje się zatem idealnie właśnie w wymogi czwartej rewolucji przemysłowej (niem. *Industrie 4.0*) i stanowi, jak zawsze, główny czynnik rozwoju i innowacji cywilizacji technicznej [16].

2.1. Krajowe ośrodki badawcze – ich dorobek naukowy i wyposażenie techniczne

Pierwsze prace w obszarze techniki współrzędnościowej dotyczyły konstrukcji maszyn pomiarowych i były one realizowane w Instytucie Obróbki Skrawaniem w Krakowie. Wyprodukowano tam wiele maszyn z serii MP 700 czy MP 1000, które zainstalowano w latach 70. i 80. głównie w polskim przemyśle.

Początki rozwoju naukowego w obszarze metrologii współrzędnościowej w Polsce, to prace zainicjowane pod koniec lat 70. na Politechnice Krakowskiej. Zainstalowano tu w 1979 r. pierwszą, wśród polskich uczelni, współrzędnościową maszynę pomiarową oraz pierwszy wieloosiowy interferometr laserowy. Przede wszystkim zrealizowano także w ramach Centralnego Programu Badań Podstawowych (CPBP) i Centralnego Programu Badawczo-Rozwojowego (CPBR) dwa 5-letnie projekty, tworząc podstawy naukowe i techniczne badań nad tą nową (wtedy) techniką w Polsce. Badania te doprowadziły m.in. do rozwiązań konstrukcyjnych głowic (sond) stykowych wdrożonych do produkcji w firmach Bipropol i Metronom. Założenia konstrukcyjne były rozwijane potem przez prof. J.A. Śladka we współpracy z Leitz Messtechnik GmbH. Przełomem w badaniach i stosowaniu techniki współrzędnościowej była instalacja, w 1993 r., jednej z najdokładniejszych na świecie maszyn pomiarowych – PMM 12.10.6 Leitz Messtechnik. Był to efekt współpracy prof. J.A. Śladka właśnie z Leitz Messtechnik GmbH Wetzlar w zakresie konstrukcji i badania super dokładnych głowic (sond) stykowych. Instalacja ta, unikalna w skali uczelni technicznych na świecie, wymagała w tym czasie specjalnej zgody agencji NATO, decydujących o eksporcie najwyższych technologii. Wprowadziło to

Polskę do grupy krajów, które prowadzą najbardziej zaawansowane badania nad dokładnością systemów współrzędnościowych na świecie. Utworzone wtedy na Politechnice Krakowskiej laboratorium (Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej) stale się rozwija i podejmuje nowe zadania badawcze, stając się liderem w obszarze metrologii współrzędnościowej. Od 2010 r. LMW PK jest laboratorium akredytowanym (nr akredytacji: AP 132) przez Polskie Centrum Akredytacji (PCA) w zakresie wzorcowania systemów współrzędnościowych oraz części maszyn i wzorców metodami współrzędnościowymi. Jego zdolność pomiarowa (ang. *calibration and measurement capability* – CMC), potwierdzana poprzez badania porównawcze, pozwala na zaliczenie LMW PK do najlepszych laboratoriów pomiarów współrzędnościowych na świecie. Laboratorium może pochwalić się też bardzo szerokim zakresem wzorcowań. Ponadto pozyskuje nową aparaturę, czego przykładem są systemy tomografii i nanometrologii oraz aktualnie budowane jest Laboratorium Ultraprecyzyjnych Pomiarów Współrzędnościowych (w ramach NSMET).

Na Politechnice Warszawskiej pierwsze prace naukowe w obszarze MW zapoczątkował prof. E. Ratajczyk pod koniec lat 80. XX w. Były one związane z zakupem maszyny pomiarowej KEMKO, a następnie nowoczesnych maszyn pomiarowych i tomografu firmy Zeiss. Efektem działań były prace doktorskie oraz książki naukowe wymienione w następnej części opracowania. Obecnie prace w obszarze MW kontynuuje prof. Adam Woźniak. Osobną aktywność w zakresie optycznej MW na Politechnice Warszawskiej rozpoczęła prof. Małgorzata Kujawińska i potem prof. Robert Sitnik. Dzięki nim m.in. zainicjowano badania nad MW 4D (metrologia 4D). Zakup maszyny pomiarowej przez Politechnikę Poznańską dał także początek badaniom rozpoczętym przez prof. Jana Chajdę i kontynuowanym przez niego w Akademii Kaliskiej im. Prezydenta Stanisława Wojciechowskiego w Kaliszu (obecnie Uniwersytet Kaliski), gdzie stworzył laboratorium bardzo wysokiej klasy. Na Politechnice Poznańskiej prace z obszaru MW są prowadzone przez prof. Michała Wieczorowskiego, dzięki któremu zorganizowano świetnie wyposażone laboratoria w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych Instytutu Technologii Mechanicznej. Laboratorium Techniki Współrzędnościowej może poszczycić się wyposażeniem w dokładne maszyny pomiarowe i tomograf. Istotne badania w obszarze MW zainicjowano w ATH w Bielsku-Białej (obecnie Uniwersytet Bielsko-Bialski) na początku lat

90. XX w. pod kierunkiem prof. Jana Szadkowskiego i prof. Władysława Jakubca. Obecnie kontynuowane są one przez prof. Wojciecha Płowuchę w Laboratorium Metrologii, które posiada akredytację PCA jako laboratorium wzorujące. Dalsze prace naukowe realizowane były także na Politechnice Białostockiej (prof. Małgorzata Poniatowska) i Politechnice Rzeszowskiej (prof. Andrzej Kawalec i prof. Marek Magdziak). W Głównym Urzędzie Miar (GUM) prace nad zagadnieniami MW rozpoczęto pod kierunkiem Zbigniewa Ramotowskiego w latach 90. XX w. – po zakupie maszyny pomiarowej SIP CMM5. Obecnie kieruje nimi Dariusz Czułek.

W dalszej części opracowania zaprezentowano tematy prac doktorskich i habilitacyjnych. Pozwalają one na zorientowanie się w tematyce prac naukowych realizowanych w poszczególnych ośrodkach. Mówią też wiele o stanie kadry naukowej w obszarze MW w kraju.

2.1.1. Tematy prac naukowych, w tym doktorskich i habilitacyjnych, książki naukowe

Metrologia współrzędnościowa ma już ugruntowaną pozycję naukową w kraju. Jest to potwierdzone licznymi pracami badawczymi i grantami zarówno krajowymi, jak i zagranicznymi, a także uzyskanymi stopniami i tytułami naukowymi.

Politechnika Krakowska ma największe i pionierskie zasługi dla rozwoju naukowego MW – tu powstała pierwsza praca doktorska, a potem habilitacyjna z obszaru naukowego metrologii współrzędnościowej (prof. J.A. Sładek). Do 2023 r. przygotowano 18 prac doktorskich i 3 prace habilitacyjne (prof. J.A. Sładek, prof. A. Gąska, prof. K. Ostrowska) oraz uzyskano 1 tytuł naukowy profesora (prof. J.A. Sładek). Zrealizowano kilkanaście dużych projektów naukowo-badawczych i rozwojowych, w tym też 3 europejskie.

Inne ośrodki związane z MW to:

- Politechnika Warszawska – zaznacza się tu niezwykle aktywność prof. E. Ratajczyka, aktualnie kontynuowaną przez prof. A. Woźniaka – efektem jest 6 prac doktorskich i 1 praca habilitacyjna (prof. A. Woźniak) oraz uzyskany 1 tytuł naukowy profesora (prof. A. Woźniak), przy czym należy także podkreślić grupę prof. M. Kujawińskiej i prof. R. Sitnika w obszarze optycznej MW, w tym przestrzennego skanowania optycznego – efektem jest 6 prac doktorskich i 1 praca

habilitacyjna (prof. R. Sitnik) oraz uzyskany 1 tytuł naukowy profesora (prof. R. Sitnik),

- Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku Białej (obecnie Uniwersytet Bielsko-Bialski) – tu istotne znaczenie miała działalność prof. W. Jakubca i prof. J. Szadkowskiego, kontynuowana teraz przez prof. W. Płowuchę – efektem jest 5 prac doktorskich i 2 prace habilitacyjne (prof. W. Jakubiec i prof. W. Płowucha),
- Politechnika Poznańska – działalność zapoczątkowana przez prof. J. Chajdę, a aktualnie kontynuowana przez prof. M. Wieczrowskiego - efektem jest 5 prac doktorskich i 1 praca habilitacyjna (prof. B. Gapiński),
- Politechnika Białostocka – 1 praca habilitacyjna (prof. M. Poniatowska),
- Politechnika Rzeszowska – 1 praca doktorska i 1 praca habilitacyjna (prof. M. Magdziak).

Prace habilitacyjne

Wśród prac habilitacyjnych należy wymienić:

1. Dr hab. inż. Jerzy Andrzej Sładek: „Modelowanie i ocena dokładności maszyn i pomiarów współrzędnościowych”, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 2002,
2. Dr hab. inż. Władysław Jakubiec: „Analityczne wyznaczanie niepewności pomiaru we współrzędnościowej technice pomiarowej”, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, 2008,
3. Dr hab. inż. Adam Woźniak: „Dokładność głowic pomiarowych maszyn współrzędnościowych”, Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, 2011,
4. Dr hab. inż. Robert Sitnik: „Odwzorowanie kształtu obiektów trójwymiarowych z wykorzystaniem oświetlenia strukturalnego”, Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, 2011,
5. Dr hab. inż. Małgorzata Poniatowska: „Pomiary współrzędnościowe i analiza odchyłek geometrycznych powierzchni swobodnych”, Politechnika Białostocka, 2012,
6. Dr hab. inż. Adam Gąska: „Symulacyjny system oceny niepewności pomiarów współrzędnościowych realizowanych w warunkach

- przemysłowych”, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 2018,
7. Dr hab. inż. Ksenia Ostrowska: „Ocena i korekcja dokładności redundantnych systemów współrzędnościowych”, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 2019,
 8. Dr hab. inż. Bartosz Gapiński: „Obrazowanie i pomiary w technicznej tomografii komputerowej ze szczególnym uwzględnieniem przedmiotów wykonanych technikami przyrostowymi i analizy nierówności powierzchni”, Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, 2019,
 9. Dr hab. inż. Wojciech Płowucha: „Wyznaczanie niepewności pomiarów współrzędnościowych metodą analizy wrażliwości”, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, 2021,
 10. Dr hab. inż. Marek Magdziak: „Wybrane zagadnienia planowania strategii stykowych pomiarów współrzędnościowych powierzchni krzywoliniowych wyrobów”, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, 2021.

Prace doktorskie

Prace doktorskie realizowane w obszarze MW to:

1. Dr inż. Jerzy A. Śladek: „Ocena dokładności głowic stykowych w wielokoordynatowych maszynach pomiarowych”, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 1990,
2. Dr inż. Marek Kowalski: „Analiza wybranych zarysów z odchyłkami kształtu za pomocą przyrządów 3-koordynatowych”, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 1993,
3. Dr inż. Barbara Juras: „Metoda pomiaru zarysu o zmiennej krzywiznie na wielowspółrzędnościowej maszynie pomiarowej”, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 1997,
4. Dr inż. Grzegorz Sokal: „Metoda podwyższenia dokładności pomiarów współrzędnościowych dokonywanych przez roboty przemysłowe”, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 2005,
5. Dr inż. Marcin Krawczyk: „Metoda oceny dokładności współrzędnościowych maszyn pomiarowych z zastosowaniem laserowego wzorca stopniowego”, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 2005,

6. Dr inż. Robert Kupiec: „Korekcja oddziaływań termicznych we współrzędnościowych maszynach pomiarowych”, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 2007,
7. Dr inż. Magdalena Kupiec: „Optyczno-stykowa metoda pomiarów współrzędnościowych”, Politechnika Krakowska, 2008,
8. Dr inż. Michał Muzyka-Żmudzki: „Metoda oceny dokładności Wielkogabarytowych Współrzędnościowych Maszyn Pomiarowych (WgWMP) przy zastosowaniu małych wzorców”, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 2009,
9. Dr inż. Ksenia Ostrowska: „Metoda oceny dokładności pomiarów realizowanych przy zastosowaniu współrzędnościowych ramion pomiarowych”, Politechnika Krakowska, 2010,
10. Dr inż. Adam Gąska: „Modelowanie dokładności pomiaru współrzędnościowego z wykorzystaniem Metody Monte Carlo”, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 2011,
11. Dr inż. Ingo Lindner: „Creation of In-Process Measurement System to Control Dimensional and Process Parameters”, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 2016,
12. Dr inż. Tim Eichner: „Finding of Geometrical Parameters as a Base of In-Process Metrology System in WPM Gear Forming”, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 2016,
13. Dr inż. Kamila Gromczak: „Validation Model of Coordinate Measuring Methods”, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 2016,
14. Dr inż. Danuta Szewczyk: „Opracowanie modelu niepewności w współrzędnościowych pomiarach optycznych”, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 2018,
15. Dr inż. Sławomir Jurkowski: „Metoda poprawy zdolności procesu wytwórczego poprzez korekcję błędu systematycznego współrzędnościowego ramienia pomiarowego”, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 2022,
16. Dr inż. Piotr Gąska: „Modelowanie dokładności głowic pomiarowych wykorzystywanych w pięcioosiowych systemach współrzędnościowych”, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 2022,
17. Dr inż. Wiktor Harmatys: „Modelowania dokładności optycznych współrzędnościowych maszyn pomiarowych”, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 2022,

18. Dr inż. Maciej Gruza: „Symulacyjny model dokładności pomiaru realizowanego laserowymi systemami nadążnymi”, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 2024,
19. Dr inż. Tuan Anh: „Opracowanie metody badania niedokładności współrzędnościowej maszyny pomiarowej na podstawie statystycznego planu rotalnego”, Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, 1992,
20. Dr inż. Hossam Sidki: „Metrological Analysis of Selected Methods of Testing the Accuracy of Coordinate Machines”, Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, 1995,
21. Dr inż. Adam Woźniak: „Badania impulsowych sond maszyn współrzędnościowych”, Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, 2002,
22. Dr inż. Grzegorz Krajewski: „Opracowanie metody badania błędów dynamicznych w pomiarach skaningowych na maszynach współrzędnościowych”, Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, 2014,
23. Dr inż. Maciej Jankowski: „Metoda badania dokładności sond impulsowych w obrabiarkach CNC z zastosowaniem wzorca przestrzennego”, Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, 2014,
24. Dr inż. Michał Rak: „Fuzja danych o wysokiej gęstości i niskiej dokładności oraz danych o niskiej gęstości i wysokiej dokładności w technice współrzędnościowej”, Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, 2016,
25. Dr inż. Tomasz Kowaluk: „Metoda wyznaczania granicy powietrze-materiał do zastosowań inżynierskich”, Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, 2016,
26. Dr inż. Robert Sitnik: „Zautomatyzowany system pomiaru, analizy i eksportu danych obiektów trójwymiarowych do systemów inżynierskich i multimedialnych”, Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, 2002,
27. Dr inż. Grzegorz Mączkowski: „Metoda pomiaru widmowego współczynnika odbicia powierzchni obiektów trójwymiarowych”, Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, 2016,
28. Dr inż. Maciej Karaszewski: „Zautomatyzowany system do wysokorozdzielczej digitalizacji kształtu 3D”, Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, 2018,
29. Dr inż. Marcin Adamczyk: „Metoda kompensacji wpływu temperatury na odwzorowanie geometrii 3D z wykorzystaniem techniki

- oświetlenia strukturalnego”, Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, 2019,
30. Dr inż. Marta Natalia Nowak: „Metoda analizy danych pomiarowych reprezentujących geometrię ciała człowieka w ruchu do zastosowań w animacji trójwymiarowej”, Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, 2022,
 31. Dr inż. Piotr Siekański: „Metoda lokalizacji kamery w złożonych warunkach środowiskowych na potrzeby analizy danych 3D”, Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, 2022,
 32. Dr inż. Paweł Swornowski: „Walidacja i badanie dokładności algorytmów oprogramowań maszyn współrzędnościowych”, Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, 2002,
 33. Dr inż. Maciej Szalewski: „Metrologiczna analiza dyskretyzacji na współrzędnościowych maszynach pomiarowych i modelowania w systemie CAD wybranych elementów w procesie inżynierii odwrotnej”, Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, 2009,
 34. Dr inż. Piotr Znaniecki: „Koncepcja systemu nadzorowania współrzędnościowych maszyn pomiarowych w warunkach produkcyjnych”, Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, 2013,
 35. Dr inż. Robert Koteras: „Wpływ łączenia skanów na dokładność pomiaru skanerem optycznym”, Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, 2018,
 36. Dr inż. Wojciech Płowucha: „Ocena dokładności pomiaru powierzchni swobodnych na maszynach współrzędnościowych”, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, 2005,
 37. Dr inż. Marcin Starczak: „Optymalizacja strategii pomiarowych we współrzędnościowej technice pomiarowej”, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, 2006,
 38. Dr inż. Mirosław Wojtyła: „Wymiarowanie pod kątem wymagań funkcjonalnych oraz dokładność pomiarów elementów rurkowych i ich sprawdzianów”, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, 2010,
 39. Dr inż. Norbert Wisła: „Ocena wpływu wykorzystania przedmiotu wzorcowego na zdolność procesów wytwarzania części maszyn”,

- Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, 2014,
40. Dr Inż. Jacek Gogół: „Ocena błędów geometrycznych współrzędnościowych maszyn pomiarowych, wywołanych zjawiskami termicznymi”, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, 2016,
41. Dr inż. Marek Magdziak: „Metoda pomiaru powierzchni swobodnych na obrabiarce sterowanej numerycznie”, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, 2012,
42. Dr inż. Krzysztof Gawlik: „Metoda symulacyjna prognozowania dokładności pomiaru współrzędnościowego”, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, 2010.

Publikacje książkowe

Bardzo pomocne w upowszechnianiu wiedzy i kształceniu doktorantów oraz studentów z zakresu metrologii współrzędnościowej okazały się następujące publikacje książkowe:

- Eugeniusz Ratajczyk: „Współrzędnościowa technika pomiarowa – maszyny i roboty pomiarowe”, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1994,
- Eugeniusz Ratajczyk: „Współrzędnościowa technika pomiarowa”, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 2005,
- Eugeniusz Ratajczyk, Adam Woźniak: „Współrzędnościowa technika pomiarowa”, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 2018,
- Jerzy A. Śladek: „Dokładność pomiarów współrzędnościowych”, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2011,
- Jerzy A. Śladek: „Coordinate Metrology – Accuracy of Systems and Measurements”, Springer Verlag, 2016.

Istotne znaczenie mają też wielokrotnie wznawiane książki, takie jak:

- Władysław Jakubiec, Jan Malinowski: „Metrologia wielkości geometrycznych”, Wydawnictwo Naukowe PWN, WNT – w dużej części poświęcona również zagadnieniom MW,
- Władysław Jakubiec, Sławomir Zator, Paweł Majda: „Metrologia – Zarządzenie i Inżynieria Produkcji”, Wydawnictwo PWE.

Ukazał się też szereg monografii będących podstawą uzyskania stopni naukowych doktora czy też doktora habilitowanego.

Konferencje naukowe

W kraju metrologia współrzędnościowa była i jest aktualnie rozwijana w kilku ośrodkach, pomiędzy którymi zawiązała się dobra i harmonijna współpraca. Jej efektem są prace naukowe, a przede wszystkim cykliczne, najpierw krajowe, a obecnie międzynarodowe konferencje naukowe, takie jak:

- „Coordinate Measuring Technique” – organizowana przez Akademię Techniczno-Humanistyczną w Bielsku-Białej (obecnie Uniwersytet Bielsko-Bialski) od blisko 30 lat – jest to najstarsza międzynarodowa konferencja naukowa na świecie z obszaru współrzędnościowej techniki pomiarowej,
- „Metrologia w Technikach Wytwarzania” – organizowana co dwa lata, każdorazowo przez inną krajową uczelnię techniczną.

Ostatnim efektem wspólnego działania ośrodków naukowych w Polsce w obszarze metrologii współrzędnościowej jest Narodowa Sieć Metrologii Współrzędnościowej (NSMET), której liderem jest Politechnika Krakowska. Sieć grupuje takie jednostki jak: Politechnika Warszawska, Politechnika Poznańska i Politechnika Świętokrzyska oraz pośrednio też Główny Urząd Miar (ze Świętokrzyskim Kampusem Laboratoriów GUM).

2.1.2. Projekty naukowo-badawcze (krajowe/międzynarodowe)

Dla Politechniki Krakowskiej wymieniono projekty z obszaru metrologii współrzędnościowej od początku aktywności, czyli od lat 80. XX w. Z uwagi na brak takich informacji z innych uczelni, w ich przypadku ograniczono się tylko do ostatnich lat. Poniżej wymieniono projekty międzynarodowe oraz krajowe (granty badawcze – rozwojowe i celowe, finansowane przez Komitet Badań Naukowych (KBN), Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW), Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBR) oraz Ministerstwo Edukacji i Nauki (MEiN)).

Politechnika Krakowska

Wśród projektów realizowanych na Politechnice Krakowskiej należy wymienić:

1. „World Class Manufacturing Implementation by Restructuring Engineering Courses: Culture-change by University/Industry

- Cooperation” – projekt JEP nr 07685 w ramach programu TEMPUS – realizowany wspólnie przez Politechnikę Krakowską, Akademię Techniczno-Humanistyczną w Bielsku-Białej, Fachhochschule we Frankfurcie nad Menem oraz University of Central England w Birmingham – jednym z pomysłodawców był prof. J.A. Sładek,
2. „The European Virtual Institute of Geometry Measurement” (EVI-GeM) – projekt w ramach Fifth Framework Programme – GROWTH (2002–2007) – koordynowany przez Technische Universität w Bremie (Niemcy), a realizowany wspólnie z laboratoriami europejskimi, takimi jak: LMW PK, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) (Niemcy), IBS Eindhoven (Holandia), TU Kopenhaga (Dania), Czech Metrological Institute (CMI) (Czechy), QFZ TU Erlangen (Niemcy), Unimetrik (Hiszpania), Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM) (Włochy), ETALON-AG (Niemcy), Leitz Messtechnik GmbH (Niemcy), Carl Zeiss IMT Oberkochen (Niemcy), Hexagon Metrology (Szwecja) oraz ETH Zurich (Szwajcaria) – jednym z pomysłodawców był prof. J.A. Sładek, kierownik krajowy projektu,
 3. „Transnational Calibration Expert System” (TRACES) – europejski projekt badawczo-rozwojowy (nr C517456) realizowany w ramach „e-Ten” (2005–2007) – jego uczestnikami, oprócz LMW PK byli: PTB (Niemcy, koordynator projektu), Duński Uniwersytet Techniczny w Kopenhadze, CMI (Czechy), UNIMETRIK (Hiszpania), CERMET (Włochy), niemiecki ośrodek wzorcujący (DKD) FEINMESS (Niemcy), VOUS (Czechy) i ETALON-AG (Niemcy) – jednym z pomysłodawców był prof. J.A. Sładek, kierownik krajowy projektu,
 4. „Training for dimensional metrology in digital manufacturing” (Train4DiM) – project nr 2020-1-PL01-KA203-082036 w ramach programu ERASMUS+ – kierownik projektu: dr hab. inż. Adam Gąska, prof. PK,
 5. „Trustworthy virtual experiments and digital twins (ViDiT)” – projekt nr 22DIT01 realizowany w ramach Europejskiego Partnerstwa w dziedzinie Metrologii, którego koordynatorem jest PTB (Niemcy) – kierownik zespołu badawczego na PK: dr hab. inż. Adam Gąska, prof. PK,
 6. Problem resortowy R.I.3. MSzWiT (Ministerstwo Nauki, Szkolnictwa Wyższego i Techniki): „Wybrane zagadnienia podstawowych

problemów współczesnej metrologii oraz technologii i konstrukcji systemów i urządzeń pomiarowo-kontrolnych”, temat: „Badanie maszyn pomiarowych 3-koordynatowych ze względu na dokładność i wskaźniki techniczno-ekonomiczne” – prace ZMiKT PK, etapy 1–5 (1980–1984), główny wykonawca: prof. J.A. Sładek i dr inż. M. Kowalski,

7. „Badania metrologiczne maszyn pomiarowych i urządzeń ze szczególnym uwzględnieniem dokładności geometrycznej, pozycjonowania i strategii pomiarów” – projekt nr 02.20 (1985–1989) w ramach CPBP, główny wykonawca: prof. J.A. Sładek i dr inż. M. Kowalski,
8. „Opracowanie wirtualnej, wielowspółrzędnościowej maszyny pomiarowej z zastosowaniem do badań i korekcji błędów obiektów rzeczywistych i optymalizacji pomiarów” – grant badawczy KBN nr PB 1367/T0795/08 (1995–1998), pomysłodawca i główny wykonawca: prof. J.A. Sładek, kierownik grantu: dr inż. M. Kowalski,
9. „Opracowanie systemu oceny dokładności pomiarów oraz metody identyfikacji własnego pola błędów współrzędnościowych maszyn pomiarowych” – grant nr PB 0921/T07/99/17 (1999–2001), kierownik grantu i główny wykonawca: prof. J.A. Sładek,
10. „Opracowanie systemu oceny dokładności pomiarów realizowanych na wielkogabarytowych współrzędnościowych maszynach pomiarowych” – grant nr 5 T07D 03824 (2003–2005), kierownik grantu i główny wykonawca: prof. J.A. Sładek,
11. „Metoda podwyższenia dokładności pomiarów współrzędnościowych dokonywanych przez roboty przemysłowe” – grant nr 4 T07D 01426 (2004–2005), kierownik grantu: prof. J.A. Sładek,
12. „Metoda oceny dokładności współrzędnościowych maszyn pomiarowych z zastosowaniem laserowego wzorca stopniowego” – grant promotorski nr 4 T07D 015 (2004–2005), kierownik grantu: prof. J.A. Sładek,
13. „Opto-numeryczny system do pomiaru elementów geometrycznych zintegrowany z Współrzędnościową Maszyną Pomiarową” – grant badawczy nr 3T10C010/29 (2005–2007), realizowany wspólnie z Instytutem Mikromechaniki i Fotoniki Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej,
14. „Korekcja oddziaływań termicznych we współrzędnościowych maszynach pomiarowych” – grant nr 4 T07D 01530 (2006–2007), kierownik grantu: prof. J.A. Sładek,

15. „System metrologicznego nadzoru nad dokładnością maszyn pomiarowych robotów i obrabiarek z wykorzystaniem wzorców i interferometrycznych laserowych systemów śledzących jako podstawa wzrostu jakości produkcji przemysłu maszynowego” – projekt badawczo-rozwojowy nr R03 029 01 (2006–2009), kierownik projektu: prof. J.A. Sładek,
16. „Metoda oceny dokładności Wielkogabarytowych Współrzędnościowych Maszyn Pomiarowych (WgWMP) przy zastosowaniu małych wzorców” – grant nr 1261/T02/2007/32 (2007), kierownik grantu: prof. J.A. Sładek,
17. „Metoda oceny dokładności pomiarów realizowanych redundantnymi systemami współrzędnościowymi (RSW)” – projekt badawczy nr N505 255935 (2008–2010), kierownik projektu: prof. J.A. Sładek,
18. „Badania rozwojowe nad wzorcowaniem (z wykorzystaniem Laser Trackera) i wyznaczaniem niepewności pomiarów dla systemów współrzędnościowych” – projekt rozwojowy nr 0869/R/T022010/10/ (2010–2013), kierownik projektu: prof. J.A. Sładek,
19. „Opracowanie i wdrożenie do produkcji kompleksowego bezdotykowego systemu pomiaru obiektów przestrzennych przystosowanego do realizacji precyzyjnych pomiarów metrologicznych w warunkach wysokiego nasłonecznienia” – projekt nr POIR.01.01.01-00-0376/15 (2015–2018), LMW PK uczestniczyło w projekcie jako podwykonawca,
20. „Opracowanie i wdrożenie do produkcji kompleksowego bezdotykowego systemu pomiaru obiektów przestrzennych przystosowanego do realizacji precyzyjnych pomiarów metrologicznych w warunkach wysokiego nasłonecznienia” – projekt nr POIR.01.01.01-00-0376/15 (2016–2018), współpraca z firmą Smarttech Sp. z o.o., kierownik projektu: prof. J.A. Sładek,
21. „Opracowanie optycznej technologii pozycjonowania przestrzennego i nawigacji w zastosowaniach pomiarowych dla przemysłu opartej na pozycjonowaniu pasywnych markerów w świetle widzialnym” – projekt nr POIR.01.01.01-00-0004/16 (2016–2019), LMW PK uczestniczyło w projekcie jako podwykonawca,
22. „Fantom do testów eksploatacyjnych urządzeń radioterapeutycznych w teleradioterapii” – projekt nr POIR.04.01.04-00-0014/16 (2017–2020),

23. „Automatyczna linia kontroli i badania jakości pierścieni i obręczy z inteligentnym systemem identyfikacji i pomiaru wad wewnętrznych metodą PA, pomiaru błędów kształtu przy użyciu głowic pomiarowych 3D oraz badania własności mechanicznych SMART-HARD” – projekt nr POIR.01.01.01-00-0208/17 (2018–2020), którego beneficjentem była Huta Bankowa Sp. z o.o., kierownik naukowy na PK: prof. J.A. Sładek,
24. „Wirtualny asystent produkcji – system do wspierania procesów produkcyjnych dedykowany dla przetwórstwa przemysłowego” – projekt nr POIR.01.01.01-00-0432/18 (2018–2020), LMW PK uczestniczyło w projekcie jako podwykonawca, wykonawca: dr inż. M Krawczyk, prof. PK,
25. „Mobilna technologia do akwizycji ruchu i tekstury w 4K” – projekt nr POIR.01.01.01.-00-0510/19 (2019–2021), którego beneficjentem była STARS Impresariat Sp. z o.o., Sp. k., a jednym z wykonawców był również Wydział Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, kierownik naukowy na PK: prof. J.A. Sładek,
26. „Budowa unikalnej linii wytwarzania z systemem sensorów i robotów współrzędnościowych” – projekt w ramach projektu „REG – region uczący się”, nr POWR.03.05.00-00-ZR28/18 (2019-2023), kierownik projektu (w skali PK): prof. K. Ostrowska,
27. „System oceny dokładności pomiarów współrzędnościowych *on-line* realizowanych urządzeniami redundantnymi” – projekt w ramach programu LIDER NCBR, kierownik projektu: prof. K. Ostrowska,
28. „Metoda oceny dokładności pomiarów współrzędnościowych realizowanych w warunkach przemysłowych wykonywana w trybie *on-line*” – projekt w ramach programu LIDER NCBR, kierownik projektu: prof. A. Gąska,
29. „Utworzenie Regionalnego Zespołu Akredytowanych Laboratoriów Badawczych i Wzorcujących Wydziału Mechanicznego” – projekt nr RPMP.01.01.00-12-0077/19-00-XVII/20/FE/20 (2020–2022).
30. „Opracowanie Systemu Wirtualnej Maszyny Współrzędnościowej jako narzędzia optymalizacji strategii pomiarowej oraz wyznaczenia niepewności pomiaru współrzędnościowego” – projekt nr PM/SP/0037/2021/1 (2022–2024) realizowany w ramach programu „Polska Metrologia” MEiN,
31. „Opracowanie podstaw hierarchicznych pomiarów dużych obiektów inżynierskich z wykorzystaniem metod punktowych

- i polowych” – projekt nr PM/SP/0058/2021/1 (2022–2024) realizowany w konsorcjum w ramach programu „Polska Metrologia” MEiN,
32. „Analiza możliwości zastosowania sztucznej inteligencji w pomiarach nierówności powierzchni” – projekt nr PM/SP/0021/2021 realizowany w konsorcjum w ramach programu „Polska Metrologia” MEiN, kierownik zespołu badawczego na PK: prof. A. Gaska.

Politechnika Warszawska

Poniżej przedstawiono wybrane projekty związane z MW realizowane na Politechnice Warszawskiej (PW):

1. „Phase microscopy and tomography new approach to 3D measurements of biological and technological structures 3DPHASE” – projekt nr TEAM/2011-7/7 realizowany w ramach programu TEAM POIG Fundacji na rzecz Nauki Polskiej (2011–2015),
2. „Grafenowe pasty i atramenty do drukowania ścieżek i warstw przechodzących w zastosowaniu do zabezpieczenia dokumentów (GRAFINKS)” – projekt nr GRAF-TECH/NCBR/09/07/2013 (2013–2015), realizowany w ramach programu GRAF-TECH,
3. „BiOpTo: Tomograficzny mikroskop fazowy do zastosowań w biomedycynie” – projekt nr POIR.04.04.00-00-1C1D/16-00 (TEAM-TECH/2016-1/4) realizowany w ramach programu TEAM-TECH (POIR) Fundacji na rzecz Nauki Polskiej (2016–2022),
4. „Przyspieszenie fotonicznej innowacji dla SMEs: inkubator z kompleksową obsługą (premia na Horyzoncie ACTPHAST 4.0)” – projekt w ramach programu ramowego UE Horyzont 2020 (2018–2021),
5. „Innowacyjne stanowisko badawczo-treningowe symulator Inspekcji Transportu Drogowego” – projekt nr DOB-BIO10/17/03/2019 na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa (2020–2023).

Politechnika Świętokrzyska

Projekty realizowane na Politechnice Świętokrzyskiej (PŚk) w tematyce MW to m.in.:

1. „Opracowanie metod badań łożysk tocznych w aspekcie współczesnych wymagań wyrobów o wyższych parametrach eksploatacyjnych” – projekt nr N R03 0025 10/2010 (2010–2014),

2. „Badania i ocena wiarygodności nowoczesnych metod pomiaru topografii powierzchni w skali mikro i nano” – projekt nr PBS2/A6/20/2013 (2013–2016),
3. „Utworzenie Centrum B+R w FŁT-Kraśnik S.A.” – projekt nr POIR.02.01.00-00-0051/16-00 (2015–2019), którego beneficjentem była Fabryka Łóżysk Tocznych – Kraśnik S.A., a projekt został zrealizowany we współpracy z PŚk.

Politechnika Poznańska

Wśród projektów realizowanych na Politechnice Poznańskiej (PP) w obszarze MW należy wskazać:

1. „Opracowanie technologii wytwarzania nowej generacji ultralekkich foteli do komunikacji zbiorowej spełniających wymagania dyrektyw UE, regulaminów ONZ oraz Białej Księgi Amerykańskiej” – projekt nr K2/IN2/58/182896/NCBR/13 w ramach programu InnoTech (2013–2015),
2. „Technologia bazowania, ustalania i obróbki korpusów obrabiarek” – projekt nr K3/IN3/15/226458/NCBR/14 w ramach programu InnoTech (2014–2017),
3. „Laseryczne wspomaganie obróbki skrawaniem nadstopów i stopów tytanu stosowanych w konstrukcjach silników lotniczych” – projekt nr PBS3/B5/36/2015 (2015–2018),
4. „Innowacyjny zintegrowany system zapewnienia stabilności procesu wielooperacyjnego kształtowania blach karoseryjnych” – projekt nr POIR.01.02.00-00-0273/16 (2017–2019), którego beneficjentem była GESTAMP POLSKA Sp. z o.o., a PP była wykonawcą usług badawczych,
5. „Automatyczna linia kontroli i badania jakości pierścieni i obręczy z inteligentnym systemem identyfikacji i pomiaru wad wewnętrznych metodą PA, pomiaru błędów kształtu przy użyciu głowic pomiarowych 3D oraz badania własności mechanicznych SMART-HARD” – projekt nr POIR.01.01.01-00-0208/17 (2018–2020), którego beneficjentem była Huta Bankowa Sp. z o.o., a PP była wykonawcą usług badawczych,
6. „Modułowy system pakowania produktów w zbiorcze opakowania tekturowe” – projekt nr POIR.01.01.01-00-0538/19 (2020–2021),

którego beneficjentem była firma PROTIM Sp. z o.o., a PP była wykonawcą usług badawczych.

2.1.3. Charakterystyka wyposażenia w systemy współrzędnościowe w kluczowych ośrodkach naukowych i badawczych

Inwestowanie w najnowocześniejsze systemy pomiarowe polskich przedsiębiorstw i znaczące działania państwa we wspomaganiu tego procesu wraz z koniecznym szkoleniem kadr mają kluczowe znaczenie dla jakości wytwarzania i konkurencyjności naszych przedsiębiorstw. Niezwykle ważne jest tu kształcenie na poziomie szkolnictwa zawodowego oraz uczelni technicznych poprzez kursy i studia podyplomowe. Krajowe politechniki są już w większości wyposażone w systemy współrzędnościowe. W ostatnich latach zaznaczył się tu znaczący postęp, przy czym potrzeby i zapóźnienie w stosunku do uczelni z krajów najbardziej rozwiniętych są nadal duże. W poprawie tej sytuacji pomocna jest możliwość pozyskania środków z funduszy europejskich. Istotną rolę w zakresie podnoszenia kultury metrologicznej ma program „Polska Metrologia” MEiN, a także, szczególnie w ostatnich latach, integracja wspólnej krajowej polityki metrologicznej przez GUM.

Wstępną ocenę wykorzystania sprzętu pomiarowego z obszaru metrologii współrzędnościowej uzyskano, opierając się na wynikach ankiety przeprowadzonej przez dr inż. Magdalenę Zawadę-Michałowską (Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska). Ankieta ta objęła prawie 1 800 podmiotów przemysłowych i naukowych prowadzących działania w zakresie metrologii. Uzyskano ok. 200 odpowiedzi, w których 24 jednostki zadeklarowały działanie w samym obszarze metrologii współrzędnościowej, co w powiązaniu z metrologią geometryczną, przemysłową i optyczną daje jeszcze lepszy wynik (możliwość wielokrotnego wyboru). Świadczy to o znaczeniu tego obszaru metrologii. W zakresie sprzętu pomiarowego dominują stykowe współrzędnościowe maszyny pomiarowe, potem optyczne i multisensoryczne oraz skanery laserowe. Analiza grup respondentów z różnych obszarów metrologii pokazała, że ok. 1/3 stanowiły jednostki naukowe, a 1/3 laboratoria akredytowane. Zatem bardzo niedoszacowane są jednostki przemysłowe, gdzie metrologia współrzędnościowa ma największe znaczenie. Zauważalne

jest też niedostateczne wyposażenie w nowoczesne systemy pomiarowe (tomografy i laser trackery). Mało też jest skanerów, które są kluczowe w zastosowaniach metrologii *on-line* na zautomatyzowanych i zrobotyzowanych liniach produkcyjnych.

Poniżej zaprezentowano aktualne wyposażenie w systemy pomiarowe, szczególnie współrzędnościowe, w kluczowych jednostkach naukowych i badawczych zajmujących się tym obszarem metrologii.

Politechnika Krakowska

W Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Politechniki Krakowskiej znajdują się: WMP o dokładności referencyjnej Leitz PMM 12.10.6 pracująca w pomieszczeniu zapewniającym stabilność temperatury na poziomie $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$, WMP Zeiss WMM wyposażona w nowoczesną głowicę pomiarową PH20 i REVO firmy Renishaw, maszyna wysięgnikowa Zeiss CERMET, multisensoryczna WMP Zeiss O-Inspect 442, laserowe systemy nadążne laser tracker Leica LTD 840 oraz laser tracker firmy Etalon AG, współrzędnościowe ramiona pomiarowe Romer Absolute Arm oraz Romer Multi Gage, interferometr firmy Renishaw, profilometr Taylor Hobson (wersja laboratoryjna), systemy pomiarowe do zarysów kształtu Taylor Hobson-Talysond, skanery optyczne 3D laserowe i światła strukturalnego, tomograf Phoenix Waygate, systemy optyczne Alicona oraz największa w kraju baza wzorców i urządzeń do sprawdzania współrzędnościowych systemów pomiarowych wraz z unikalnymi wzorcami do nadzorowania dokładności maszyn wielkogabarytowych. Łączna wartość wyposażenia LMW PK to ok. 14,5 mln zł.

Politechnika Warszawska

Na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej znajdują się:

- Laboratorium Zawansowanych Technik Pomiarów Geometrycznych: przemysłowy tomograf komputerowy METROTOM 800 firmy Zeiss, WMP Zeiss ECLIPSE oraz Zeiss ACCURA, konturograf Perthometer PCV firmy Mahr, interferometr laserowy Zeiss LMS 100, nanopozycjoner piezoelektryczny XYZ z kontrolerem (model nanoCube Physik Instrumente), profilometry: optyczny CCI SunStar oraz stykowy PGI 830 firmy Taylor Hobson, przyrząd do pomiaru odchyłek kształtu Talysond 365, urządzenie Form Talysurf PGI 830,

mikrointerferometr Talysurf CCI oraz absolutny tracker laserowy AT901-Basic firmy Leica wraz ze stacją meteo,

- Laboratorium Współrzędnościowych Technik Pomiarowych: WMP KEMCO E 400 firmy Keeling Company, optyczna WMP SmartScope ZIP Lite 250 firmy OGP, siedmioosiowe współrzędnościowe ramię pomiarowe MCA II z głowicą triangulacyjną firmy Nikon oraz przenośny optyczny system pomiarowy HandyPROBE firmy Creaform,
- Laboratorium Scenografii Laserowej i Efektów Świetlnych: skaner laserowy XY firmy Solaris,
- Laboratorium Podstaw Metrologii: stanowisko do sprawdzania pirometrów, skomputeryzowane stanowisko do wyznaczania błędów temperaturowych przetworników ciśnienia oraz stanowisko do sprawdzania manometrów użytkowych,
- Laboratorium Optycznych Metod Badań: tomograf holograficzny pracujący w pełnym kącie projekcji, tomograf holograficzny ze skanującym źródłem, mikroskop holograficzny, mikroskop światła białego, system 3D korelacji obrazu, układ interferometrii siatkowej, zautomatyzowany system światła strukturalnego do pomiarów 4D, współrzędnościowe ramię pomiarowe z głowicą światła strukturalnego, zautomatyzowany system rejestracji hologramów oraz display holograficzny.

Łączna wartość wyposażenia to ok. 9 mln zł.

Politechnika Świętokrzyska

Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii Politechniki Świętokrzyskiej posiada: WMP Prismo Navigator, wielosensorową WMP O-Inspect, wielosensorową maszynę pomiarową Venture, ramię pomiarowe MCAX25 ze skanerem Metris MMDx50, profilometr stykowy Form Talysurf PGI 1230, przyrząd optyczny do pomiarów struktury geometrycznej powierzchni Talysurf CCI Lite, mikroskop sił atomowych Dimension Icon, systemy pomiarowe do zarysów kształtu – Talyrond 365, Talycenta i Talyrond 73, długościomierz ULM Opal 600, interferometr laserowy XL-80, przyrząd do wzorcowania płytek wzorcowych PC 826 oraz przyrząd do wzorcowania czujników Optimar 100. Łączna wartość wyposażenia to ok. 7,5 mln zł.

Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych w Instytucie Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej jest wyposażony w: WMP firmy DEA, współrzędnościowe ramię pomiarowe Tesa, mikrotomograf rentgenowski GE Phoenix v|tome|x s 240, optyczno-stykowe WMP BATY i Werth, współrzędnościowe skanery pomiarowe ATOS, Core i Academia, skaningowy interferometr koherencyjny Veeco NT 1100, mikroskop sił atomowych, profilometry: Hommel T8000, TOPO2, S8P i Form Talysurf, konturograf, przyrządy do pomiarów odchyłek kształtu – Roundscan i Talyrond 73, zestaw pasywnych i aktywnych kamer termowizyjnych, mikroskop holograficzny LynceeTec oraz wibrometr laserowy. Łączna wartość wyposażenia to ok. 7 mln zł.

2.2. Laboratoria badawcze i wzorcujące

Konkurencyjność polskich przedsiębiorstw, szczególnie w zakresie wysokich technologii i innowacji, jest związana z wdrożeniem najnowocześniejszych systemów kontroli i badań jakości w oparciu o współrzędnościowe pomiary przemysłowe od nano- i mikro- do makrowymiarów. Można bowiem przyjąć, że bardzo czułym miernikiem poziomu technologicznego przemysłu danego kraju jest rozwój tzw. kultury metrologicznej i wyposażenie w najnowocześniejsze systemy pomiarów współrzędnościowych. Należy zaznaczyć, że to wyposażenie jest ciągle uzupełniane, ale przykładowo w Polsce jego liczbę wyrazimy w tysiącach, zaś chociażby w Niemczech – w dziesiątkach tysięcy. Wiąże się to z rozwojem wspomnianej kultury metrologicznej, której podstawą jest dbanie o wysoki poziom dokładności pomiarów decydujących o jakości wytwarzania.

Istotną rolę odgrywają tu laboratoria akredytowane, szczególnie wzorcujące (przy czym konieczny jest wzrost ich liczby i kompetencji) oraz ich zaangażowanie w utrzymanie zakresu błędów granicznych użytkowanych systemów pomiarowych.

Wśród istotnych laboratoriów, prowadzących badania z szeroko rozumianych pomiarów współrzędnościowych, geometrycznych, tribologicznych lub optycznych, wymienić można:

- laboratoria wzorcujące oraz badawcze na terenie Polski, które zajmują się metrologią współrzędnościową oraz pomiarami wielkości geometrycznych, tj.:
 - Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Politechniki Krakowskiej,
 - Biuro Techniczne Hałat w Andrychowie,
 - Uniwersytet Bielsko-Bialski,
 - MIKRO POMIAR Mariusz Pałucki w Różynach k. Gdańska,
 - ITA Sp. z o.o. w Poznaniu,
 - ROMB S.A. w Złotowie,
 - Okręgowy Urząd Miar w Krakowie,
 - Okręgowy Urząd Miar w Łodzi,
 - Okręgowy Urząd Miar w Bydgoszczy,
- laboratoria prowadzące badania w różnym zakresie – od pomiarów stykowych i optycznych w skali makro, przez pomiary optyczne w skali mikro i nano, po pomiary tomograficzne:
 - Centrum Pomiarów Współrzędnościowych ZEISS,
 - ITA Sp. z o.o.,
 - Okręgowy Urząd Miar w Krakowie,
 - Okręgowy Urząd Miar w Łodzi,
 - Okręgowy Urząd Miar w Bydgoszczy,
 - laboratoria pomiarowe m.in. na Politechnice Wrocławskiej, Rzeszowskiej czy Uniwersytecie Kaliskim im. Prezydenta Stanisława Wojciechowskiego,
- laboratoria realizujące precyzyjne pomiary tribologiczne znajdujące się w większych państwowych uczelniach technicznych lub instytutach, takich jak:
 - Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie,
- Politechniki:
 - Warszawską,
 - Wrocławską,
 - Rzeszowską,
 - Łódzką,
 - Gdańską,
 - Opolską,
- Sieć Badawczą Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu.

2.3. Normalizacja – polska aktywność w ramach ISO/TC 213/WG 10

Jednym z najistotniejszych komitetów technicznych opracowujących normy w ramach Międzynarodowej Organizacji Normalizacyjnej (ang. International Organization for Standardization – ISO) jest komitet techniczny nr 213 „Dimensional and geometrical product specifications and verification” (TC 213). Komitet ten podjął się nadzorowania właściwie wszystkich istotnych norm z dziedziny specyfikacji geometrycznych wyrobów (ang. *geometrical product specifications* – GPS) oraz ich weryfikacji, włączając w to również pierwszą normę komitetu ISO 1. W ramach obecnie działających wewnątrz komitetu grup roboczych można wyróżnić m.in. grupę nr 10 (WG 10) „Coordinate Measuring Machines” (Współrzędnościowe Maszyny Pomiarowe), która początkowo zajmowała się tylko i wyłącznie samymi maszynami, ale wraz z rozwojem nowych technologii obejmowała coraz szerszą problematykę związaną z tymi maszynami.

2.3.1. Kierunek rozwoju norm serii ISO 10360: *Geometrical product specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS)*

Pierwsza publikacja normy z rodziny 10360 przypada na rok 1994, kiedy to została wydana pierwotna wersja normy ISO 10360-2 opisująca testy odbiorcze i okresowe dla współrzędnościowych maszyn pomiarowych, zdefiniowanych w części pierwszej opublikowanej sześć lat później. Wtedy również (lata 2000–2001) wydano większość norm ISO 10360 dotyczących WMP, definiowanych jako urządzenia stacjonarne mające przynajmniej jedną oś pomiarową, przesuwną. Kolejnym istotnym kamieniem milowym były publikacje norm w latach 2009–2010, które usunęły większość problemów z poprzednich wydań (np. brak możliwości weryfikacji wielkogabarytowych WMP). Przesunięto wtedy również weryfikację głowic stykowych do części piątej (2010 r.), poświęcając część drugą jedynie kontroli błędów długości przy wykorzystaniu głowicy stykowej. Od tego czasu można zauważyć ewolucję rodziny norm ISO 10360 w stronę odseparowania błędu pomiaru długości, odpowiedzialnego za konstrukcję współrzędnościowego systemu pomiarowego, od głowicy pomiarowej, która jak wiadomo może być

zarówno stykowa, jak i bezstykowa. W pierwszej dekadzie XXI w. systemy multisensoryczne stają się już standardem, w związku z czym metody weryfikacji musiały również nadążyć i za tym trendem. W 2011 r. wydana zostaje część siódma odpowiedzialna za weryfikację maszyn pomiarowych wyposażonych w głowicę z możliwością obrazowania (kamery CCD) oraz ujmująca współrzędnościowe mikroskopy pomiarowe, a w 2013 r. także maszyny współrzędnościowe wyposażone w głowice mierzące odległość (głowice laserowe oraz światło strukturalne). W tym roku powstaje również część dziewiąta opisująca weryfikację maszyn multisensorycznych, a właściwie możliwość porównania charakterystyki różnych rodzajów głowic na tej samej WMP. W 2016 r. po raz pierwszy w tytule normy zastosowano pojęcie współrzędnościowego systemu pomiarowego. Część dziesiątą poświęcono laserowym systemom nadążnym. W tym samym roku została wydana część dwunasta poświęcona współrzędnościowym ramionom pomiarowym. Są to pierwsze normy, w których zerwano z wcześniejszą tradycją weryfikacji w układzie kartezjańskim. Jest to przede wszystkim widoczne w części dziesiątej, gdzie laserowe systemy nadążne są weryfikowane testami w układach sferycznych i odpowiadającymi testom producentów – w tym przypadku użytkownik samodzielnie nie jest w stanie ich przeprowadzić. W latach 2020–2021 wydane zostały zaktualizowane części: 10360-5, 10360-10 oraz opracowano nowe wydanie 10360-13 poświęcone skanerom 3D.

Obecnie zauważalny jest trend opisu charakterystyki błędów WSP poprzez trzy główne parametry:

- błąd pomiaru długości E – mający na celu zobrazowanie stanu współrzędnościowego systemu pomiarowego, przy czym obecnie prowadzone prace polegają na „wyekstrahowaniu czystego błędu geometrycznego” bez udziału głowicy pomiarowej, którego nazwą będzie prawdopodobnie E_{geo} ,
- błąd wymiaru głowicy pomiarowej P_{Size} – odpowiadający błędowi wyznaczenia średnicy kuli badawczej,
- błąd kształtu głowicy pomiarowej P_{Form} – odpowiadający właściwie odchyłce kształtu zidentyfikowanej na kuli badawczej.

Pozostałe parametry definiowane w poszczególnych normach mają charakter komplementarny.

Kolejnym zmianom poddawane jest również samo nazewnictwo poszczególnych błędów WSP. W pierwszych wydaniach były to

jednoliterowe skróty (np. E – błąd pomiaru długości), zaś później z uwagi na podobne parametry, które wyznaczane były różnymi metodami, dodawane były dodatkowe oznaczenia. Obecnie, w ramach przygotowywanej części 10360-2, opracowywana jest metoda pozwalająca na ujęcie zarówno rodzaju błędu, metody jaką został wyznaczony oraz głowicy, jaka do tego celu została użyta, np.: $P_{Size.Sph.1 \times 25:SS:Tact}$, co oznacza: błąd wymiaru głowicy pomiarowej (P_{Size}), przy wykorzystaniu wzorca kulowego i pomiarze 25 punktów ($Sph.1 \times 25$), pojedynczą końcówką pomiarową (ang. *single stylus* – SS) w trybie stykowym (Tact).

Zakodowana w ten sposób nazwa ma pozwolić na jednoznaczne wskazanie, z jakim parametrem mamy do czynienia. Ujednolicono również w części piątej definicje i sposoby wyznaczania poszczególnych błędów, tak aby ograniczyć możliwości określania podobnych parametrów, pozwalających na uzyskanie wyniku znacznie mniejszego niż w rzeczywistości (np. błąd kształtu głowicy laserowej przy zastosowaniu filtra na poziomie $\pm 0,5\sigma$).

W 2018 r. do grupy WG 10 dołączyli specjaliści bezpośrednio zaangażowani w rozwój metrologii współrzędnościowej w Polsce. Pracują oni nad tworzeniem norm serii ISO 10360 związanych z badaniami odbiorczymi i okresowymi współrzędnościowych systemów pomiarowych wraz z normami uzupełniającymi, jak również nad rodziną norm ISO 15530 dotyczącą metod wyznaczania niepewności pomiaru współrzędnościowego.

Należałoby również rozgraniczyc dwa okresy organizacji obrad komitetów technicznych, w tym TC 213. Do pierwszej połowy 2020 r. obrady odbywały się jedynie w sposób stacjonarny:

- we wrześniu 2018 r. w Poznaniu (Polska) – organizowane przez Politechnikę Poznańską,
- w styczniu 2019 r. w Genewie (Szwajcaria) w siedzibie CERN (tj. Europejska Organizacja Badań Jądrowych),
- we wrześniu 2019 r. w Berlinie (Niemcy),
- w styczniu 2029 r. w Queretaro (Meksyk).

Obrady stacjonarne oraz ich charakter powodowały, iż poza kilkoma osobami zaangażowanymi jako kierownicy grup roboczych, większość składu obradującego była w różnych miejscach, zatem redagowanie norm i osiągnięcie konsensusu było procesem żmudnym. Dodatkowo w sytuacji, w której na obradach brakowało większości osób, możliwe było przegłosowanie ustaleń odpowiadających jedynie

jednej z grup. W drugiej połowie 2020 r. zapadła decyzja o zmianie organizacji spotkań na sposób zdalny, a później – hybrydowy. Pozwoliło to na zwiększenie oraz ustabilizowanie składu obradujących, jak również dało możliwość spotykania się zespołów pomiędzy oficjalnymi obradami w celu zintensyfikowania prac nad poszczególnymi normami.

Do obowiązków grup roboczych należy opracowywanie nowych norm, adaptowanie oraz aktualizacja wcześniejszych wersji, tak aby odpowiadały obecnym wyzwaniom przemysłowych i/lub były spójne z resztą rodziny danej normy.

Od 2018 r. ukazały się następujące nowe wydania norm:

- ISO 10360-5:2020 – nowe wydanie pozwoliło na powstanie spójnej normy dotyczącej weryfikacji głowic stykowych, przy czym włączono do niej również część czwartą dotyczącą weryfikacji głowic stykowych pracujących w trybie skanowania,
- ISO 10360-10:2021 – norma opisująca weryfikację laserowych systemów nadeżnych (ang. *lasertracker systems*) – jest ona właściwie pierwszym wydaniem, które zerwało wcześniejszą spójność z procedurą kontroli błędu pomiaru długości (pięć długości wzdłuż jednej osi, trzykrotne powtórzenie) na rzecz testów wykonywanych przez producentów tych systemów,
- ISO 10360-13:2021 – norma dotycząca skanerów 3D jako systemów samodzielnych – wcześniej wzorcowanie tego typu systemów opierało się na normie ISO 10360-8, która poświęcona jest WMP wyposażonym w bezstykowe głowice pomiarowe (np. głowice laserowe czy systemy światła białego).

Należy także wspomnieć o normach będących obecnie w trakcie opracowywania:

- ISO/TS 15530-2 – norma dotycząca wyznaczania niepewności pomiaru realizowanego na WMP wyposażonych w głowicę stykową,
- ISO 10360-11 – norma odnosząca się do weryfikacji współrzędnościowych tomografów przemysłowych – z uwagi na brak konsensusu wewnątrz zespołu tworzącego, norma została wycofana i opracowywana jako zalecenia techniczne, w których z uwagi na mniejsze restrykcje mogą zostać zawarte różne podejścia do testów odbiorczych i okresowych,
- ISO 10360-1 – jedna z najstarszych i najmocniej zdezaktualizowanych części rodziny ISO 10360, jako że została wydana ponad 20 lat temu, nie uwzględnia nowszych systemów współrzędnościowych,

takich jak: skanery 3D, ramiona współrzędnościowe czy głowice bezstykowe, a także trudno w niej znaleźć definicję pomiaru współrzędnościowego, który pozwalałby na zaliczenie określonych urządzeń do współrzędnościowych systemów pomiarowych – obecnie planowane jest uczynienie z niej wprowadzenia do współrzędnościowej techniki pomiarowej, a techniczne szczegóły mają zostać przesunięte do części -100, -101 i -102.

Niektóre z wymienionych norm z rodziny ISO 10360 i ISO 15530 mają również swoje polskie odpowiedniki, np.: PN-EN ISO 10360-7 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM) – Część 7: CMM wyposażone w zespoły głowicy pomiarowej rejestrującej obraz (2011 r.), PN-EN ISO 10360-8 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych systemów pomiarowych (CMS) – Część 8: CMM z czujnikami optycznymi odległości (2014 r.), PN-EN ISO 10360-9 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych systemów pomiarowych (CMS) – Część 9: CMM z zespołem wielosensorowym (2014 r.) i PN-EN ISO 15530-3 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Współrzędnościowe maszyny pomiarowe (CMM): Metoda wyznaczania niepewności pomiaru – Część 3: Zastosowanie przedmiotów wzorcowych i wzorców.

2.3.2. Udział polskich przedstawicieli w obradach ISO/TC 213/WG 10

Do 2018 r. (spotkanie w Poznaniu) do grupy WG 10 „Coordinate Measuring Machines” ze strony Polskiego Komitetu Normalizacyjnego (PKN) zgłoszonych było trzech członków, których specjalizacja nie była bezpośrednio związana z metrologią współrzędnościową. We wspomnianym 2018 r. dołączyły do tego grona trzy osoby, w tym dwie z Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Politechniki Krakowskiej. W ramach obrad WG 10 polska grupa bierze udział w tworzeniu norm dotyczących metrologii współrzędnościowej, uczestnicząc w grupach roboczych (ang. *task force group*), bezpośrednio opracowujących większość norm WG 10. Pozwala to na zaprezentowanie i ujęcie w nich również polskiego stanowiska. Ponadto udział osób reprezentujących naukę i akredytowane laboratoria wzorcujące jest istotny ze względu

na dość silną pozycję producentów WSP, co w wielu wypadkach wpływa na ostateczny kształt norm.

Aktualnie (na dzień 15.09.2024 r.) członkami grupy WG 10, delegowanymi przez PKN, są:

- dr hab. inż. Zbigniew Humienny – Politechnika Warszawska,
- mgr inż. Marcin Błaszczuk – AutoStore Sp. z o.o.,
- prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski – Politechnika Poznańska,
- dr inż. Marcin Krawczyk, prof. PK – Politechnika Krakowska,
- dr hab. inż. Ksenia Ostrowska, prof. PK – Politechnika Krakowska,
- dr hab. inż. Bartosz Gapiński, prof. PP – Politechnika Poznańska.

2.4. Identyfikacja kluczowych zadań badawczych i potrzeb infrastrukturalnych

Analizując stan badań i potrzeby infrastrukturalne dyktowane przez rozwój cywilizacyjny i poprawę konkurencyjności polskich przedsiębiorstw w wymiarze międzynarodowym (zwłaszcza bazujących na wysokich technologiach), należy zwrócić uwagę na ich innowacyjność, w tym technologię pomiarów współrzędnościowych oraz wdrożenie najnowocześniejszych systemów kontroli i badań jakości. W związku z tym należy wymienić aktualne zadania badawcze, jakie powinno się postawić w zakresie rozwoju metrologii współrzędnościowej w kraju, oczywiście odniesione też do trendów światowych i uwzględniające również wyposażenie ośrodków badawczych w konieczną aparaturę:

- rozwój technologiczny w zakresie współrzędnościowych pomiarów przemysłowych od mikro- i nano- do makrowymiarów,
- pokonanie aktualnych granic dokładności pomiarów współrzędnościowych,
- uzyskanie możliwości wzorcowania maszyn i systemów współrzędnościowych dla krajowych laboratoriów badawczych i przemysłowych na światowym poziomie,
- zapewnienie stałego nadzoru nad dokładnością systemów pomiarowych jako kluczowe zadanie utrzymania stabilnej jakości produkcji i badań,
- zbudowanie krajowej bazy badawczej dla rozwoju metrologii współrzędnościowej poprzez stworzenie warunków do prowadzenia badań przez młodych pracowników (system pozyskania

- kadry badawczej) oraz staży dla doktorantów na wzór warunków stworzonych w najbardziej rozwiniętych krajach świata,
- stworzenie ośrodka wyznaczającego kierunki i cele badawcze dla potrzeb rozwoju metrologii współrzędnościowej i powiązanie go z krajowym oraz europejskim systemem grantów badawczych.

3.1. Proponowane kierunki badawcze i rozwojowe

Obecnie rozwój metrologii współrzędnościowej i systemów pomiarów przestrzennych warunkuje postęp nie tylko w technologii wytwarzania, ale również w różnych dziedzinach nauki, takich jak: astronomia, optyka (pomiarы np. soczewek o kształtach asferycznych – bardzo popularnych zarówno w badaniach astronomicznych, jak i w fotografii cyfrowej), medycyna (techniki obrazowania: CT, MR, pozytonowa emisyjna tomografia – PET), mechatronika, energetyka, środki transportu itp. Konieczny wzrost dokładności przestrzennego pomiaru współrzędnościowego powoduje rozwój w zakresie definiowania wymaganych wzorców i metod powiązania ich z jednostką wraz z oceną dokładności tego powiązania. Dla pomiarów współrzędnościowych obecnie graniczną wartością niemożliwą do pokonania jest błąd wskazania systemów współrzędnościowych na poziomie $E_{\text{OMPE}} = (0,1 + L/1000) \mu\text{m}$.

Metrologia współrzędnościowa ciągle się rozwija, przekraczając dotychczasowe granice. Jest to możliwe dzięki nowym technologiom wzorcowania oraz metodom oceny dokładności pomiaru. Właśnie taką granicę w zakresie rozwoju tej techniki wyznacza technologia wykonania wzorców przestrzennych – nie można obecnie wykonać wzorców materialnych o takich błędach kształtu, których stosowanie pozwalałoby na wzorcowanie systemów współrzędnościowych poniżej obecnej granicy ich błędów wskazania. W związku z tym, nie ma teraz możliwości pomiaru obiektów z wyższymi dokładnościami, a więc dalszego rozwoju konstrukcji systemów współrzędnościowych i postępu w wielu kluczowych dziedzinach nauki i techniki.

Opierając się na przedstawionej w rozdziale 2.4. „Identyfikacji kluczowych zadań badawczych i potrzeb infrastrukturalnych” w obszarze

metrologii współrzędnościowej, można sformułować następujące kierunki badań nad aktualnymi problemami naukowymi istotnymi dla obecnego stanu nauki światowej [2, 3]:

- opracowanie metod punktowo-macierzowych w ocenie dokładności systemów i pomiarów współrzędnościowych,
- ustanowienie, konstrukcja i utrzymanie krajowego wzorca miar pośrednich współrzędnych punktów pomiarowych w skali nano, mikro i makro,
- opracowanie nowej koncepcji wzorcowań – poszukiwanie struktur wzorców przestrzennych (3D) i wolumetrycznych,
- zbudowanie krajowej bazy badawczej dla rozwoju metrologii współrzędnościowej poprzez stworzenie warunków do prowadzenia badań przez młodych pracowników (system pozyskania kadry badawczej) oraz staży dla doktorantów na wzór warunków stworzonych w innych krajach,
- rozwiązanie problemu wzorcowania systemów optycznych o wysokiej rozdzielczości strukturalnej i zapewnienie wzorców dla rozwoju badań w obszarze cząsteczkowym – nanometrycznym,
- rozwiązanie problemu związanego z opracowaniem dokładnych wzorców dla ciągle zwiększającego się zakresu spektralnego pomiarów tomograficznych (tj.: tomografii komputerowej, optycznej tomografii dyfrakcyjnej, tomografii terahercowej oraz rezonansu magnetycznego),
- rozwój współrzędnościowych maszyn pomiarowych w skali nano, dla których poszukuje się wzorców wysokiej dokładności i opracowanie dla nich formuł szacowania niepewności (przykłady tych systemów to: NMM-1 firmy SIOS (Niemcy) czy ISARA 400 IBS (Holandia) wykorzystujące np. głowice optyczne i stykowe),
- rozwój metod oceny dokładności pomiarów współrzędnościowych, a szczególnie metod bazujących na wykorzystaniu wirtualnych systemów pomiarowych (ang. *digital twins*) do szacowania *on-line* niepewności pomiarów,
- badania nad dokładnością produktów mikro- i nanotechnologii oraz warunkami ich produkcji,
- badania nad wzorcowaniem i stosowaniem laserowych systemów nadeżnych (laser trackerów) wykorzystywanych do pomiarów dużych obiektów (pojazdów, samolotów, maszyn i urządzeń),

- rozwój mikro- i nanopomiarów współrzędnościowych dla mikrotechnologii,
- kompleksowe pomiary topografii powierzchni, w tym powierzchni super gładkich (np. soczewki asferyczne),
- badanie i rozwój algorytmów korekcji promienia końcówek pomiarowych używanych w pomiarach na współrzędnościowych maszynach pomiarowych, szczególnie dla powierzchni 3D o nieznanej geometrii,
- rozwój metody pomiaru mikroodchyłeń kątowych wiązki laserowej przy pomocy czujnika interferencyjnego z nieparzystą różnicą liczby odbić – opracowana metoda może mieć szerokie spektrum zastosowań m.in. do pomiaru błędów rotacyjnych współrzędnościowych maszyn pomiarowych,
- pomiary narzędzi obróbczych – wykonywanie elementów w tolerancjach poniżej 1 mikrometra wymaga zastosowania precyzyjnych narzędzi obróbczych, które należy kontrolować bezpośrednio po wykonaniu, jak również podczas eksploatacji (ocena stanu ich zużycia),
- badania (powierzchni i objętości) struktur wydruków 3D, w tym wydruków z proszków metalowych – druk 3D staje się coraz bardziej powszechny i wymagane jest kontrolowanie powstałych tą techniką elementów pod względem struktury wewnętrznej,
- badania parametrów i czynników wpływających na wyniki pomiarów tomograficznych, w tym:
 - analiza wpływu zastosowanego powiększenia na uzyskiwane wyniki pomiarów,
 - badania porównawcze dokładności pomiędzy metodami pomiarowymi (tomograf komputerowy – współrzędnościowe maszyny pomiarowe),
 - badania dokładności tomografów komputerowych według wytycznych niemieckiej normy VDI/VDE,
 - adaptacja normy ISO 10360 do sprawdzania dokładności tomografów komputerowych,
 - badania rozdzielczości rekonstrukcji obrazów uzyskiwanych z pomiarów tomograficznych,
 - opracowanie metod wzorcowania tomografów komputerowych,
 - analiza wpływu ustawienia elementu na wyniki pomiaru,
 - analiza wpływu ustawień parametrów pomiarowych na wyniki,
 - badania metod wyznaczania/kalibracji wartości granicznej pomiędzy powietrzem a materiałem w pomiarach tomograficznych,

- badanie i określanie niepewności pomiarów tomograficznych, w tym z zastosowaniem modelowania wykorzystującego ideę *digital twins*,
- badania struktury wewnętrznej obiektów z zadawaniem wstępnego obciążania podczas pomiarów tomograficznych – dla tomografów rentgenowskich,
- badania dokładności systemów rezonansu magnetycznego (MR) czy skanowania ultrasonograficznego,
- badania struktury wewnętrznej obiektów w skalach (mikro/mezo) z zastosowaniem tomografów wykorzystujących zakresy promieniowania od promieniowania X, poprzez zakres widzialny, aż do teraherców, w tym:
 - opracowanie zestawu wzorców do systemów optycznej tomografii dopplerowskiej (ang. *optical doppler tomography* – ODT), optycznej koherentnej tomografii (ang. *optical coherence tomography* – OCT) i tomografii terahercowej,
 - opracowanie metod korekcji błędów i umożliwienie (niedostępnego obecnie) w pełni ilościowego obrazowania w układach ODT, OCT i terahercowych,
 - analiza możliwości pomiarów hierarchicznych i multispektralnych dla obiektów złożonych – różne materiały i ich wolumetryczna tekstura oraz materiały biologiczne (badania naturalnych i sztucznych komórek/tkanek),
- badania nanostruktur, w tym np. grafenowych oraz z nanorurek węglowych przy zastosowaniu skaningowego mikroskopu elektronowego (ang. *scanning electron microscope* – SEM) oraz mikroskopu sił atomowych (ang. *atomic force microscope* – AFM),
- badania i rozwój metrologii 4D w zakresie struktury wzorcowań, oceny dokładności dla zastosowań w obszarach, takich jak: wytwarzanie (Metrologia 4D – *on-line*), media, badania biomedyczne, lotnicze i militarne.

3.2. Integracja naukowa ośrodków badawczych – Narodowa Sieć Metrologii Współrzędnościowej (NSMET)

Analiza potrzeb rozwojowych w obszarze metrologii współrzędnościowej prowadzi do stwierdzenia, że aby rozwiązać postawione (w rozdziale 3.1.) zadania naukowe, niezbędna jest integracja czołowych

krajowych ośrodków badawczych celem utworzenia światowej klasy, wyspecjalizowanej infrastruktury badawczej, umożliwiającej prowadzenie badań w zakresie metrologii współrzędnościowej, istotnych z punktu widzenia obecnego stanu nauki światowej oraz rozwoju kraju [3].

Powyższy cel jest zbieżny z celem głównym Działania 4.2. „Rozwój nowoczesnej infrastruktury badawczej sektora nauki” Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój, jakim jest wsparcie wybranych projektów dużej, strategicznej infrastruktury badawczej, o charakterze ogólnokrajowym lub międzynarodowym, znajdujących się na Polskiej Mapie Infrastruktury Badawczej oraz zapewnienie skutecznego dostępu do tej infrastruktury dla przedsiębiorców i innych zainteresowanych podmiotów naukowo-badawczych.

Beneficjentem i wnioskodawcą tak sformułowanego projektu „NSMET – Narodowa Sieć Metrologii Współrzędnościowej” jest konsorcjum naukowe w następującym składzie:

- Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki – Lider Projektu,
- Politechnika Poznańska,
- Politechnika Warszawska,
- Politechnika Świętokrzyska.

Jednostki naukowe ponoszące nakłady inwestycyjne na działalność B+R to Politechniki: Krakowska i Poznańska. Na zakup aparatury naukowo-badawczej wynoszą one 46 553 050,00 zł.

Zatem przedsięwzięcie pn. „NSMET – Narodowa Sieć Metrologii Współrzędnościowej” charakteryzuje się szerokim oddziaływaniem ekonomicznym i społecznym. Jego realizacja wynika z najważniejszych dokumentów strategicznych formułowanych na szczeblu międzynarodowym, krajowym, regionalnym i lokalnym oraz pozwoli na [3]:

- poprawę konkurencyjności polskich przedsiębiorstw w wymiarze międzynarodowym – zwłaszcza bazujących na wysokich technologiach,
- rozwój innowacyjności w technologii pomiarów współrzędnościowych i wdrożenie najnowocześniejszych systemów kontroli i badań jakości,
- rozwój technologiczny w zakresie współrzędnościowych pomiarów przemysłowych od mikro- i nano- do makrowymiarów,
- pokonanie aktualnych granic dokładności pomiarów współrzędnościowych,

- uzyskanie możliwości wzorcowania maszyn i systemów współrzędnościowych dla krajowych laboratoriów badawczych i przemysłowych na światowym poziomie,
- zapewnienie stałego nadzoru nad dokładnością systemów pomiarowych jako kluczowego zadania utrzymania stabilnej jakości produkcji i badań,
- zbudowanie krajowej bazy badawczej dla rozwoju metrologii współrzędnościowej poprzez stworzenie warunków do prowadzenia badań przez młodych pracowników (system pozyskania kadry badawczej) oraz staży dla doktorantów na wzór warunków stworzonych w najbardziej rozwiniętych krajach świata.

Rozwój metrologii współrzędnościowej w jej aktywnych obszarach zależy więc w dużej mierze od konstrukcji i utrzymania krajowego wzorca miar pośrednich współrzędnych punktów pomiarowych. Na Politechnice Krakowskiej w Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej buduje się od lat i utrzymuje taki wzorzec w postaci maszyny PMM 12.10.6 Leitz wraz z laser trackerem Etalon i systemem stabilności temperatury odniesienia $\pm 0,05$ K. Rozwój tego wzorca postawiła sobie za cel Narodowa Sieć Metrologii Współrzędnościowej (NSMET), dążąc do uzyskania błędu wskazania na poziomie $E_{OMPE} = (0,2 + L/1000) \mu\text{m}$, co technicznie jest niezwykle trudne. Zaś celem horyzontalnym jest osiągnięcie granicy $E_{OMPE} = (0,1 + L/1000) \mu\text{m}$.

W wyniku projektu powstały Laboratorium Ultraprecyzyjnych Pomiarów Współrzędnościowych na Politechnice Krakowskiej oraz Multiskalowe Laboratorium Metrologiczne na Politechnice Poznańskiej.

Laboratorium Ultraprecyzyjnych Pomiarów Współrzędnościowych Politechniki Krakowskiej (LUPW PK)

LUPW PK jest obiektem z unikalnym systemem klimatyzacji o stabilności termicznej $\pm 0,05$ K i $\pm 0,2$ K w części pomiaru makrowymiarów. Zostało ono wyposażone w:

- tomograf Waygate Technologies Phoenix V|tome|x S240 z lampą transmisyjną Nanofocus 180 kV/15W z zespołem zasilania wysokiego napięcia oraz kontrolerem sterującym,
- maszynę NMM-1 firmy SIOS Messtechnik z głowicami: stykową (Gannan), optyczną (Laser Focus) oraz AFM,

- współrzędnościową maszynę pomiarową PMM-G 50.30.20 firmy Hexagon,
- współrzędnościową multisensoryczną maszynę pomiarową Leitz Infinity 12.10.7 firmy Hexagon,
- mikroskop dyfrakcyjny TomoCube HT-2H firmy TomoCube,
- optyczny tomograf koherencyjny Ganymede Series Imaging System firmy THORLABS,
- tomograf terahercowy TeraPulse Lx firmy TeraView Ltd.,
- interferometr stabilizowany SL 02/1 firmy SIOS Messtechnik,
- interferometr stabilizowany SL 4/A firmy SIOS Messtechnik,
- interferometr wieloosiowy MS-6 firmy Lasertex Sp. z o.o.

Multiskalowe Laboratorium Metrologiczne Politechniki Poznańskiej (MLM PP)

W MLM PP zastosowano system klimatyzacji o stabilności termicznej ± 0.2 K i wyposażono je w:

- optyczną współrzędnościową maszynę pomiarową Alicona μ CMM,
- tomograf komputerowy V|tome|x M 300 metrology|edition,
- system CUBE-R, czyli zrobotyzowany skaner laserowy ze światłem niebieskim METRASCAN-R BLACK ELITE oraz optycznym systemem śledzącym C-TRACK ELITE firmy Creaform,
- współrzędnościową maszynę pomiarową PMM-C 12.10.7 ze stołem obrotowym i systemem Senmation firmy Hexagon.

Projekt ten jest ściśle powiązany i uzgadniany z działaniami Głównego Urzędu Miar mającymi na celu m.in. integrację środowiska metrologicznego w kraju. Ważnymi działaniami są również: budowa Świętokrzyskiego Kampusu Laboratoriów GUM w Kielcach, powołanie Polskiej Unii Metrologicznej oraz podjęty z inicjatywy MEiN program „Polska Metrologia” z systemem konkursów na granty badawcze, których tematyka jest zgodna z kierunkami badań wyznaczanymi przez GUM.

3.3. Podsumowanie kierunków rozwoju metrologii współrzędnościowej w Polsce

Metrologia współrzędnościowa w Polsce aktualnie rozwija się z różną intensywnością. Są ośrodki na światowym poziomie, ale poziom, szczególnie sprzętowy, polskiego przemysłu pozostawia wiele do życzenia.

Istnieje spora liczba laboratoriów zajmujących się zagadnieniami związanymi z szeroko pojętą dziedziną metrologii. Są to laboratoria i firmy, które są w stanie pomóc przy określaniu konkretnych, zdefiniowanych zadań. Jest to pomocne przy rozwiązywaniu problemów związanych z dokładnością pomiarów, przy czym sam problem musi zostać wcześniej zdefiniowany. Koncepcja nowej infrastruktury badawczej GUM ma za zadanie wykorzystanie potencjału naukowego w obszarze wiedzy i doświadczenia do definiowania zagadnień z zakresu metrologii, ich rozwiązywania oraz określania niezbędnych badań, w tym również opracowywania oryginalnych stanowisk badawczych. W tę koncepcję wpisuje się w obszarze MW proponowana infrastruktura badawcza NSMET, która ma na celu stworzenie dogodnych warunków do badania istniejących rozwiązań z zakresu pomiarów i obrazowania w skalach od nano do makro, a także utworzenie narodowej platformy do współpracy naukowo-badawczej naukowców z Polski oraz renomowanych ośrodków zagranicznych.

Zadaniem infrastruktury badawczej będzie wykorzystanie potencjału wiedzy naukowców polskich oraz zagranicznych w rozwiązywaniu problemów natury naukowej i technologicznej w obszarze szeroko pojętej metrologii, czyli pomiarów, obrazowania, tworzenia wzorców itp.

Projekt NSMET będzie powiązany z infrastrukturą B+R istniejącą w Polsce, a przede wszystkim ze Świętokrzyskim Kampusem Laboratoryjnym GUM. Powinno to stworzyć zupełnie nową jakość w rozwoju metrologii współrzędnościowej w kraju. Kluczowym tu okazało się nadanie Głównemu Urzędowi Miar statusu jednostki prowadzącej działalność naukowo-badawczą (ustawa z dnia 11 maja 2001 r. – Prawo o miarach (Dz. U. z 2022 r. poz. 2063)) oraz budowa Świętokrzyskiego Kampusu Laboratoryjnego GUM w Kielcach. Bardzo pomocna jest też inicjatywa grantowa pn. „Polska Metrologia” MEiN w zakresie rozwoju naukowego, a także Polska Unia Metrologiczna i jej idea otwarcia na potrzeby nauki oraz przemysłu. Wszystko to może w znaczącym stopniu ułatwić tworzenie zespołów badawczych działających w obszarze metrologii współrzędnościowej, integrację zespołów, w tym interdyscyplinarnych, prowadzących badania w różnych ośrodkach akademickich i przemysłowych oraz znacząco zwiększyć dostęp do najdokładniejszych systemów pomiarowych na światowym poziomie, wykorzystując efekt współpracy i synergii. Zadaniem, jakie stoi przed ośrodkami badawczymi, jest rozwój kultury metrologicznej

w przemyśle krajowym. Nie należy bowiem zapominać, że konkurencyjność polskich przedsiębiorstw, szczególnie w zakresie wysokich technologii i innowacji, jest związana z wdrożeniem najnowocześniejszych systemów kontroli i badań jakości opartych o współrzędnościowe systemy pomiarów przemysłowych od mikro- i nano- do makrowymiarów. Można więc przyjąć, że bardzo czułym miernikiem poziomu technologicznego przemysłu danego kraju jest rozwój wspomnianej kultury metrologicznej i wyposażenie w najnowocześniejsze systemy pomiarów współrzędnościowych. Mimo że to wyposażenie w systemy współrzędnościowe jest ciągle uzupełniane, to przykładowo w Polsce jego liczbę wyrazimy w tysiącach, zaś w Niemczech w dziesiątkach tysięcy – mamy więc wiele do zrobienia. Wiąże się to bowiem z dbaniem o wysoki poziom dokładności pomiarów decydujących o jakości wytwarzania polskiego przemysłu. Istotną rolę odgrywają tu szkolenia pracowników, ale też niezależne laboratoria akredytowane, szczególnie wzorcujące (konieczny jest wzrost ich liczby i kompetencji) oraz ich zaangażowanie w utrzymanie zakresu błędów granicznych użytkowanych systemów pomiarowych.

Kluczowym jest zatem inwestowanie w najnowocześniejsze systemy pomiarowe polskich przedsiębiorstw i znaczące działania państwa we wspomaganiu tego procesu. Konieczne jest także kształcenie metrologiczne na uczelniach technicznych, w tym poprzez kursy i studia podyplomowe.

Podsumowując, istotną rolę w zakresie podnoszenia kultury metrologicznej ma program „Polska Metrologia” MEiN (obecnie MNiSW) oraz, szczególnie w ostatnich latach, integracja wspólnej krajowej polityki metrologicznej przez GUM. Bardzo ważne znaczenie ma też Polska Unia Metrologiczna powołana na spotkaniu na Politechnice Lubelskiej w 2021 r., do której przystąpiły m.in. Politechniki: Krakowska, Lubelska, Łódzka, Opolska, Poznańska, Śląska, Świętokrzyska i Warszawska, Instytut Metalurgii Żelaza – Sieć Badawcza Łukasiewicz oraz inne uczelnie i instytucje. Rolę wiodącą ma tu Główny Urząd Miar.

Literatura

1. Śladek J.A., *Dokładność pomiarów współrzędnościowych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2011.
2. EURAMET, Strategic Research Agenda for Metrology in Europe, Version 1.0 (03/2016), 2016.
3. EURAMET, The gateway to Europe's integrated metrology community. EURAMET 2030 Strategy, Version 2.0 (06/2021), <https://www.euramet.org/about-euramet/strategy-2030> (dostęp: 15.09.2023 r.).
4. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Horizon Europe strategic plan 2021–2024, Publications Office of the European Union, 2021.
5. Śladek J.A., *Coordinate Metrology – Accuracy of Systems and Measurements (Springer Tracts in Mechanical Engineering)*, Springer, Berlin, Heidelberg 2016.
6. Jakubiec W., *Analityczne wyznaczanie niepewności pomiaru we współrzędnościowej technice pomiarowej*, Wydawnictwo ATH, Bielsko-Biała 2007.
7. Płowucha W., *Wyznaczanie niepewności pomiarów współrzędnościowych metodą analizy wrażliwości*, Wydawnictwo ATH, Bielsko-Biała 2019.
8. Śladek J.A., *Modelowanie i ocena dokładności maszyn oraz pomiarów współrzędnościowych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2001.
9. Gąska A., *Symulacyjny system oceny niepewności pomiarów współrzędnościowych realizowanych w warunkach przemysłowych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2017.
10. Ostrowska K., *Redundantne współrzędnościowe systemy pomiarowe – modelowanie matematyczne i funkcjonalne*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2018.

11. Harmatys W., *Modelowania dokładności optycznych współrzędnościowych maszyn pomiarowych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2022.
12. Gruza M., *Symulacyjny model dokładności pomiaru realizowanego laserowymi systemami nadążnymi*, rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2023.
13. Gapiński B., *Obrazowanie i pomiary w technicznej tomografii komputerowej ze szczególnym uwzględnieniem przedmiotów wykonanych technikami przyrostowymi i analizy nierówności powierzchni*, Studio Poligrafia, Poznań 2019.
14. Nowak M.N., *Metoda analizy danych pomiarowych reprezentujących geometrię ciała człowieka w ruchu do zastosowań w animacji trójwymiarowej*, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2021.
15. Sitnik R., *Odwzorowanie kształtu obiektów trójwymiarowych z wykorzystaniem oświetlenia strukturalnego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2010.
16. Hamrol A., Gawlik J., Śladek J.A., *Mechanical engineering in Industry 4.0*, „Management and Production Engineering Review” 2019, vol. 10, no. 3, s. 14–28.

W rozdziale przedstawiono diagnozę stanu metrologii współrzędnościowej w Polsce oraz opisano strategiczne kierunki jej dalszego rozwoju. W pierwszej części określono obszar merytoryczny, będący przedmiotem opracowania, a w kolejnej scharakteryzowano krajowe ośrodki badawcze, uwzględniając tematy prac naukowych, projekty naukowo-badawcze oraz wyposażenie w systemy współrzędnościowe. Dodatkowo omówiono laboratoria badawcze i wzorcujące oraz polską aktywność w zakresie normalizacji. Zidentyfikowano również kluczowe zagadnienia badawcze i potrzeby infrastrukturalne. Następnie skoncentrowano się na przyszłości metrologii współrzędnościowej, proponując kierunki badawcze i rozwojowe oraz opisując Narodową Sieć Metrologii Współrzędnościowej jako ważną inicjatywę. Stwierdzono, że kluczowe jest inwestowanie w najnowocześniejsze systemy pomiarowe polskich przedsiębiorstw i znaczące wsparcie państwa we wspomaganiu tego procesu. Konieczne jest także kształcenie metrologiczne na uczelniach technicznych, w tym poprzez kursy i studia podyplomowe. Podkreślono, że rozwój metrologii współrzędnościowej jest istotny dla podniesienia konkurencyjności polskiego przemysłu na rynku globalnym. Podjęcie takich działań wzmocni pozycję kraju w tej dziedzinie oraz przyczyni się do poprawy jakości produkcji oraz zwiększenia precyzji i niezawodności pomiarów w różnych sektorach przemysłowych.

Słowa kluczowe: metrologia współrzędnościowa, „Polska Metrologia”, diagnoza stanu metrologii, strategiczne kierunki rozwoju metrologii

CZĘŚĆ DZIEWIĄTA

Metrologia prawna



Paulina Olszewska

Główny Urząd Miar

Absolwentka Wydziału Prawa i Administracji oraz Centrum Europejskiego Uniwersytetu Warszawskiego. Ukończyła studia podyplomowe z zakresu audytu i zarządzania oraz konsultacji publicznych. Uczestniczka krajowych i międzynarodowych projektów z zakresu prawa, zarządzania i spraw międzynarodowych. Ukończyła liczne szkolenia z zakresu zarządzania: strategicznego, procesowego, projektami, ryzykiem oraz komunikacji i negocjacji, a także wykorzystania nowych technologii w sektorze publicznym. Od 2013 r. urzędnik służby cywilnej.

Od 2008 r. jest pracownikiem Głównego Urzędu Miar na stanowiskach związanych z metrologią prawną i współpracą międzynarodową w tym obszarze. Obecnie pełni funkcję Dyrektora Departamentu Certyfikacji, odpowiadając za realizację zadań w zakresie certyfikacji wyrobów, osób i usług w odniesieniu do przyrządów pomiarowych, kas rejestrujących, tachografów oraz koordynację jednostki notyfikowanej. Prowadzi szkolenia i seminaria z obszaru metrologii prawnej, w szczególności prawnej kontroli metrologicznej i systemów certyfikacji. Autorka licznych publikacji i uczestniczka konferencji branżowych.

Przedstawicielka Głównego Urzędu Miar (GUM) w metrologicznych organizacjach międzynarodowych (OIML, WELMEC, NoBoMet). Zaangażowana w reformę prac technicznych oraz budowę systemu certyfikacji Międzynarodowej Organizacji Metrologii Prawnej (OIML). Pełni funkcję pełnomocnika ds. zapewnienia zgodności z wymaganiami normy PN-EN ISO/IEC 17065 – Ocena zgodności – Wymagania dla jednostek certyfikujących wyroby, procesy i usługi. Koordynatorka grup roboczych ds. przeglądu przyrządów pomiarowych oraz certyfikacji działających w strukturze Konsultacyjnego Zespołu Metrologicznego do spraw regulacji rynku.

Pasjonatka cyfryzacji i optymalizacji procesów. Inicjatorka projektu budowy elektronicznych usług publicznych Głównego Urzędu Miar „TRANS-TACHO”, realizowanego w ramach programu Polska Cyfrowa.

Określenie obszaru merytorycznego metrologii prawnej

ROZDZIAŁ

1

W ostatnich latach zmianie uległa definicja metrologii prawnej. Jeszcze w 2000 r. była definiowana jako dział metrologii odnoszący się do działań przeprowadzanych przez kompetentne organy, które wynikają z wymagań ustawowych, dotyczących pomiarów, jednostek miar, przyrządów pomiarowych i metod pomiarowych [1]. Aktualna definicja słownikowa stanowi, że jest to praktyka i proces obejmowania metrologii systemem ustaw i przepisów wykonawczych oraz jego wdrażania [2, 3]. Z punktu widzenia konsumenta metrologia prawna to dziedzina niezauważalnie towarzysząca nam na co dzień. Korzystając z wody lub innych mediów, nie zastanawiamy się, jak ustalane jest ich zużycie oraz jakim procedurom poddano np. wodomierz, zanim zamontowano go w naszym domu. Podobnie jest w przypadku innych przyrządów pomiarowych, z których korzystamy, np. robiąc zakupy, gdy ekspedient waży kupowany przez nas towar, tankując samochód, gdy odmierzamy paliwo czy przyrządzając posiłek, gdy gazomierz mierzy zużywany gaz. Zazwyczaj nie dostrzegamy pracy przyrządów pomiarowych oraz tego, że państwo przy pomocy narzędzi metrologii prawnej podejmuje działania w celu ochrony naszych interesów [4]. W tym miejscu warto zwrócić uwagę, że klienci nabywając określoną, odmierzoną ilość towaru, muszą polegać na wskazaniach przyrządu pomiarowego sprzedającego i nie mają możliwości niezależnej weryfikacji tych wskazań, dlatego muszą mieć opiekuna, który zapewni rzetelność wskazań, stosowanych przy transakcji, przyrządów pomiarowych. Takim opiekunem są organy państwa, w tym w szczególności organy administracji miar, których suwerennym zadaniem jest ochrona obywateli przed niezamierzonymi lub oszukańczymi stratami wynikającymi z nieprawidłowych wskazań przyrządów pomiarowych. Kwestią prawną jest zatem kontrola prawidłowości wyników pomiarów

związanych z transakcjami handlowymi oraz nakładanie i egzekwowanie kar finansowych.

Ogólnie rzecz ujmując, celem metrologii prawnej jest przede wszystkim czuwanie nad bezpieczeństwem technicznym kraju poprzez zapewnienie jednolitości pomiarów i zaufania do ich wyników w obszarach określonych prawem. Obszary te wiążą się głównie z transakcjami, podczas których wysokość opłaty lub inne należności ustala się na podstawie wyniku pomiaru, wykonanego przyrządem poddanym kontroli metrologicznej. Wśród tych obszarów znajdziemy również te związane z egzekwowaniem prawa (bezpieczeństwo fiskalne, porządek publiczny), ochroną zdrowia lub życia ludzi oraz ochroną środowiska.

W celu dostatecznego zaznaczenia roli metrologii prawnej, przed omówieniem jej aktualnego stanu w Polsce, warto również umiejscowić ją w szerszym kontekście gospodarczym, co wymaga odniesienia do koncepcji Infrastruktury Jakości oraz wynikającej z niej definicji Krajowej Infrastruktury Jakości (NQI) [5]. Według założeń koncepcja ta jest odpowiedzią na wyzwania związane z globalizacją oraz zapewnieniem zrównoważonego rozwoju. Krajowa Infrastruktura Jakości stanowi wynik integracji i koordynacji szeregu działań w kilku powiązanych ze sobą dziedzinach: metrologii (w tym metrologii prawnej), normalizacji, akredytacji i certyfikacji (również w zakresie wyrobów takich jak przyrządy pomiarowe).

Członkowie International Network on Quality Infrastructure (INetQI) przyjęli następującą definicję infrastruktury jakości. Jest to system obejmujący organizacje (publiczne i prywatne) wraz z politykami, odpowiednimi ramami prawnymi i regulacyjnymi oraz praktykami niezbędnymi do wspierania i podnoszenia jakości, bezpieczeństwa i przyjazności dla środowiska towarów, usług i procesów. Należy zaznaczyć, że organizacja INetQI zidentyfikowała również następujące wyzwania aktualnie stojące przed infrastrukturą jakości: rewolucja przemysłowa 4.0, druk 3D, inteligentne czujniki, drony, cyfrowe bliźniaki, rzeczywistość wirtualna i rozszerzona, sztuczna inteligencja, założenia Agendy 2030 oraz cele zrównoważonego rozwoju. Do efektywnego funkcjonowania rynków krajowych niezbędna jest wysokiej jakości infrastruktura, a jej rozpoznawalność na arenie międzynarodowej jest istotna dla umożliwienia dostępu do rynków zagranicznych. Stanowi to kluczowy element promowania i utrzymywania rozwoju gospodarczego, a także dobrobytu środowiskowego i społecznego. Zgodnie z definicją infrastruktura ta opiera się na kluczowych obszarach,

takich jak: metrologia, normalizacja, akredytacja, ocena zgodności oraz nadzór rynku [6]. Jeśli chodzi o definicję krajowej polityki jakości (ang. *national quality policy* – NQP), która jest potrzebna do wydajnego i skutecznego wdrażania infrastruktury jakości, to określono ją jako politykę przyjętą na poziomie krajowym mającą na celu rozwój i utrzymanie wydajnej i skutecznej infrastruktury wysokiej jakości. Innymi słowy bez kluczowych elementów infrastruktury jakości żadna gospodarka krajowa nie będzie w stanie sprostać wyzwaniom dynamicznie postępującej globalizacji oraz zapewnić zrównoważonego rozwoju. Podsumowując, podczas czytania niniejszego opracowania musimy pamiętać, że metrologia (w tym metrologia prawna i jej elementy, takie jak certyfikacja przyrządów pomiarowych, którą należy rozumieć jako prawną kontrolę metrologiczną i ocenę zgodności (łącznie)) została określona kluczowym narzędziem zrównoważonego rozwoju gospodarczego.

3.1. Elementy metrologii prawnej

Na metrologię prawną składa się wiele elementów ujętych w przepisach prawa i służących zapewnieniu odpowiedniego poziomu zaufania do wyników pomiarów, takich jak: jednostki miar, pomiary i ich metody, wymagania techniczne i metrologiczne dla przyrządów pomiarowych, a także procedury kontroli oraz nadzoru. Realizacja celów metrologii prawnej odbywa się poprzez wykonywanie prawnej kontroli przyrządów pomiarowych oraz prowadzenie nadzoru metrologicznego. Wykonanie tych istotnych zadań nie byłoby możliwe, gdyby nie administracja miar i jej pracownicy, którzy stoją na straży jednolitości miar i dokładności pomiarów. Wszystko to służy ochronie żywotnych interesów indywidualnych całego społeczeństwa, a także państwa. Przyrządy pomiarowe, stosowane w dziedzinach przewidzianych prawem, muszą zostać sprawdzone w celu zapewnienia, że dobra ważne dla państwa i obywatela będą odpowiednio chronione. Temu służy prawna kontrola metrologiczna obejmująca czynności zmierzające do wykazania, że przyrządy pomiarowe zarówno przed wprowadzeniem do użytkowania, jak i w czasie użytkowania spełniają wymagania określone w przepisach prawa [4].

Podstawowym aktem prawnym regulującym zagadnienia dotyczące jednostek miar, pomiarów, kontroli przyrządów pomiarowych oraz nadzoru nad przestrzeganiem przepisów związanych z pomiarami w Polsce jest ustawa z dnia 11 maja 2001 r. – Prawo o miarach (Dz. U. z 2022 r. poz. 2063). Szczegółowe zasady dotyczące wykonywania prawnej kontroli metrologicznej i jej zakresu, rodzaje przyrządów pomiarowych podlegające kontroli oraz wymagania metrologiczne i techniczne dla przyrządów pomiarowych zawarte są w aktach

wykonawczych do ustawy. W zakresie oceny zgodności z najważniejszym aktem prawnym jest ustawa z dnia 13 kwietnia 2016 r. o systemach oceny zgodności i nadzoru rynku (Dz. U. z 2022 r. poz. 1854). Tu podobnie szczegółowe warunki oraz zasadnicze wymagania dla przyrządów pomiarowych uregulowane są w aktach wykonawczych.

Kluczowe postanowienia wymienionych aktów prawnych zostaną szerzej omówione w dalszej części opracowania poświęconej metrologii prawnej przy okazji omawiania poszczególnych jej elementów.

3.1.1. Legalne jednostki miar

Jednym z podstawowych środków prawnych służących zapewnieniu rzetelności pomiarów są legalne jednostki miar. „Legalne” oznacza w tym przypadku, że jednostki miar są dopuszczone albo wymagane przy wykonywaniu pomiarów w określonych prawem sytuacjach. Inne jednostki miar nie są nielegalne w rozumieniu zakazu prawnego. Należy to rozumieć w ten sposób, że innych jednostek nie wolno stosować wszędzie tam, gdzie przepisy nakazują stosowanie jednostek miar legalnych. Pojęcie „legalnych jednostek miar” jest zdefiniowane w Międzynarodowym Słowniku Terminów Metrologii Prawnej: legalne jednostki miar – jednostki miar wymagane lub dopuszczone przepisami prawnymi. Mogą być nimi: jednostki SI, ich dziesiętne wielokrotności lub podwielokrotności tworzone poprzez użycie przedrostków SI, jednostki spoza SI określone we właściwych przepisach prawnych. W Polsce postanowienia prawne dotyczące legalności jednostek miar zawarte są we wspomnianej powyżej ustawie Prawo o miarach oraz w rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 5 czerwca 2020 r. w sprawie legalnych jednostek miar (Dz. U. z 2020 r. poz. 1024). Prawo polskie jest w omawianym zakresie zharmonizowane z prawodawstwem innych Państw Członkowskich poprzez wdrożenie dyrektywy Rady nr 80/181/EWG z dnia 20 grudnia 1979 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do jednostek miar [7]. Ustanowienie legalnych jednostek miar i ich wdrożenie jest koniecznością. Trzeba mieć na uwadze, że jednostki miar inne niż legalne pojawiają się niezależnie od woli instytucji państwowych, które muszą sobie poradzić z wynikającymi stąd problemami. Jednolitość miar jest warunkiem koniecznym dla zapewnienia rzetelności pomiarów. Ponadto z uwagi na stały rozwój metrologii i postęp w zakresie m.in. jednostek miar,

konieczne jest – tam, gdzie o wyniku oceny lub rozstrzygnięć decydować może użycie tak lub inaczej zdefiniowanej jednostki miary – ustalenie, których jednostek w danym celu lub w danej sytuacji należy użyć. Potrzebne są więc środki prawne zapobiegające występującej – z różnych przyczyn – nierzetelności pomiarów wynikającej z łatwego do przeoczenia niejednolitego stosowania jednostek miar [8].

3.1.2. Prawna kontrola metrologiczna

Prawna kontrola metrologiczna to, zgodnie z definicją zawartą w ustawie Prawo o miarach, działanie zmierzające do wykazania, że przyrząd pomiarowy spełnia wymagania określone we właściwych przepisach. W rozumieniu przepisów metrologicznych przyrząd pomiarowy to urządzenie, układ pomiarowy lub jego elementy, przeznaczone do wykonania pomiarów samodzielnie lub w połączeniu z jednym lub wieloma urządzeniami dodatkowymi. Wzorce miary i materiały odniesienia również są traktowane jako przyrządy pomiarowe. Prawnej kontroli metrologicznej podlegają przyrządy pomiarowe, które mogą być stosowane: w ochronie zdrowia, życia i środowiska, w obszarze bezpieczeństwa, porządku publicznego i praw konsumenta, a także przy pobieraniu opłat, podatków i innych należności budżetowych, ustalaniu opustów, kar umownych, wynagrodzeń i odszkodowań, pobieraniu i ustalaniu podobnych należności i świadczeń, dokonywaniu kontroli celno-skarbowej oraz w obrocie. Przyrządy pomiarowe podlegające prawnej kontroli metrologicznej są określone w aktach wykonawczych do ustawy Prawo o miarach.

Przyrządy pomiarowe, jak większość wyrobów, charakteryzują się cyklem życia, zaczynającym się od projektu technicznego i procesu wytwarzania, następnie ich użytkowania aż do zużycia i utylizacji. Prawna kontrola przyrządów pomiarowych wykonywana jest zarówno na etapie wprowadzania do użytkowania, jak i podczas użytkowania, przy czym dla każdego z tych etapów przewidziane są odrębne formy tej kontroli.

Przebieg prawnej kontroli przyrządów pomiarowych można w pewnym uproszczeniu opisać następująco: przed wprowadzeniem przyrządu do użytkowania jego wzorcowy egzemplarz podlega sprawdzeniu pod względem poprawności działania we wszystkich, nawet najbardziej skrajnych warunkach zewnętrznych przewidzianych przez

producenta, w których taki przyrząd może się znaleźć w trakcie późniejszego użytkowania. Jako kryterium poprawności działania przyjmowane jest kryterium błędów wskazań danego przyrządu – w trakcie sprawdzania wartości błędów nie mogą przekroczyć wartości granicznych określonych w przepisach prawa. Warunki, w których sprawdzany jest przyrząd, są związane ze środowiskiem zewnętrznym (temperaturą otoczenia, wilgotnością, narażeniem przyrządu na oddziaływania mechaniczne, takie jak: np. drgania czy uderzenia, a także narażeniem na oddziaływanie pola elektromagnetycznego). Działanie przyrządu sprawdzane jest również w sytuacjach, jakie mogą zaistnieć w czasie jego użytkowania (np. spadki lub zaniki napięcia zasilania w przyrządach zasilanych elektrycznie, spadki ciśnienia w przyrządach pomiarowych mierzących parametry przepływu cieczy czy niecentryczne umieszczenie ładunku w trakcie ważenia). Jeżeli, w wyniku badań wzorcowego egzemplarza przyrządu pomiarowego, stwierdzone zostanie, że w każdej z sytuacji, którą przewidziano w programie badań, spełnione są założone kryteria poprawności działania przyrządu pomiarowego, to z dużym prawdopodobieństwem można przyjąć, iż każdy kolejny egzemplarz tego przyrządu, identyczny z egzemplarzem wzorcowym, będzie działał w sposób poprawny w każdych warunkach zewnętrznych, jakie mogą zaistnieć w trakcie użytkowania, o ile te warunki mieszczą się w granicach określonych przez producenta. Aby taki stan miał miejsce, niezbędne jest spełnienie dwóch warunków: każdy kolejny egzemplarz przyrządu pomiarowego powinien być taki sam jak egzemplarz wzorcowy (tzn. identyczny co najmniej w zakresie tych cech, które decydują o charakterystyce metrologicznej) oraz przed oddaniem do użytkowania każdy egzemplarz powinien być wyregulowany tak, aby pomiary przeprowadzane za pomocą tego przyrządu zapewniały oczekiwaną dokładność. Należy jeszcze podkreślić, że na ogół producent ma pełną swobodę przy określaniu dopuszczalnych warunków użytkowania danego przyrządu pomiarowego, choć w przypadku przyrządów pomiarowych przewidywanych do stosowania w dziedzinach chronionych przez prawo może się jednak zdarzyć, że swoboda działań producenta jest ograniczona wymaganiami wynikającymi z przepisów prawa.

Działania te powinny dawać późniejszemu użytkownikowi gwarancję, że pomiary wykonywane za pomocą danego przyrządu pomiarowego są wystarczająco dokładne w stosunku do założonych potrzeb,

tn. mieszczą się w określonych przepisami prawa granicach. Jak wiadomo, każde urządzenie techniczne w trakcie użytkowania zmienia z czasem swoje właściwości. Zasada ta dotyczy również przyrządów pomiarowych. W związku z tym, aby mieć zaufanie do wyników pomiarów przeprowadzanych danym przyrządem, w całym okresie jego użytkowania, niezbędna jest okresowa kontrola poprawności działania, która potwierdzi dalszą przydatność przyrządu do wykonywania tych zadań, do których został on przeznaczony.

Takie postępowanie jest rezultatem wieloletniego doświadczenia zgromadzonego w trakcie użytkowania przyrządów pomiarowych i jest szeroko rozpowszechnione na całym świecie. Oczywiście konkretne rozwiązania przyjęte w poszczególnych państwach mogą się różnić w szczegółach, ale zasada pozostaje taka sama. Obecnie, w Polsce, funkcjonują niejako równolegle dwa systemy prawnej kontroli przyrządów pomiarowych, ale oba są zgodne z przedstawionym modelem. Ściślej mówiąc, główna różnica między tymi systemami dotyczy kontroli metrologicznej wykonywanej na etapie wprowadzania przyrządu pomiarowego do użytkowania. W trakcie użytkowania przyrządu pomiarowego, niezależnie od sposobu wprowadzenia do użytkowania, prawna kontrola metrologiczna polega na legalizacji ponownej [9].

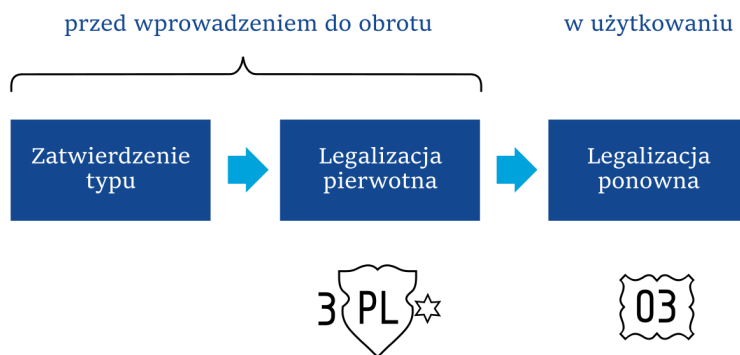
3.1.3. Systemy prawnej kontroli metrologicznej

Klasyczne/tradycyjne krajowe podejście do prawnej kontroli metrologicznej

Ustawa Prawo o miarach stanowi, że prawna kontrola metrologiczna przyrządów pomiarowych jest wykonywana przez: zatwierdzenie typu przyrządu pomiarowego na podstawie badania typu, legalizację pierwotną (albo legalizację jednostkową) – przed wprowadzeniem danego egzemplarza przyrządu pomiarowego do użytkowania oraz legalizację ponowną – w stosunku do przyrządów pomiarowych wprowadzonych do użytkowania (ryc. 1). W zależności od rodzaju przyrządu pomiarowego zakres prawnej kontroli metrologicznej tego przyrządu może obejmować wykonanie wszystkich lub tylko niektórych z przywołanych wyżej czynności, składających się na kontrolę metrologiczną przyrządów pomiarowych. Najczęściej stosowanym zakresem prawnej kontroli metrologicznej przyrządów pomiarowych jest zatwierdzenie

typu, po którym wykonywana jest legalizacja pierwotna (ta forma kontroli metrologicznej ma zastosowanie w przypadku nowych przyrządów pomiarowych, wprowadzanych do użytkowania), a także legalizacja ponowna stosowana do przyrządów pomiarowych znajdujących się już w użytkowaniu (przyrządy te musiały wcześniej przejść etap zatwierdzenia typu i legalizacji pierwotnej).

Według definicji przyjętych w ustawie Prawo o miarach zatwierdzenie typu to potwierdzenie, w drodze decyzji, że typ przyrządu pomiarowego spełnia wymagania. Z kolei legalizacja to zespół czynności obejmujących sprawdzenie i stwierdzenie w drodze decyzji, poświadczonych wyłącznie dowodem legalizacji, że przyrząd pomiarowy spełnia wymagania. Wspólnym elementem przytoczonych wyżej definicji jest odwołanie się do pojęcia „wymagania”, które powinien spełniać przyrząd pomiarowy. Należy pod nim rozumieć wymagania odnoszące się tylko do poszczególnych cech i właściwości danego rodzaju przyrządu pomiarowego oraz zapisane w stosownym akcie prawnym – w systemie prawnym obowiązującym w Polsce tymi aktami prawnymi są rozporządzenia wydawane przez ministra właściwego w sprawach gospodarki [8].



Ryc. 1. Klasyczne/tradycyjne podejście do prawnej kontroli metrologicznej

Legalizacja pierwotna dotyczy każdego, kolejnego wyprodukowanego egzemplarza przyrządu pomiarowego. W zakresie sprawdzenia wykonywanego podczas legalizacji pierwotnej powinno leżeć ustalenie, że dany egzemplarz przyrządu pomiarowego jest zgodny z zatwierdzonym typem, czyli jest taki jak egzemplarz „wzorcowy” – poddany badaniu typu.

Prawna kontrola metrologiczna przyrządów pomiarowych znajdujących się w użytkowaniu polega na ich legalizacji ponownej. Działalność ta, niezależnie od sposobu, w jaki dany egzemplarz przyrządu pomiarowego został wprowadzony do użytkowania, wykonywana jest na podstawie przepisów ustawy Prawo o miarach i ma zasięg wewnętrzny – obowiązujący tylko na terenie Polski.

Podmioty wykonujące prawną kontrolę metrologiczną

Prawna kontrola metrologiczna przyrządów pomiarowych jest wykonywana przez organy administracji miar, tj.: Prezesa Głównego Urzędu Miar (GUM) i Dyrektorów Okręgowych Urzędów Miar (OUM), oraz przez upoważnione podmioty zgodnie z zakresem udzielonego upoważnienia. Do wyłącznej kompetencji Prezesa GUM zastrzeżone są postępowania w sprawach zatwierdzenia typu przyrządów pomiarowych oraz wykonywanie legalizacji jednostkowej przyrządów pomiarowych. Legalizacji pierwotnej przyrządów pomiarowych, które są legalizowane bez zatwierdzenia typu dokonują Prezes i organy administracji miar. Natomiast legalizacji pierwotnej przyrządów pomiarowych, których typ jest zatwierdzony oraz legalizacji ponownej dokonują organy administracji miar oraz podmioty upoważnione do przeprowadzania legalizacji pierwotnej określonych rodzajów przyrządów pomiarowych.

Upoważnienia do legalizacji pierwotnej lub legalizacji ponownej określonych rodzajów przyrządów pomiarowych może udzielić Prezes GUM na wniosek zainteresowanego podmiotu (niebędącego organem administracji miar!). Do podstawowych wymagań stawianych podmiotowi ubiegającemu się o upoważnienie należy: dysponowanie personelem posiadającym wiedzę techniczną niezbędną do dokonywania legalizacji rodzajów przyrządów pomiarowych objętych wnioskiem oraz wyposażeniem technicznym niezbędnym do wykonywania legalizacji danego rodzaju przyrządów pomiarowych, a także bycie niezależnym i bezstronnym w stosunku do podmiotów występujących z wnioskiem o legalizację. Upoważnione podmioty podlegają nadzorowi sprawowanemu przez administrację miar.

Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy w sprawie upoważnień do legalizacji pierwotnej lub legalizacji ponownej przyrządów pomiarowych z dnia 29 marca 2005 r. (Dz. U. z 2005 r., nr 69, poz. 615) określa:

- rodzaje przyrządów pomiarowych, dla których mogą być wydawane upoważnienia do legalizacji pierwotnej lub legalizacji ponownej,
- tryb wydawania i przedłużania upoważnień do legalizacji pierwotnej lub legalizacji ponownej, w tym dane, jakie powinien zawierać wniosek o wydanie lub przedłużenie upoważnienia, oraz rodzaje dokumentów, jakie powinny być dołączone do wniosku,
- szczegółowe warunki wydawania upoważnień, w tym sposób potwierdzania posiadania odpowiedniej wiedzy przez personel i zakres podstawowego wyposażenia technicznego niezbędnego do wykonywania legalizacji danych rodzajów przyrządów pomiarowych,
- zakres i sposób dokumentowania przez podmioty upoważnione wykonywanych czynności podczas legalizacji.

Zaznaczenia wymaga, że to rozporządzenie jest bardzo stare i obecnie jest niespójne z innymi aktami prawnymi (np. z rozporządzeniem w sprawie wykazu przyrządów podlegających prawnej kontroli metrologicznej), co w praktyce może nastręczać pewne trudności.

Możliwość dokonywania czynności w ramach prawnej kontroli metrologicznej, tj. legalizacji przez upoważnione podmioty, stanowi wyjątek od zasady, że aktywność w obszarze metrologii prawnej należy do właściwości organów administracji publicznej (sfery państwa). W przypadku podmiotów upoważnionych mamy do czynienia z bardzo wąskim zakresem komercjalizacji usług publicznych i jest to jedyne zadanie, gdzie prawna kontrola jest wykonywana przez podmioty sektora prywatnego (w tym opracowaniu pod pojęciem podmiotów prywatnych rozumiane są podmioty inne niż administracja miar, niezależnie od ich statusu prawnego i właścicielskiego). Warto jednak zauważyć, że zakres tej działalności jest marginalny, ponieważ możliwość uzyskania stosownego upoważnienia dotyczy wąskiej grupy przyrządów pomiarowych. Aktualnie podmioty ubiegają się jedynie o uzyskanie upoważnienia do legalizacji liczników energii elektrycznej oraz analizatorów spalin samochodowych. Rocznie wydaje się od 3 do 8 tego rodzaju decyzji (2018 – 4, 2019 – 3, 2020 – 8, 2021 – 3, 2022 – 3) na okres 36 miesięcy. Według stanu na sierpień 2023 r. aktywnych było 12 podmiotów posiadających ważne upoważnienie do legalizacji (8 w zakresie analizatorów spalin, pozostałe 4 w zakresie liczników energii elektrycznej) [10].

Punkty legalizacyjne

W uzupełnieniu powyższego rozdziału należy wspomnieć, że prawna kontrola metrologiczna przyrządów pomiarowych może być przeprowadzana w:

- siedzibie organu administracji miar,
- punkcie legalizacyjnym,
- miejscu zainstalowania lub użytkowania przyrządu pomiarowego, jeżeli wynika to z wymagań,
- miejscu wykonywania legalizacji pierwotnej lub legalizacji ponownej przez podmiot, któremu Prezes udzielił upoważnienia do wykonywania legalizacji pierwotnej lub legalizacji ponownej.

Punkty legalizacyjne pełnią istotną rolę w zapewnieniu szerokiej dostępności usług w zakresie legalizacji. Zgodnie z definicją punkt legalizacyjny to miejsce wykonywania przez organy administracji miar czynności związanych z legalizacją dużej liczby określonych rodzajów przyrządów pomiarowych u producenta, importera albo u przedsiębiorcy dokonującego napraw lub instalacji. Punkty legalizacyjne tworzy Prezes GUM na wniosek podmiotu na czas określony (36 miesięcy), uwzględniając potrzeby gospodarki. Podmiot ubiegający się o utworzenie punktu legalizacyjnego jest obowiązany zapewnić warunki techniczno-organizacyjne do dokonywania legalizacji, a w szczególności zapewnić odpowiednie miejsce wykonywania legalizacji, właściwe wyposażenie techniczne punktu oraz udział personelu pomocniczego przy dokonywaniu legalizacji. Szczegółowe dane dotyczące wniosku o utworzenie punktu legalizacyjnego, same warunki utworzenia takiego punktu i jego zakres wyposażenia technicznego są określone w rozporządzeniu Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 12 stycznia 2005 r. w sprawie tworzenia punktów legalizacyjnych (Dz. U. z 2005 r., nr 15 poz. 126). W przypadku tego rozporządzenia również mamy do czynienia z niespójnością z innymi aktami prawnymi, analogicznie jak w przypadku upoważnień do legalizacji. Najwięcej punktów legalizacyjnych w latach 2020–2022 zostało utworzonych dla następujących przyrządów pomiarowych: wodomierze (łącznie 39), taksometry elektronicznie (łącznie 19), wagi nieautomatyczne (łącznie 19), przetworniki wskazujące do ciepłomierzy do wody (łącznie 15), przetworniki przepływu do ciepłomierzy do wody (łącznie 14) oraz pary czujników temperatury do ciepłomierzy do wody (łącznie 12). W zakresie

pozostałych przyrządów odpowiednio: gazomierze – 11, liczniki energii elektrycznej – 10, ciepłomierze – 5 oraz przyrządy do pomiaru prędkości pojazdów w kontroli ruchu drogowego – 4 [11].

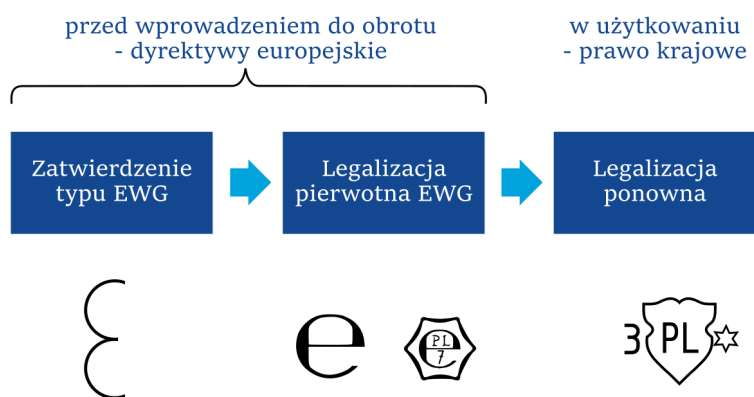
Reasumując, przedstawiony system obejmujący zatwierdzenie typu i legalizację pierwotną, jako formy kontroli metrologicznej przyrządów pomiarowych przed ich wprowadzeniem do użytkowania, oraz legalizację ponowną w użytkowaniu funkcjonuje na podstawie przepisów prawa polskiego. W związku z tym rezultat takiej kontroli metrologicznej jest ważny jedynie na terytorium Polski [9].

Europejskie podejścia do prawnej kontroli metrologicznej

Sposób uregulowania prawnej kontroli od zawsze należał do wyłącznej kompetencji władz państwowych. Integracja europejska pokazała jednak, że w celu zapewnienia swobodnej wymiany handlowej między państwami, potrzebna jest harmonizacja na szczeblu europejskim. Pierwsze dyrektywy europejskie określające zasady prawnej kontroli oraz wymagania dla przyrządów pomiarowych przyjęto na początku lat 70. w ramach tzw. starego podejścia. Praktyka dość szybko uwiarydociła, że przyjęte rozwiązania nie są skuteczne, m.in. ze względu na wysoki stopień szczegółowości przepisów, które bardzo szybko stały się niedopasowane do pojawiających się nowych rozwiązań technicznych. Stąd w latach 1985 i 1989 Rada (WE) (85/C/136/01) przyjęła uchwały w sprawie „nowego i globalnego podejścia do harmonizacji technicznej i normalizacji”, które określiły kierunek zmian, w konsekwencji modyfikując w znaczący sposób dotychczasowe podejście do prawnej kontroli metrologicznej w Europie.

Wyróżniamy trzy podejścia do prawnej kontroli metrologicznej: podejście tradycyjne – krajowe, stare podejście europejskie oraz nowe podejście europejskie. W podejściu nazwanym „tradycyjnym” (krajowym) uczestniczą dwa podmioty – producent/użytkownik przyrządu pomiarowego i organ administracji publicznej, których łączy stosunek administracyjno-prawny. Każdy element prawnej kontroli jest ściśle uregulowany przepisami prawa. W Polsce, jak i w większości państw europejskich formy kontroli były tożsame, tj.: przed wprowadzeniem do obrotu (użytkowania) – zatwierdzenie typu lub legalizacja pierwotna oraz w użytkowaniu – legalizacja ponowna. W „starym” europejskim podejściu, wprowadzonym w latach 70., prawna kontrola

metrologiczna po raz pierwszy osiągnęła poziom ponadnarodowy. W ramach tego podejścia wydano dyrektywę ramową dotyczącą metod prawnej kontroli metrologicznej oraz szereg dyrektyw szczegółowych określających wymagania dla przyrządów pomiarowych, których harmonizację uznano za pożyteczną z punktu widzenia swobodnego obrotu handlowego. Należy zaznaczyć, że aktualnie obowiązuje Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/34/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie wspólnych przepisów dotyczących przyrządów pomiarowych oraz metod kontroli metrologicznej (przekształcenie) (Dz. U. L 106 z 28.4.2009) [12]. Dyrektywy wydane w tym podejściu przewidują możliwość uzyskania „zatwierdzenia typu EWG” oraz „legalizacji pierwotnej EWG”, pozwalających na wprowadzanie przyrządów na rynki innych państw należących do Wspólnoty bez konieczności przeprowadzania dodatkowych badań lub zgłaszania ich do krajowej prawnej kontroli (ryc. 2). Wykonywanie prawnej kontroli nadal pozostaje w kompetencji władz państwowych. O formie prawnej kontroli w użytkowaniu decydują państwa członkowskie.



Ryc. 2. „Stare” europejskie podejście do prawnej kontroli metrologicznej

W uzupełnieniu należy dodać, iż równolegle ze „starym” podejściem istnieje możliwość uzyskiwania krajowych zatwierdzeń typu, np. gdy producent nie jest zainteresowany sprzedażą swoich przyrządów poza granicami danego państwa. Wadą dyrektyw wydawanych w „starym” podejściu była ich szczegółowość w zakresie wymagań dla przyrządów pomiarowych oraz to, że nowe rozwiązania techniczne stosowane w budowie przyrządów nie poddawały się tym szczegółowym

przepisom (np. wymagania dyrektyw starego podejścia niejako z założenia odnosiły się do czysto mechanicznych przyrządów pomiarowych i wymagań tych nie mogły spełnić nowocześniejsze przyrządy elektroniczne). Skomplikowany proces legislacyjny powodował, że prawo nie mogło nadążyć za postępem technicznym. Dyrektywy te szybko się dezaktualizowały, co powodowało trudności w ich stosowaniu w praktyce. Do 2015 r. obowiązywało jeszcze siedem dyrektyw wydanych w tym podejściu, natomiast decyzje wydawane na ich podstawie mogą być ważne jeszcze do 2025 r. Wprowadzenie nowego i globalnego podejścia nastąpiło poprzez zastąpienie części „starych” dyrektyw – „nowymi”, zawierającymi tylko zasadnicze wymagania dla przyrządów pomiarowych (sformułowane bardzo ogólnie). Szczegółowe specyfikacje techniczne wyrobów, pozwalające na spełnienie zasadniczych wymagań, przyjmowane są w zharmonizowanych normach lub innych dokumentach. Nowe podejście ustanowiło w Europie szczególną formę prawnej kontroli metrologicznej – ocenę zgodności z zasadniczymi wymaganiami. W latach 90. oceną zgodności (dyrektywa NAWID) objęte zostały wagi nieautomatyczne [13], a w 2004 r. dyrektywa MID [14] włączyła kolejne 10 kategorii przyrządów pomiarowych do systemu oceny zgodności. Oceny zgodności dokonuje się przed wprowadzeniem przyrządu do obrotu przy zastosowaniu, według wyboru producenta, jednej z procedur – tzw. „modułu”. Informacje na temat możliwych do zastosowania w przypadku przyrządów pomiarowych modułów oceny zgodności oraz dostępności tego rodzaju usług w Polsce zawiera tabela 1. Zgodność przyrządu z wymaganiami odpowiedniej dyrektywy potwierdza się poprzez naniesienie znaku „CE” i dodatkowego oznakowania metrologicznego „M”. Po dokonaniu oceny zgodności producent musi wystawić deklarację zgodności – dokument umożliwiający identyfikację produktu, producenta oraz dyrektyw, z którymi zgodność potwierdza. Przyrządy te powinny być wprowadzane na rynki państw członkowskich bez przeszkód. Prawna kontrola w użytkowaniu nadal pozostaje tu w gestii poszczególnych państw. W Polsce większość przyrządów pomiarowych po ocenie zgodności podlega legalizacji ponownej.

W odniesieniu do niektórych przyrządów pomiarowych (w dyrektywach MID i NAWID taka możliwość dotyczy jedynie naczyń wyszynkowych) przewidziano moduły umożliwiające przeprowadzenie oceny zgodności przez samego producenta. Jednak w większości modułów

wymagany jest udział strony trzeciej – jednostki notyfikowanej (jednostki notyfikowane do dyrektyw metrologicznych omówiono w dalszej części niniejszego opracowania). Może nią być zarówno instytucja prywatna, jak i państwowa. Warunkiem notyfikacji danej jednostki jest uzyskanie autoryzacji właściwego organu wyznaczonego przez państwo. Autoryzacja oznacza potwierdzenie spełnienia wymagań odpowiednich dyrektyw. Po autoryzacji instytucja jest notyfikowana Komisji Europejskiej (KE) [15]. Państwa muszą także zapewnić, aby jednostka w sposób ciągły spełniała kryteria oraz cofnąć notyfikację w sytuacji, gdy uznają, że z jakiegokolwiek przyczyny jednostka przestała je spełniać. Narzędziem komplementarnym z oceną zgodności, oprócz autoryzacji, jest nadzór rynku, sprawowany przez organy państw w celu przeciwdziałania wprowadzaniu na rynek przyrządów niespełniających wymagań.

Elementem łączącym trzy opisane wyżej podejścia jest cel wykonywania prawnej kontroli metrologicznej. Zawsze jest to ochrona szczególnych dóbr. W pozostałym zakresie nowe podejście (zastępujące stare) różni się znacząco od tradycyjnego. Dopuszcza do czynności z zakresu prawnej kontroli podmioty prywatne, a także przeprowadzenie oceny zgodności przez samego producenta. Ponadto ocenę zgodności można przeprowadzić w wybranej jednostce notyfikowanej w dowolnym państwie. Wcześniejsze podejścia ograniczały tę możliwość do wyznaczonego w danym państwie organu. Zmianie uległ także charakter regulacji wymagań dla przyrządów. Zasadnicze wymagania ujemuje się w przepisach, natomiast szczegółowe specyfikacje techniczne w normach. Nastąpiło przeniesienie ciężaru odpowiedzialności na producenta – to on jest zobowiązany do wykazania, że jego przyrząd spełnia zasadnicze wymagania. Nakładając oznakowanie „CE” producent bierze na siebie odpowiedzialność za wyrób. Z punktu widzenia producenta, nowe podejście ułatwiło dostęp do rynków innych państw w Europie i nie tylko. Europejską ocenę zgodności uznaje także wiele państw z innych kontynentów. Z perspektywy państw nowe podejście wraz z jego modyfikacjami spowodowało z jednej strony ograniczenie zadań z zakresu prawnej kontroli metrologicznej, a z drugiej powstanie wielu nowych obowiązków w obszarze autoryzacji, w tym akredytacji oraz nadzoru rynku.

Tab. 1. Procedury (moduły) oceny zgodności w odniesieniu do poszczególnych rodzajów przyrządów pomiarowych podlegających przepisom dyrektyw NAWID oraz MID

Dyrektywa 2014/31/UE (NAWID)		
Nazwa przyrządu		Procedury (moduły) oceny zgodności do wyboru przez producenta ¹
Wagi nieautomatyczne		B+D lub B+F lub G
Wagi nieautomatyczne, w których nie są stosowane zespoły elektroniczne i w których, w zespole pomiaru obciążenia, nie jest stosowana sprężyna do zrównoważenia obciążenia		D1 lub F1
Dyrektywa 2014/32/UE (MID)		
Załącznik	Nazwa przyrządu	Procedury (moduły) oceny zgodności do wyboru przez producenta
MI-001	Wodomierze	B+D lub B+F lub H1
MI-002	Gazomierze i przeliczniki do gazomierzy	B+D lub B+F lub H1
MI-003	Liczniki energii elektrycznej czynnej	B+D lub B+F lub H1
MI-004	Ciepłomierze	B+D lub B+F lub H1
MI-005	Instalacje pomiarowe do ciągłego i dynamicznego pomiaru ilości cieczy innych niż woda	B+D lub B+F lub G lub H1
MI-006	Wagi automatyczne:	
	dla systemów mechanicznych	B+D lub B+E lub B+F lub D1 lub F1 lub G lub H1
	dla przyrządów elektromechanicznych	B+D lub B+E lub B+F lub G lub H1
	dla systemów elektronicznych lub zawierających oprogramowania	B+D lub B+F lub G lub H1
MI-007	Taksometry	B+D lub B+F lub H1
MI-008	Miary materialne:	
	materialne miary długości	B+D lub D1 lub F1 lub G lub H
	naczynia wyszynkowe	A2 lub B+D lub B+E lub D1 lub E1 lub F1 lub H
MI-009	Przyrządy do pomiaru wymiarów:	
	dla systemów mechanicznych lub elektromechanicznych	B+D lub B+E lub B+F lub D1 lub E1 lub F1 lub G lub H lub H1
	dla systemów elektronicznych lub zawierających oprogramowania	B+D lub B+F lub G lub H1
MI-010	Analizatory spalin samochodowych	B+D lub B+F lub H1

Tab. 1. Procedury (moduły) oceny zgodności w odniesieniu do poszczególnych rodzajów przyrządów pomiarowych podlegających przepisom dyrektyw NAWID oraz MID

Objaśnienia:

Moduł A2 – wewnętrzna kontrola produkcji oraz nadzorowana kontrola przyrządów w losowych odstępach czasu (JN lub akredytowana jednostka własna)

Moduł B – badanie typu UE

Moduł D – zgodność z typem w oparciu o zapewnienie jakości procesu produkcji

Moduł D1 – zapewnienie jakości procesu produkcji

Moduł E – zgodność z typem w oparciu o zapewnienie jakości przyrządu

Moduł E1 – zapewnienie jakości kontroli i badania gotowych przyrządów

Moduł F – zgodność z typem w oparciu o weryfikację produktu

Moduł F1 – zgodność w oparciu o weryfikację produktu

Moduł G – zgodność w oparciu o weryfikację jednostkową

Moduł H – zgodność oparta na pełnym zapewnieniu jakości

Moduł H1 – zgodność oparta na pełnym zapewnieniu jakości oraz badaniu projektu

¹ – pogrubiony symbol literowy – oznacza możliwość realizacji procedury (modułu) oceny zgodności w polskiej jednostce notyfikowanej.

Państwa, użytkownicy oraz producenci przyrządów pomiarowych muszą mieć na uwadze, że obok certyfikatów wydanych w systemie oceny zgodności dla przyrządów pomiarowych objętych systemem, obowiązują także krajowe zatwierdzenia typu dla przyrządów nieobjętych tym systemem, a dodatkowo w użytkowaniu nadal znajdują się przyrządy pomiarowe wprowadzone do obrotu na podstawie „starego” europejskiego podejścia. Ponadto w zakresie trzech dyrektyw nadal funkcjonuje „stare” podejście. W przypadku ośmiu dyrektyw, które zostały uchylone, mamy do czynienia z sytuacją odwróconej harmonizacji, ponieważ doszło do deregulacji na poziomie UE i przyrządy objęte uprzednio prawodawstwem unijnym wróciły niejako na grunt krajowy. Komisja Europejska nie zgodziła się na włączenie ich do dyrektywy MID [16, 17]. Taki stan rzeczy może powodować pewne trudności dla producentów i użytkowników dlatego, że przyrządy pomiarowe podlegają innym reżimom prawnym. Analizując krajowe systemy prawnej kontroli w Europie, możemy zaobserwować, że niektóre państwa podejmują próby zniwelowania tych różnic, co czynią, rezygnując z tradycyjnych form prawnej kontroli na rzecz oceny zgodności albo przekształcając krajową prawną kontrolę na wzór „nowego” europejskiego podejścia [18].

Ocena zgodności

Jak wspomniano powyżej, założenia dla koncepcji nowego podejścia zawarte zostały w Uchwale w sprawie nowego podejścia do harmonizacji technicznej i normalizacji. Celem tego dokumentu było ułatwienie

i przyspieszenie ujednolicania przepisów, a więc przyjęcie nowego podejścia do harmonizacji technicznej, które opiera się na następujących zasadach. Harmonizacja objęta przepisami prawa (obligatoryjna) zostaje ograniczona do określonych wymagań technicznych, zwanych wymaganiami zasadniczymi, ustalanych na podstawie kryteriów ochrony „interesu ogólnego”. Uchwała zapowiada, że dyrektywy będą się koncentrowały na podstawowych cechach wyrobów, nie będą nadmiernie szczegółowe (w aspekcie wymagań technicznych) i nie będą dotyczyły poszczególnych wyrobów, lecz całych kategorii produktów i typów ryzyka. Wyroby spełniające zasadnicze wymagania mogą być wprowadzone do obrotu w dowolnym kraju UE i mają zapewniony swobodny przepływ w ramach jednolitego rynku. Producenci mają pełną swobodę w sposobie dowodzenia, że ich wyrób spełnia wymagania zasadnicze. Mogą, ale nie muszą stosować się do norm wskazanych przez KE jako narzędzia dowodzenia zgodności (tzw. normy zharmonizowane). Innymi słowy stosowanie norm zharmonizowanych pozostaje dobrowolne, a producent może wybrać różne rozwiązania i normy, o ile wyrób spełnia zasadnicze wymagania zawarte w dyrektywach. Wyroby spełniające wymagania norm zharmonizowanych korzystają z domniemania zgodności z zasadniczymi wymaganiami. Oznacza to, że wykazanie zgodności wyrobu z normą zharmonizowaną pozwala na stwierdzenie, że wyrób ten jest zgodny z wymaganiami zasadniczymi. Rezultatem sformułowania zasad nowego i globalnego podejścia są tzw. dyrektywy nowego podejścia. W obszarze metrologii obowiązują dwie dyrektywy tego rodzaju, czyli wspomniane już dyrektywy MID i NAWID. Istotną cechą dyrektyw UE jest to, że nie obowiązują one bezpośrednio, lecz wymagają wdrożenia do prawa krajowego poszczególnych państw członkowskich. Dyrektywy te wdrożone zostały do polskiego porządku prawnego wymienioną już ustawą o systemach oceny zgodności i nadzoru rynku, która tworzy ogólne ramy dla funkcjonowania w Polsce systemu oceny zgodności z zasadniczymi wymaganiami oraz rozporządzeniami zawierającymi wymagania dla przyrządów pomiarowych i wag nieautomatycznych [19].

Ważnym elementem systemu oceny zgodności są jednostki notyfikowane, które muszą spełniać szereg wymagań dla jednostki oceniającej zgodność, aplikującej o autoryzację (i w konsekwencji o notyfikację). Jednostka notyfikowana musi być niezależna i bezstronna, w tym jej kierownictwo i pracownicy odpowiedzialni za realizację

zadań związanych z oceną zgodności, w stosunku do podmiotu lub wyrobu, który ocenia, co oznacza, że w szczególności nie angażuje się w żadną działalność, która może zagrozić jej niezależności lub rzetelności, w tym w projektowanie, produkcję, wprowadzanie do obrotu, instalowanie, użytkowanie lub konserwację ocenianych wyrobów, a także usługi doradcze. Ponadto posiada środki niezbędne do odpowiedniego wykonywania zadań technicznych i administracyjnych związanych z działalnością w zakresie oceny zgodności oraz posiada dostęp do wszelkich niezbędnych urządzeń lub obiektów. Zobowiązana jest również do dysponowania personelem o odpowiednim wykształceniu, wiedzy i doświadczeniu w zakresie przeprowadzanej oceny zgodności, przejrzystymi i powtarzalnymi procedurami oraz ich opisami, zgodnie z którymi przeprowadza się ocenę zgodności, procedurami odróżniającymi zadania wykonywane w ramach notyfikacji od wszelkiej innej działalności, a także procedurami służącymi prowadzeniu działalności. Domniemywa się, że jednostka oceniająca zgodność spełnia powyższe warunki, jeżeli spełnia w odpowiadającym im zakresie wymagania określone we właściwych normach zharmonizowanych lub ich częściach. Podstawową ścieżkę prowadzącą do uzyskania autoryzacji wyznacza posiadanie przez jednostkę oceniającą zgodność akredytacji w odpowiednim zakresie. Głównym zadaniem jednostki notyfikowanej jest świadczenie usług związanych z oceną zgodności na warunkach ustanowionych w stosownym unijnym prawodawstwie harmonizacyjnym. Oznacza to świadczenie producentom usług leżących w interesie publicznym.

Rolą jednostki notyfikowanej jest potwierdzenie (np. w formie stosownego certyfikatu), że producent poprawnie zastosował wybraną przez siebie normę dotyczącą wyrobu, właściwie dokonał (lub dokonuje) oceny jego zgodności z wymaganiami, co umożliwia mu wydanie deklaracji zgodności i nałożenie na wyrób oznakowania CE (oraz w przypadku przyrządów pomiarowych, dodatkowego oznakowania metrologicznego – ryc. 3). Wystawienie deklaracji zgodności i nałożenie oznakowania CE uprawnia producenta do wprowadzenia wyrobu do obrotu. Istotą systemu oceny zgodności jest fakt, że to producent, przy współudziale trzeciej strony – jednostki notyfikowanej, przeprowadza pewien proces, w wyniku którego deklaruje na własną, wyłączną odpowiedzialność zgodność swojego wyrobu z obowiązującymi wymaganiami.

przed wprowadzeniem do obrotu
- dyrektywy europejskie

w użytkowaniu
- prawo krajowe



Ryc. 3. „Nowe” europejskie podejście do prawnej kontroli metrologicznej

Podejście takie stanowi istotną różnicę w porównaniu do obowiązujących wcześniej krajowych systemów prawnej kontroli metrologicznej polegającej na zatwierdzeniu typu i legalizacji pierwotnej, gdzie decyzję zatwierdzającą typ przyrządu pomiarowego w trybie administracyjnym wydawał organ państwa. Następnie przeprowadzał on legalizację pierwotną, dopuszczając przyrząd pomiarowy do obrotu i użytkowania, biorąc tym samym odpowiedzialność za zgodność przyrządu z wymaganiami.

Warto jeszcze raz podkreślić, że system oceny zgodności dotyczy różnych rodzajów wyrobów, a wymagania są określone w wielu dyrektywach, z których większość przewiduje nałożenie oznakowania CE. Natomiast obecność oznakowania CE na wyrobie oznacza, że jest on zgodny z wszystkimi właściwymi mu dyrektywami. Dyrektywy dotyczące przyrządów pomiarowych przewidują dodatkowe oznakowanie metrologiczne w postaci litery M (omówione wcześniej). Wprowadzenie takiego rozwiązania może świadczyć o wadze, jaką UE przykładła do metrologii. Po przeprowadzonej ze skutkiem pozytywnym ocenie zgodności można wprowadzać do użytku wagi nieautomatyczne, a także kilka rodzajów powszechnie używanych przyrządów pomiarowych, takich jak: wodomierze, gazomierze, liczniki energii elektrycznej czy taksometry. Nad rzetelnością funkcjonowania systemu oceny zgodności czuwają tzw. organy nadzoru rynku. W Polsce rolę głównej instytucji odpowiedzialnej za nadzór rynku pełni Urząd Ochrony Konkurencji

i Konsumentów [20], natomiast w zakresie dyrektyw metrologicznych funkcję organów nadzoru rynku pełnią organy administracji miar.

Jednostki notyfikowane w Polsce

W Polsce aktualnie funkcjonuje 15 jednostek notyfikowanych [21] do dyrektyw metrologicznych, tj. wspomnianych powyżej dyrektyw MID i NAWID. Szczegółowe zestawienie polskich jednostek notyfikowanych wraz zakresem notyfikacji zawiera tabela 2. Zasadniczą część jednostek notyfikowanych są to jednostki administracji miar. W przypadku dyrektywy NAWID są to tylko jednostki administracji miar – 11 jednostek (GUM i OUM), brak jest podmiotów prywatnych mogących świadczyć usługi w tym zakresie. Natomiast w przypadku dyrektywy MID mamy analogicznie 11 podmiotów z administracji miar i 4 podmioty odrębne. Należy jednak zauważyć, że w 2016 r. było 8, a w latach wcześniejszych 11 jednostek notyfikowanych spoza administracji. Warto również zgłębić zakres notyfikacji wskazanych jednostek notyfikowanych, analizując moduły oceny zgodności oraz rodzaje przyrządów pomiarowych.

Co do dyrektywy NAWID wydaje się, że z uwagi na to, iż dotyczy jednego rodzaju przyrządu pomiarowego, tj. wag nieautomatycznych, i mamy tu do czynienia z jednostkami notyfikowanymi reprezentującymi wyłącznie administrację miar można jednoznacznie stwierdzić, że w tym zakresie dostępność usług jest zapewniona, zatem obszar ten nie wymaga szerszego omówienia. Dyrektywa MID potrzebuje natomiast pewnych wyjaśnień. Już pobieżne zapoznanie się z tabela 2 pokazuje, że pomimo przyjętych na poziomie europejskim założeń, że zadania w zakresie oceny zgodności zostaną przejęte przez podmioty prywatne, a organy władzy publicznej pozostaną przy zadaniach z zakresu nadzoru rynku nie sprawdziły się pomimo upływu blisko 20 lat od przyjęcia tejże dyrektywy. Biorąc pod uwagę dane historyczne, dostrzegamy raczej odwrotny trend. Tu również większość jednostek notyfikowanych stanowią podmioty będące jednostkami z administracji miar (11 na 15 jednostek notyfikowanych do Dyrektywy MID). Jeśli chodzi o notyfikację do modułu B – badanie typu – kluczowego modułu oceny zgodności, to w zasadzie jest on realizowany wyłącznie przez GUM (wyjątek dotyczy gazomierzy, które są poza zakresem notyfikacji GUM, ocena zgodności wg modułu B realizowana jest przez inny

podmiot zgodnie z tabelą 2), co nie wydaje się czymś niespodziewanym, ponieważ procesowo i technicznie jest on analogiczny do wspomnianej wcześniej procedury zatwierdzenia typu realizowanej wyłącznie przez GUM. Warto zauważyć, że w większości państw europejskich sytuacja wygląda podobnie (przykłady państw: Niemcy, Francja, Czechy czy Litwa). Krajowe Instytucje Metrologiczne (NMI) były i są pod względem technicznym i kadrowym najlepiej przygotowane do realizacji zatwierdzenia typu i bliźniaczego modułu B w ocenie zgodności, w którym ocenia się rozwiązania prototypowe.

Co więcej, większość jednostek notyfikowanych w swoim zakresie ma najbardziej popularne (produkowane seryjnie, masowo) przyrządy pomiarowe, np.: liczniki energii elektrycznej, wodomierze, wagi automatyczne i nieautomatyczne, instalacje pomiarowe do ciągłego i dynamicznego pomiaru ilości cieczy innych niż woda. Problem pojawia się w dostępności oceny zgodności w zakresie takich przyrządów jak: analizatory spalin czy przyrządy do pomiarów wielu wymiarów (przyrządy do pomiaru długości, pola powierzchni i wielu wymiarów). W Polsce brak jest możliwości przeprowadzenia oceny zgodności według modułów H i H1 dla któregośkolwiek z przyrządów pomiarowych podlegających ocenie zgodności oraz modułu B dla analizatorów spalin czy przyrządów do pomiarów wielu wymiarów. Podkreślić należy, że spośród wskazanych w tabeli 2 podmiotów większość notyfikowana jest do modułów F i F1 (deklaracja zgodności z typem na podstawie weryfikacji wyrobu (odpowiednik legalizacji pierwotnej w rozumieniu ustawy Prawo o miarach), deklaracja zgodności na podstawie weryfikacji wyrobu), a tylko trzy notyfikowane są do modułu B (badanie typu) i cztery do modułu D (deklaracja zgodności z typem na podstawie zapewnienia jakości procesu produkcyjnego).

Tab. 2. Zakresy notyfikacji polskich jednostek notyfikowanych do dyrektyw NAWID oraz MID

JEDNOSTKA NOTYFIKOWANA									
Stan na dzień: 1.09.2023 r.									
Nazwa przyrzędu	NB	1440	GŁÓWNY URZĄD MIAR	NB	1441	OKRĘGOWY URZĄD MIAR W POZNANIU	NB	1442	OKRĘGOWY URZĄD MIAR W BYDGOSZCZY
	NB	1443	OKRĘGOWY URZĄD MIAR W GDAŃSKU	NB	1444	OKRĘGOWY URZĄD MIAR W KATOWICACH	NB	1445	OKRĘGOWY URZĄD MIAR W KRAKOWIE
	NB	1446	OKRĘGOWY URZĄD MIAR W ŁÓDZI	NB	1447	OKRĘGOWY URZĄD MIAR W SZCZECINIE	NB	1448	OKRĘGOWY URZĄD MIAR W WARSZAWIE
	NB	1449	OKRĘGOWY URZĄD MIAR WE WROCŁAWIU	NB	2969	OKRĘGOWY URZĄD MIAR W BIAŁYMSTOKU	NB	1450	INSTYTUT NAFTY I GAZU PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY
	NB	2082	ENERGETYCZNE SYSTEMY POMIAROWE SP. Z O.O.**	NB	2083	ENERGO-MOC WZORCOWNIA SP. Z O.O.**	NB	2148	Polski Koncern Naftowy ORLEN Spółka Akcyjna – Oddział Laboratorium Pomiarowo-Badawcze PGNiG w Warszawie
Wagi nieautomatyczne	B								
	D G								
Wagi, w których nie są stosowane zespoły elektroniczne i w których, w zespole pomiaru obciążenia, nie jest stosowana sprężyna do zrównoważenia obciążenia									
2014/31/UE									

Tab. 2. Zakresy notyfikacji polskich jednostek notyfikowanych do dyrektyw NAWID oraz MID

JEDNOSTKA NOTYFIKOWANA															
Stan na dzień: 1.09.2023 r.															
Nazwa przyrządu	NB 1440	NB 1441	NB 1442	NB 1443	NB 1444	NB 1445	NB 1446	NB 1447	NB 1448	NB 1449	NB 2969	NB 1450	NB 2082	NB 2083	NB 2148
GŁÓWNY URZĄD MIAR															
OKRĘGOWY URZĄD MIAR W POZNANIU															
OKRĘGOWY URZĄD MIAR W BYDGOSZCZY															
OKRĘGOWY URZĄD MIAR W GDAŃSKU															
OKRĘGOWY URZĄD MIAR W KATOWICACH															
OKRĘGOWY URZĄD MIAR W KRAKOWIE															
OKRĘGOWY URZĄD MIAR W ŁODZI															
OKRĘGOWY URZĄD MIAR W SZCZECINIE															
OKRĘGOWY URZĄD MIAR W WARSZAWIE															
OKRĘGOWY URZĄD MIAR WE WROCŁAWIU															
OKRĘGOWY URZĄD MIAR W BIAŁYMSTOKU															
INSTYTUT NAFTY I GAZU															
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY															
ENERGETYCZNE SYSTEMY															
POMIAROWE SP. Z O.O.**															
ENERGO-MOC WZORCOWNIA SP. Z O.O.**															
Polski Koncern Naftowy ORLEN Spółka Akcyjna – Oddział Laboratorium Pomiarowo-Badawcze PGNiG w Warszawie															
MI-001	Wodomierze	B D	-	-	F	F	D	F	-	-	-	-	-	-	-
MI-002	Gazomierze i przeliczniki do gazomierzy	B D	-	-	F	F*	D	-	-	-	-	B	-	-	B F
MI-003	Liczniki energii elektrycznej czynnej	B D	-	-	-	F	D	F	D	-	-	-	F	F	-
MI-004	Ciepłomierze	B D	-	-	-	F	D	F	-	-	-	-	-	-	-
MI-005	Instalacje pomiarowe do ciągłego i dynamicznego pomiaru ilości cieczy innych niż woda	B*D G	F	F*	F*	F*	D F*	F*	F*	F*	-	-	-	-	-

Tab. 2. Zakresy notyfikacji polskich jednostek notyfikowanych do dyrektyw NAWID oraz MID

Stan na dzień: 1.09.2023 r.															JEDNOSTKA NOTYFIKOWANA														

Tab. 2. Zakresy notyfikacji polskich jednostek notyfikowanych do dyrektyw NAWID oraz MID

JEDNOSTKA NOTYFIKOWANA															
Stan na dzień: 1.09.2023 r.															
Nazwa przyrządu	NB 1440	NB 1441	NB 1442	NB 1443	NB 1444	NB 1445	NB 1446	NB 1447	NB 1448	NB 1449	NB 2969	NB 1450	NB 2082	NB 2083	NB 2148
	GŁÓWNY URZĄD MIAR	OKRĘGOWY URZĄD MIAR W POZNANIU	OKRĘGOWY URZĄD MIAR W BYDGOSZCZY	OKRĘGOWY URZĄD MIAR W GDAŃSKU	OKRĘGOWY URZĄD MIAR W KATOWICACH	OKRĘGOWY URZĄD MIAR W KRAKOWIE	OKRĘGOWY URZĄD MIAR W ŁÓDZI	OKRĘGOWY URZĄD MIAR W SZCZECINIE	OKRĘGOWY URZĄD MIAR W WARSZAWIE	OKRĘGOWY URZĄD MIAR WE WROCŁAWIU	OKRĘGOWY URZĄD MIAR W BIAŁYMSTOKU	INSTYTUT NAFTY I GAZU PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY	ENERGETYCZNE SYSTEMY POMIAROWE SP. Z O.O.**	ENERGO-MOC WZORCOWNIA SP. Z O.O.**	Polski Koncern Naftowy ORLEN Spółka Akcyjna – Oddział Laboratorium Pomiarowo-Badawcze PGNiG w Warszawie
Przyrządy do pomiaru wymiarów:															
MI-009	dla systemów mechanicznych lub elektromechanicznych	-	-	F*	-	F*	D*	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	F*	-	F*	D1*	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	F1*	-	F1*	F*	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	F1*	-	-	-	-	-	-	-	-
	dla systemów elektronicznych lub zawierających oprogramowania	-	-	F*	-	F*	D*	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	F1*	D1*	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	F1*	F*	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	F2*	-	-	-	-	-	-	-	-
MI-010	Analizatory spalin samochodowych	-	-	-	F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Objaśnienia:															
* występują ograniczenia rodzajów przyrządów pomiarowych															
** według bazy NANDO nie zostały potwierdzone kompetencje dla jednostki															

Główny Urząd Miar jako jednostka notyfikowana nr 1440

Główny Urząd Miar jest jednostką notyfikowaną, której Komisja Europejska nadała numer 1440. Główny Urząd Miar – Jednostka Notyfikowana nr 1440 wykonuje certyfikację w ramach procedur oceny zgodności na podstawie wspomnianych już dyrektyw MID i NAWID. W obszarze certyfikacji w ramach systemu oceny zgodności GUM – JN nr 1440 działa jako niezależna strona trzecia we wszystkich realizowanych procesach, zachowując zasady bezstronności oraz takie same procedury w stosunku do wszystkich klientów przy uwzględnieniu Deklaracji jakości oraz Deklaracji bezstronności, podpisanych przez Prezesa GUM. W prowadzonym procesie oceny zgodności przyrządów pomiarowych stosuje kryteria oceny ustalone w ww. rozporządzeniach w sprawie wymagań dla wag nieautomatycznych i w sprawie wymagań dla przyrządów pomiarowych. Jednostka Notyfikowana 1440 przeprowadza ocenę zgodności na podstawie przyjętych programów certyfikacji. Podczas badań stosuje się metody opisane w normach zharmonizowanych lub specyfikacjach zharmonizowanych, co do których producent zadeklarował ich zastosowanie. W zakresie, w którym producent nie zadeklarował zastosowania norm lub specyfikacji zharmonizowanych, stosowane są kryteria zaczerpnięte wprost ze stosownego rozporządzenia określającego wymagania zasadnicze dla przyrządu. Podczas prowadzenia oceny zgodności przyrządów pomiarowych stosowane są także dokumenty uzupełniające w postaci przewodników opracowanych przez WELMEC (European Cooperation in Legal Metrology). Wytyczne i objaśnienia zawarte w powyższych przewodnikach nie mają charakteru obligatoryjnego, niemniej jednak stanowią to, co WELMEC uznaje za najlepszą możliwą do stosowania praktykę w danej dziedzinie, w czasie obowiązywania przewodnika. Szczegółowe informacje dotyczące realizacji zadań GUM – JN 1440 zamieszczone są na stronie internetowej Głównego Urzędu Miar w zakładce: Jednostka Notyfikowana. Zakres notyfikacji GUM został przedstawiony w tabeli 3.

Tab. 3. Zakres notyfikacji GUM – Jednostki Notyfikowanej nr 1440

Dyrektywa	Procedury (moduły) oceny zgodności	Nazwa przyrządu
2014/31/UE	moduł B – badanie typu UE moduł D – zgodność z typem w oparciu o zapewnienie jakości procesu produkcji moduł G – weryfikacja jednostkowa	wagi nieautomatyczne
2014/32/UE	moduł B – badanie typu UE moduł D – zgodność z typem w oparciu o zapewnienie jakości procesu produkcji	- wodomierze - przeliczniki do gazomierzy - liczniki energii elektrycznej czynnej - ciepłomierze i ich podzespoły: przetworniki przepływu, pary czujników temperatury, przeliczniki - instalacje pomiarowe do ciągłego i dynamicznego pomiaru ilości cieczy innych niż woda - wagi automatyczne - taksometry - materialne miary długości - naczynia wyszynkowe
	moduł G – weryfikacja jednostkowa	- instalacje pomiarowe do ciągłego i dynamicznego pomiaru ilości cieczy innych niż woda - wagi automatyczne - materialne miary długości

Zakres notyfikacji GUM-JN 1440 obejmuje przyrządy pomiarowe i ich podzespoły objęte dyrektywami MID i NAWID z wyjątkiem: gazomierzy, instalacji do ciągłego i dynamicznego pomiaru ilości cieczy innych niż woda (do ciekłego dwutlenku węgla, do gazów ciekłych pod ciśnieniem, mierzonych w temperaturze mniejszej niż -10 °C (innych niż ciecze kriogeniczne), do cieczy kriogenicznych (temperatura mniejsza niż -153 °C)), przyrządów do pomiaru wielu wymiarów (przyrządy do pomiaru długości, pola powierzchni i wielu wymiarów) oraz analizatorów spalin samochodowych.

Rodzaje przyrządów podlegających kontroli (prawnej kontroli metrologicznej oraz ocenie zgodności)

Pierwszy warunek, który musi być spełniony, aby konkretny rodzaj przyrządu pomiarowego podlegał w Polsce prawnej kontroli metrologicznej w rozumieniu ustawy Prawo o miarach jest taki, że przyrządy pomiarowe są lub mogą być stosowane: w ochronie zdrowia, życia i środowiska, w ochronie bezpieczeństwa i porządku publicznego,

w ochronie praw konsumenta, przy pobieraniu opłat, podatków i innych należności budżetowych oraz ustalaniu opustów, kar umownych, wynagrodzeń i odszkodowań, a także przy pobieraniu i ustalaniu podobnych należności i świadczeń, przy dokonywaniu kontroli celnej oraz w obrocie. Drugim niezbędnym warunkiem jest to, że rodzaj tego przyrządu musi być określony w stosownym akcie prawnym. Podkreślić należy, że do tego, aby przyrząd pomiarowy podlegał prawnej kontroli metrologicznej, oba powyższe warunki muszą być spełnione łącznie – przyrząd pomiarowy ma być przeznaczony do stosowania w dziedzinach podlegających ochronie prawnej oraz ma być wymieniony wśród przyrządów podlegających prawnej kontroli metrologicznej. Uproszczony wykaz przyrządów pomiarowych wraz z określeniem zakresu prawnej kontroli metrologicznej (krajowej oraz wynikającej z prawa UE oceny zgodności) zawiera tabela 4, opracowana na podstawie rozporządzenia Ministra Rozwoju i Finansów z dnia 13 kwietnia 2017 r. w sprawie rodzajów przyrządów pomiarowych podlegających prawnej kontroli metrologicznej oraz zakresu tej kontroli [9]. Zgodnie z wytycznymi zawartymi w ustawie Prawo o miarach, określając wykaz przyrządów pomiarowych podlegających prawnej kontroli, trzeba uwzględnić następujące przesłanki:

- niezbędność, z punktu widzenia obszarów zastosowań, objęcia określonych przyrządów pomiarowych prawną kontrolą metrologiczną,
- zakres ilościowy zastosowań,
- dziedziny pomiarowe, w których przyrządy pomiarowe są stosowane,
- zobowiązania wynikające z wiążących Rzeczpospolitą Polską umów międzynarodowych.

Zgodnie z wcześniejszą informacją, w przypadku oceny zgodności, wykaz przyrządów pomiarowych zawarty jest w treści dyrektyw MID i NAWID. Dyrektywa NAWID dotyczy wag nieautomatycznych, dyrektywa MID zaś 10 kategorii przyrządów pomiarowych: wodomierzy (MI-001), gazomierzy i przeliczników do gazomierzy (MI-002), liczników energii elektrycznej czynnej (MI-003), ciepłomierzy (MI-004), systemów pomiarowych do ciągłego i dynamicznego pomiaru ilości cieczy innych niż woda (MI-005), wag automatycznych (MI-006), taksometrów (MI-007), miar materialnych (MI-008), przyrządów do pomiaru wymiarów (MI-009) oraz analizatorów spalin samochodowych

(MI-010). Analizując przesłanki zawarte w motywach dyrektywy MID, można zauważyć zbieżność obszarów stosowania przyrządów pomiarowych objętych dyrektywą do obszarów wymienionych w ustawie Prawo o miarach. Zgodnie z preambułą (analogiczne obszary zostały przywołane w art. 3 dyrektywy) przyrządy pomiarowe mogą być stosowane do różnorodnych zadań pomiarowych. Te, które wynikają z dbałości o interes publiczny, zdrowie publiczne, bezpieczeństwo publiczne i ład publiczny, ochronę środowiska i konsumenta, nakładanie podatków i cel oraz uczciwy handel, mające pośredni lub bezpośredni wpływ na codzienne życie obywateli w różny sposób, mogą wymagać zastosowania przyrządów pomiarowych poddanych prawnej kontroli metrologicznej (tu rozumianej jako ocena zgodności). W uzupełnieniu należy wskazać, że zgodnie z celami dyrektyw prawna kontrola metrologiczna nie może prowadzić do powstania barier w swobodnym przepływie przyrządów pomiarowych. Przepisy mające zastosowanie powinny być takie same we wszystkich państwach członkowskich, a dowód zgodności powinien być akceptowany w całej Unii. Dalej, istotny nacisk kładziony jest na poziom ochrony, zgodnie wytycznymi zawartymi w dyrektywie: „Wymagania dotyczące działania, które musi spełnić przyrząd pomiarowy, jak i sama ocena zgodności powinny zapewniać wysoki poziom ochrony”.

Zaznaczenia wymaga, że w przypadku rodzajów przyrządów pomiarowych, istniejące w prawie polskim przepisy stanowiące transpozycję przepisów Unii Europejskiej zapewniają, że wynik kontroli metrologicznej, przeprowadzonej na zgodność z tymi przepisami, jest akceptowany nie tylko na terenie Polski, ale na terenie całej UE. Należy jednak wyraźnie podkreślić, że taka zasada ma zastosowanie jedynie do kontroli metrologicznej przyrządów pomiarowych prowadzonej przed ich wprowadzeniem do obrotu lub oddaniem do użytkowania. Wydaje się również celowe wyjaśnienie, że aktualnie, jeżeli do danego rodzaju przyrządu pomiarowego na etapie wprowadzania do obrotu mają zastosowanie przepisy zharmonizowane UE, to ten rodzaj przyrządu nie może być wprowadzany do obrotu na podstawie przepisów prawa krajowego. Oznacza to, że systemy kontroli metrologicznej przyrządów pomiarowych na etapie wprowadzania do obrotu wynikające z przepisów prawa krajowego oraz z prawa zharmonizowanego UE są rozłączne [9].

Tab. 4. Formy prawnej kontroli metrologicznej przyrządów pomiarowych

Przyrząd pomiarowy*	Klasyczna prawna kontrola metrologiczna			Prawna kontrola metrologiczna wg modelu dyrektyw starego podejścia			Prawna kontrola metrologiczna wg modelu dyrektyw nowego podejścia	
	Zatwierdzenie typu	Legalizacja pierwotna	Legalizacja ponowna	Zatwierdzenie typu EWG	Legalizacja pierwotna EWG	Legalizacja ponowna	Ocena Zgodności	Legalizacja ponowna
I: Przyrządy do pomiaru wielkości elektrycznych								
Liczniki energii elektrycznej czynnej prądu przemiennego	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
II: Przyrządy do pomiaru objętości i przepływu płynów oraz do pomiaru ciepła								
Gazomierze	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Przeliczniki do gazomierzy	✓	✓					✓	✓
Wodomierze	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Instalacje pomiarowe do cieczy innych niż woda (w tym odmierzacze paliw)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zbiorniki pomiarowe do cieczy	✓	✓	✓					
Drogowe cysterny pomiarowe	✓	✓	✓					
Beczki metalowe	✓	✓						
Ciepłomierze do wody	✓	✓	✓				✓	✓
Przeliczniki do ciepłomierzy do wody	✓	✓	✓				✓	✓
Pary czujników temperatury do ciepłomierzy do wody	✓	✓	✓				✓	✓
Przetworniki przepływu do ciepłomierzy do wody	✓	✓	✓				✓	✓
III: Przyrządy do pomiaru długości i wielkości związanych								
Przyrządy do pomiaru długości tkanin, drutu, kabla, materiałów taśmowych, opatrunkowych i papierowych	✓	✓	✓				✓	✓
Materiałne miary długości	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Maszyny do pomiaru pola powierzchni skór	✓	✓	✓				✓	✓

Tab. 4. Formy prawnej kontroli metrologicznej przyrządów pomiarowych

Przyrząd pomiarowy*	Klasyczna prawna kontrola metrologiczna			Prawna kontrola metrologiczna wg modelu dyrektyw starego podejścia			Prawna kontrola metrologiczna wg modelu dyrektyw nowego podejścia	
	Zatwierdzenie typu	Legalizacja pierwotna	Legalizacja ponowna	Zatwierdzenie typu EWG	Legalizacja pierwotna EWG	Legalizacja ponowna	Ocena Zgodności	Legalizacja ponowna
Taksometry	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Przyrządy do pomiaru prędkości pojazdów w kontroli ruchu drogowego	✓	✓	✓					
IV: Przyrządy do pomiaru masy								
Odważniki		✓	✓		✓	✓		
Wagi automatyczne:								
– porcjujące	✓	✓	✓				✓	✓
– przenośnikowe	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
– odważające	✓	✓	✓				✓	✓
– dla pojedynczych ładunków	✓	✓	✓	✓**	✓**		✓	✓
– wagi wagonowe do ważenia w ruchu wagonów spiętych	✓	✓	✓					
– wagonowe							✓	✓
Wagi nieautomatyczne	✓	✓	✓				✓	✓
V: Przyrządy do pomiaru gęstości								
Areometry szklane – alkoholomierze i densymetry do alkoholu	✓	✓		✓	✓			
Areometry szklane – densymetry do cieczy innych niż alkohol	✓	✓						
Gęstościomierze zbożowe wzorcowe 20 L	✓							
Gęstościomierze oscylacyjne do pomiaru gęstości cieczy (od 450 kg/m ³ do 2000 kg/m ³)	✓							
VI: Przyrządy do pomiaru ciśnienia								
Manometry do opon pojazdów mechanicznych	✓	✓	✓	✓	✓	✓		

Tab. 4. Formy prawnej kontroli metrologicznej przyrządów pomiarowych

Przyrząd pomiarowy*	Klasyczna prawna kontrola metrologiczna			Prawna kontrola metrologiczna wg modelu dyrektyw starego podejścia			Prawna kontrola metrologiczna wg modelu dyrektyw nowego podejścia	
	Zatwierdzenie typu	Legalizacja pierwotna	Legalizacja ponowna	Zatwierdzenie typu EWG	Legalizacja pierwotna EWG	Legalizacja ponowna	Ocena Zgodności	Legalizacja ponowna
VII: Przyrządy do pomiaru wielkości chemicznych i fizykochemicznych								
Analizatory spalin samochodowych	√	√	√				√	√
VIII: Przyrządy do pomiaru wielkości akustycznych								
Mierniki poziomu dźwięku	√							

Objaśnienia:

√ – oznacza, że tego rodzaju przyrząd pomiarowy poddaje się jednośnym formom prawnej kontroli metrologicznej,

 – oznacza, że tej formy prawnej kontroli metrologicznej dla danego rodzaju przyrządu pomiarowego już się nie wykonuje.

* Szczegółowy wykaz przyrządów pomiarowych wraz z określeniem ich parametrów, zastosowania oraz klasyfikacji zawiera rozporządzenie Ministra Rozwoju i Finansów z dnia 13 kwietnia 2017 r. w sprawie rodzajów przyrządów pomiarowych podlegających prawnej kontroli metrologicznej oraz zakresu tej kontroli (Dz. U. poz.885).

** dotyczy wag automatycznych kontrolnych i sortujących

Podsumowując, w tabeli 5 przedstawiono zestawienie podejść do prawnej kontroli metrologicznej.

Tab. 5. Zestawienie podejść do prawnej kontroli metrologicznej

Cechy	Podejście		
	„Tradycyjne” krajowe podejście	„Stare” europejskie podejście	„Nowe” europejskie podejście
Podmioty	Producent – organ władzy publicznej w danym kraju	Producent – organ władzy publicznej w dowolnym państwie	Producent albo producent i jednostka notyfikowana w dowolnym państwie
Forma	Zatwierdzenie typu (ZT) + legalizacja pierwotna + legalizacja ponowna	ZT UE (EWG) + legalizacja pierwotna UE (EWG) + legalizacja ponowna wg prawa krajowego	Ocena zgodności (wg wybranego modułu) + legalizacja ponowna wg prawa krajowego
Stosunek prawny	Administracyjno-prawny	Administracyjno-prawny	Cywilno-prawny
Zasięg	Krajowy	Europejski	Europejski
Sposób regulacji	Krajowe prawodawstwo	Szczegółowe dyrektywy europejskie	Dyrektywy europejskie + normy lub zalecenia zharmonizowane
Narzędzia komplementarne	Nadzór metrologiczny	Krajowy nadzór metrologiczny	Krajowy nadzór metrologiczny + Nadzór rynku wg prawa UE + autoryzacja

System certyfikacji OIML

Zanim przejdziemy do omawiania narzędzi nadzorczych, wspomnieć należy o istniejącym nieobligatoryjnym światowym systemie certyfikacji przyrządów pomiarowych, tj. OIML-CS (ang. International Organization of Legal Metrology – Certification System) [22]. Rozwiązania dotyczące funkcjonowania tego systemu są zawarte w publikacji OIML B 18:2022 [23]. Dokument ten ustanawia zasady, zgodnie z którymi sygnatariusze dobrowolnie akceptują i wykorzystują certyfikaty badania typu OIML i raporty z badań, jeśli są powiązane z certyfikatem OIML (International Organization of Legal Metrology), do zatwierdzenia typu lub uznania w ramach własnego systemu krajowej metrologii prawnej. U podstaw utworzenia certyfikacji OIML-CS legły następujące idee: popieranie globalnej harmonizacji, jednolitej interpretacji i wdrażania prawnych wymagań metrologicznych dla przyrządów pomiarowych i/lub modułów, przyspieszenie oraz zwiększenie efektywności krajowych procedur związanych z oceną oraz zatwierdzeniem typu przyrządów pomiarowych, a także ustalenie zasad i procedur wspomagających wzajemne

zaufanie pomiędzy uczestnikami systemu. Podstawowymi celami OIML-CS są natomiast ułatwienie, przyspieszenie i ujednolicenie pracy organów krajowych i regionalnych odpowiedzialnych za badania typu i zatwierdzanie typu przyrządów pomiarowych podlegających prawnej kontroli metrologicznej. Schemat certyfikacji procesowo jest zbliżony do krajowej prawnej kontroli metrologicznej (ZT i legalizacja) oraz oceny zgodności według modułów B i F. OIML-CS to system wydawania, rejestracji i wykorzystywania certyfikatów OIML, związanych z nimi raportów z badań (ang. *test reports*) oraz raportów badania typu przyrządów pomiarowych (w tym grup przyrządów pomiarowych, modułów lub grup modułów), oparty na wymaganiach zaleceń OIML (ryc. 4). Warto wskazać, że jest to system dobrowolny dla państw członkowskich OIML (dla członków korespondentów również). Polska nie uczestniczy w tym systemie, więc w konsekwencji brak jest w Polsce jednostek uprawnionych do wydawania tego rodzaju certyfikatów. Obecnie istniejący system certyfikacji OIML-CS zastąpił w 2008 r. dwa istniejące wcześniej równoległe systemy certyfikacji (system podstawowy oraz system *Mutual Acceptance Arrangement* – MAA).



Ryc. 4. System certyfikacji OIML-CS

Sam certyfikat wydany na wniosek producenta lub importera przyrządu pomiarowego, po odpowiednich badaniach, potwierdza zgodność danego typu przyrządu z wymaganiami zawartymi w zaleceniu OIML. Producenci przyrządów, którzy są zobowiązani do uzyskania zatwierdzenia typu w niektórych krajach, chcąc sprzedawać swoje produkty, mogą skorzystać z OIML-CS, dostarczając dowód, że ich typ przyrządu spełnia wymagania odpowiednich zaleceń OIML, co może pozwolić uniknąć powtarzania badań typu przyrządu pomiarowego przy wprowadzeniu go na rynek państwa członkowskiego OIML, a tym samym uniknąć związanych z tym kosztów. Przy czym należy wskazać, że tego rodzaju

certyfikaty nie stanowią dowodu prawnej kontroli metrologicznej i tym samym nie mają mocy prawnie wiążącej. Jeśli w danym kraju (w UE w przypadku oceny zgodności) określony rodzaj przyrządu pomiarowego podlega regulacjom w obszarze certyfikacji, to wówczas przejście tej procedury pozostaje obligatoryjne, a posiadany certyfikat wydany w formule OIML-CS może ją wspomóc, czy inaczej mówiąc, uprościć zarówno pod względem proceduralnym, jak i czasowym. Wnioski mogą być składane w jednostce certyfikującej państwa uczestniczącego w systemie OIML-CS. Państwa, które zdecydują się na udział w systemie deklarują jednocześnie uznawanie certyfikatów OIML-CS. Uczestnikami systemu są tzw. *Issuing Authorities* (jednostki wydające certyfikaty) oraz *Utilizing Authorities* (jednostki uznające). Ich kompetencje powinny być budowane przy uwzględnieniu zapisów norm PN-EN ISO/IEC 17025 – Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących oraz PN-EN ISO/IEC 17065 – Ocena zgodności – Wymagania dla jednostek certyfikujących wyroby, procesy i usługi. Wymagania dla jednostek certyfikujących wyroby, procesy i usługi wraz z dokumentami związanymi. Wykaz zaleceń objętych systemem wraz z listą jednostek – uczestników systemu można znaleźć na stronie internetowej organizacji OIML [22].

3.1.4. Nadzór

Nadzór metrologiczny

Jednym z zadań realizowanych przez organy administracji miar jest nadzór nad wykonywaniem przepisów ustawy Prawo o miarach. Mówiąc o metrologii prawnej, w szczególności o nadzorze metrologicznym, należy wspomnieć o tematyce towarów paczkowanych, które podobnie jak przyrządy pomiarowe są elementem prawie każdej codziennej czynności. Ustawa z dnia 7 maja 2009 r. o towarach paczkowanych (Dz. U. z 2020 r. poz. 1442) określa m.in. zasady paczkowania produktów przeznaczonych do wprowadzenia do obrotu w opakowaniach oraz oznaczania towarów paczkowanych znakiem „e”. Nadzorowi organów administracji miar podlega wspomniane paczkowanie produktów, jednakże z uwagi na obszerność tematyki, zagadnienia te nie zostały uwzględnione w opracowaniu. Zadania ogólnie określane mianem nadzoru metrologicznego dotyczą przede wszystkim kwestii związanych

z przestrzeganiem przepisów prawa z obszaru prawnej kontroli metrologicznej oraz towarów paczkowanych. Organy nadzoru rynku mają uprawnienia do podejmowania określonych działań w przypadku negatywnych wyników przeprowadzanej przez siebie kontroli. Z innych kwestii z obszaru nadzoru metrologicznego można tu wymienić kontrolę przestrzegania przepisów wspomnianego już rozporządzenia w sprawie legalnych jednostek miar. Kontroli w zakresie stosowania legalnych jednostek miar lub przyrządów pomiarowych podlegają osoby fizyczne, osoby prawne oraz jednostki organizacyjne nieposiadające osobowości prawnej. Zgodnie z przepisami ustawy Prawo o miarach (art. 21 ust. 2) organy administracji miar sprawują nadzór nad wykonywaniem przepisów tejże ustawy na podstawie kontroli przeprowadzanych przez upoważnionych pracowników. W miejscu stosowania przyrządów pomiarowych, podlegających prawnej kontroli metrologicznej, przeprowadza się kontrolę formalną wszystkich przyrządów pomiarowych stosowanych lub przechowywanych w stanie gotowości do użycia. Kontrole metrologiczne, których zadaniem jest sprawdzenie m.in. błędów granicznych dopuszczalnych, dotyczą natomiast przyrządów pomiarowych wytypowanych przez kontrolujących. W momencie stwierdzenia nieprawidłowości zadaniem kontrolujących jest sformułowanie zaleceń zmierzających do usunięcia nieprawidłowości lub zastosowania sankcji karnych. Dodatkowo w przypadku stwierdzenia podczas kontroli, że legalizacja przyrządu pomiarowego utraciła ważność, organ wydaje decyzję o jego czasowym wycofaniu z użytkowania. W przypadku stwierdzenia niespełniania wymagań przez egzemplarz przyrządu pomiarowego wydawana jest decyzja o wycofaniu tego przyrządu z obrotu lub użytkowania. Natomiast w sytuacji, gdy w okresie, na który została wydana decyzja o czasowym wycofaniu z użytkowania przyrządu pomiarowego, nie zostanie poświadczony dowodem legalizacji, że przyrząd pomiarowy spełnia wymagania, organ administracji miar wydaje decyzję o wycofaniu z użytkowania danego przyrządu pomiarowego. W przypadku stwierdzenia lub podejrzenia pewnego rodzaju nieprawidłowości (wymienionych w art. 22j ust. 1 pkt 1–4 ustawy Prawo o miarach), kontrolujący mogą zastosować zabezpieczenie przyrządu pomiarowego w celu zachowania go w niezmiennym stanie. Obszary uznane za szczególnie istotne, z powodu występowania w nich relatywnie dużej liczby nieprawidłowości, poddawane są wzmożonym działaniom kontrolnym. Dotyczy to w szczególności takich przyrządów pomiarowych jak: odmierzacze na

stacjach paliw, wodomierze u indywidualnych użytkowników oraz wagi w jednostkach handlowych.

Należy także zwrócić uwagę na fakt, że kontrole przeprowadzane w ramach sprawowanego nadzoru metrologicznego, oprócz roli weryfikującej oraz korygującej, pełnią również funkcję profilaktyczną, edukacyjną, a także doradczą. Istotą kontroli nie jest jedynie wskazywanie stwierdzanych nieprawidłowości i uchybień, ale również inicjowanie, co nie mniej ważne, działań naprawczych podejmowanych przez kontrolowanych oraz propagowanie wdrażania pozytywnych praktyk i rozwiązań zapobiegających występowaniu wykrywanych nieprawidłowości w przyszłości. Postępowania w tych sprawach prowadzone są na podstawie przepisów Kodeksu postępowania w sprawach o wykroczenia. W tym miejscu należy podkreślić, że ważnymi celami podejmowanych działań nadzorczych są sprawdzanie i promowanie przestrzegania obowiązującego w Polsce prawa, głównie w trosce o ochronę bezpieczeństwa obrotu gospodarczego i praw konsumenta.

Nadzór rynku

Organy administracji miar są organami nadzoru rynku (od dnia 20 kwietnia 2016 r.), w rozumieniu ustawy z dnia 13 kwietnia 2016 r. o systemach oceny zgodności i nadzoru rynku (Dz. U. z 2022 r. poz. 1854), sprawującymi kontrolę w zakresie: spełniania przez wyroby wymagań oraz stwarzania przez nie zagrożenia lub niezgodności formalnych. Warto wskazać, że system nadzoru rynku obejmuje poza zagadnieniami wymienionymi powyżej również postępowania w sprawie wprowadzonych do obrotu lub oddanych do użytku wyrobów niezgodnych z wymaganiami lub stwarzających zagrożenie, a także postępowania w sprawie niezgodności formalnych oraz kontrolę wyrobów przywożonych na teren Unii Europejskiej w zakresie objętym ustawą. W odniesieniu do kompetencji organów administracji miar wyrobami są przyrządy pomiarowe.

Celem nadzoru rynku jest zapewnianie, aby wyroby spełniały obowiązujące wymagania, przyczyniając się do wysokiego poziomu ochrony interesów publicznych, takich jak: zdrowie i ogólnie rozumiane bezpieczeństwo, bezpieczeństwo i higiena w miejscu pracy, ochrona konsumentów oraz ochrona środowiska naturalnego, przy jednoczesnym zapewnieniu, by swobodny przepływ wyrobów nie był ograniczony w większym stopniu niż ten przewidziany w unijnym prawodawstwie

harmonizacyjnym lub innej stosownej zasadzie unijnej. Ponadto nadzór rynku jest istotny z punktu widzenia interesów podmiotów gospodarczych, ponieważ pomaga w eliminowaniu nieuczciwej konkurencji. Działania w zakresie nadzoru rynku mogą być różnie organizowane w zależności od charakteru wyrobu oraz mogą obejmować zarówno kontrolę wymagań formalnych, jak również szczegółowe badania laboratoryjne. Kontrole mogą być przeprowadzane po wprowadzeniu wyrobu do obrotu – na różnych etapach „cyklu życia”, np. na etapie dystrybucji, oddawania do użytku lub użytkowania. Nadzór rynku może być sprawowany w różnych miejscach, np. u producentów, importerów, dystrybutorów hurtowych lub detalicznych, w firmach zajmujących się wynajmem, u użytkowników itp. W Unii Europejskiej najistotniejszym dokumentem w zakresie nadzoru rynku jest rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1020 z dnia 20 czerwca 2019 r. w sprawie nadzoru rynku i zgodności produktów oraz zmieniające dyrektywę 2004/42/WE oraz rozporządzenia (WE) nr 765/2008 i (UE) nr 305/2011 (Dz. U. UE L 169 z 25.6.2019) [24]. Zaznaczenia wymaga, że rozporządzenia unijne stosuje się wprost i nie wymagają one wdrożenia do krajowego porządku prawnego.

Organy nadzoru rynku prowadzą w szczególności kontrole spełniania przez wyroby wymagań. Są to wymagania, o których mowa bezpośrednio w unijnym prawodawstwie harmonizacyjnym lub w przepisach wdrażających to prawodawstwo. Kontrole mają na celu ocenę spełniania przez przyrządy pomiarowe wymagań zasadniczych, szczegółowych lub innych, jeżeli zostały one określone dla danego rodzaju przyrządu pomiarowego. Podczas kontroli u podmiotów gospodarczych oceniane są przyrządy pomiarowe uznane przez te podmioty za spełniające odpowiednie dla nich wymagania. Zakres kontroli w nadzorze rynku dotyczy badania dokumentacji, oględzin zewnętrznych i badań metrologicznych. Praktycznie może on być natomiast różny w zależności od rodzaju kontroli i kontrolowanego podmiotu. W zakres kontroli formalnej wchodzi badanie dokumentacji i oględziny zewnętrzne. Podczas kontroli producenta, oprócz oględzin, dokonuje się również analizy dokumentacji, zaś u użytkownika praktycznie wykonywane są tylko oględziny zewnętrzne oraz badanie spełnienia wymagań dotyczących błędów granicznych przyrządu pomiarowego. Postępowanie w sprawie wprowadzonych do obrotu lub oddanych do użytku wyrobów niezgodnych z wymaganiami wszczyna się (z urzędu zgodnie z art. 76 ust. 1 ustawy o systemach oceny

zgodności i nadzoru rynku) w przypadku stwierdzenia w toku kontroli, że wyrób nie spełnia wymagań albo nie spełnia wymagań i stwierdzono niezgodności formalne. Organ nadzoru rynku może wszcząć postępowanie również wtedy, gdy z innych dostępnych informacji, w szczególności z powiadomienia przekazanego przez organy państwa członkowskiego UE lub państwa członkowskiego Europejskiego Porozumienia o Wolnym Handlu (EFTA) – strony umowy o Europejskim Obszarze Gospodarczym, wynika, że wyrób nie spełnia wymagań, a został wprowadzony do obrotu przez producenta lub jego upoważnionego przedstawiciela albo importera czy też został udostępniony na rynku przez dystrybutora, mających siedziby na terytorium Rzeczypospolitej Polskiej. W toku postępowania można zastosować kontrole sprawdzające, które może przeprowadzić organ prowadzący postępowanie lub zlecić ich wykonanie innemu organowi nadzoru rynku. W przypadku stwierdzenia niezgodności, organ nadzoru rynku wzywa stronę postępowania do: usunięcia niezgodności wyrobu z wymaganiami lub niezgodności formalnych, wycofania wyrobu z obrotu lub użytku, zaprzestania udostępniania wyrobu, odzyskania wyrobu (nie ma zastosowania w przypadku przyrządów pomiarowych), zniszczenia wyrobu lub powiadomienia konsumentów lub innych użytkowników o stwierdzonych niezgodnościach z wymaganiami, określając termin i sposób powiadomienia – wyznaczając termin na przedstawienie dowodów potwierdzających wykonanie tego postanowienia. Środki te stosuje się w zależności od rodzaju stwierdzonych niezgodności wyrobu z wymaganiami, niezgodności formalnych lub stopnia zagrożenia powodowanego przez wyrób, mając na celu w szczególności usunięcie istniejącego zagrożenia dla życia i zdrowia użytkowników wyrobu, a także zagrożenia dla mienia, środowiska oraz interesu publicznego. Organ nadzoru rynku prowadzący postępowanie może wydać następujące decyzje: usunięcia niezgodności wyrobu, wycofania wyrobu z obrotu lub użytku, zaprzestania udostępniania wyrobu, odzyskania wyrobu, zniszczenia wyrobu, powiadomienia konsumentów lub innych użytkowników o stwierdzonych niezgodnościach z wymaganiami [25].

Kadry

Zgodnie z wcześniej zawartymi informacjami, zadania w zakresie metrologii prawnej zasadniczo wykonywane są przez pracowników administracji miar, tj. GUM i OUM wraz z ich wydziałami zamiejscowymi

(w zakresie nadzoru rynku wszystkie, natomiast w zakresie certyfikacji z pewnymi wyjątkami). Analiza struktury zatrudnienia [26] wskazuje, że mamy do czynienia ze starzejącą się kadrą wykonującą zadania w tym zakresie, wysokim poziomem fluktuacji, dużą liczbą odejść z pracy spowodowaną przejściem na emeryturę bądź do sektora prywatnego (dane nie pozwalają na jednoznaczne wyodrębnienie i liczbowe określenie pracowników wykonujących wyłącznie bądź w części zadania w zakresie metrologii prawnej (w tym również z podziałem na zadania certyfikacyjne i nadzorcze)). Zaobserwowana tendencja wskazuje również na coraz trudniejsze pozyskiwanie kandydatów do pracy. Przyczyn tego stanu rzeczy jest wiele, po pierwsze sytuacja na rynku pracy, a po drugie bardzo wysokie oczekiwania ze strony pracodawcy w powiązaniu ze szczególnymi uwarunkowaniami pracy i niskim wynagrodzeniem w porównaniu z wynagrodzeniami w sektorze prywatnym przy podobnych wymaganiach w szczególności dla osób z wykształceniem inżyniersko-technicznym. Prawdopodobnie tym można wyjaśnić sytuację, w których dany kandydat do pracy wyłoniony w toku postępowania rekrutacyjnego jednak tej pracy nie podejmuje i rekrutację należy przeprowadzać od początku. Wydaje się, że część przyczyn jest zbieżna z tymi, które zostały przedstawione przez autorów opracowań dotyczących poszczególnych działów metrologii, choć występują istotne różnice w charakterze pracy i wymaganiach. Dodatkowo nie można pominąć trudno mierzalnego, ale istotnego czynnika, jakim jest niski poziom społecznej świadomości metrologicznej co do roli metrologii dla gospodarki i społeczeństwa, w tym również roli Głównego Urzędu Miar jako instytucji wiodącej.

Bardzo ważnym powodem wymagającym szerszego omówienia jest brak odpowiednio wykwalifikowanej kadry na rynku pracy. Co do zasady do pracy przyjmowani są kandydaci z podstawowym, znikomym poziomem wiedzy bądź bez znajomości metrologii prawnej. Ci kandydaci wymagają jeszcze długotrwałego przygotowania do realizacji zadań. Częściej zdarzają się kandydaci z podstawową wiedzą w zakresie metrologii naukowej. Niemniej większość osób zgłaszających się do naborów nie zna podstawowych pojęć metrologicznych ani nie rozumie roli metrologii, co skutkuje brakiem zatrudnienia. Ponadto dostrzegany jest również jeszcze jeden czynnik choć niemerytoryczny. Kandydaci do pracy mają trudności analityczne, problemy w formułowaniu wniosków, a także konstruowaniu wypowiedzi w sposób logiczny, choć są to osoby

z wyższym wykształceniem (przedstawione tezy zostały sformułowane na podstawie znajomości przebiegu rozmów kwalifikacyjnych przeprowadzanych w procesie rekrutacji nowych pracowników).

W Polsce brak jest ustawicznych, stałych form kształcenia w zakresie metrologii prawnej. Nie są prowadzone szkolenia, studia wyższe czy innego rodzaju ogólnodostępne formy kształcenia, które pozwoliłyby na przygotowanie właściwych zasobów kadrowych w celu zapewnienia bezpieczeństwa technicznego w kraju poprzez odpowiedni poziom usług certyfikacyjnych i nadzorczych, realizowanych jako zadania państwa. W prawie krajowym ani innych dokumentach nie znajdziemy jakichkolwiek uregulowań dotyczących ścieżek kształcenia czy profilu pracownika metrologii prawnej. Proces przygotowania kadr odbywa się jedynie w ramach szkoleń wewnętrznych, stanowiskowych, ale już po zatrudnieniu w administracji miar. Mentorami zostają doświadczeni pracownicy, którzy dzielą swój czas pracy na realizację powierzonych zadań i przyuczanie nowo zatrudnionych osób do pracy. Przy uwzględnieniu powyższych uwarunkowań rynku pracy, poza czasochłonnością proces ten wydaje się być wysoce nieefektywny.

W tym miejscu należy wskazać, że osobom mającym realizować zadania w obszarze metrologii prawnej stawiane są wysokie wymagania z różnych dziedzin i dodatkowe kompetencje analityczne oraz tzw. miękkie. Aby praca w obszarze metrologii prawnej wykonywana była dobrze, potrzebne są osoby, które obok gruntownej wiedzy inżynierjno-technicznej, będą posiadać kompetencje prawne (umiejętności analizy i interpretacji np. wymagań technicznych zapisanych w aktach prawnych lub normach), znać międzynarodowe standardy działania, a w przypadku pracowników administracji miar posiadać również typowo urzędnicze kompetencje. Z pracą w metrologii prawnej wiązą się też duże ryzyka, ponieważ niesie ona zagrożenia korupcyjne, narażenie na stres oraz dużą odpowiedzialność dla osób podejmujących decyzje (np. dopuszczając przyrząd pomiarowy do obrotu na terytorium UE czy nakładając mandat w ramach czynności nadzorczych).

Dyskusje na forum międzynarodowym wykazały, że istnieje potrzeba stworzenia specjalnego programu szkoleniowego dla pracowników, którzy przeprowadzają certyfikacje, inspekcje i nadzór w zakresie metrologii prawnej. Z uzasadnienia do podjęcia prac nad nowelizacją dokumentu „Training and qualification of legal metrology personel” (OIML D 14) [27] dowiadujemy się, że „doświadczenie pokazuje, że

większość personelu biur legalizacji będzie potrzebowała kwalifikacji prawnika metrologa” lub kwalifikacji porównywalnych. W przypadku niektórych zadań w tej dziedzinie w celu spełnienia wymagań mogą być potrzebni przeszkoleni inżynierowie. Mogą oni np. pracować w centralnych instytucjach krajowych i zajmować się wdrażaniem zaleceń, standardów OIML lub ogólną oceną niepewności pomiarów.

Inżynierowie z wyższym wykształceniem wykonują głównie ściśle określone zadania w nauce, przemyśle lub laboratoriach w celu uzyskania zatwierdzenia typu. Ze względu na stosunkowo niewielką ich liczbę w dziedzinie metrologii prawnej, niniejsza rewizja koncentruje się wyłącznie na szkoleniu i kwalifikowaniu urzędników metrologii prawnej [27]. Światowy trend dotyczący kadry w zakresie metrologii prawnej został dostrzeżony 20 lat temu.

W efekcie prac nad nowelizacją powstał wspomniany dokument OIML D14 w aktualnym wydaniu, którego celem jest określenie ogólnych założeń kwalifikacji pracowników metrologii prawnej oraz proponowanie modeli programów szkoleniowych dla tego zawodu. Zgodnie z definicją zawartą we wspomnianym dokumencie specjaliści ds. metrologii prawnej to pracownicy wyznaczeni przez państwo lub władze lokalne czy też posiadający podobny status prawny, odpowiedzialni za realizację różnych zadań określonych w ramach stosowania przepisów ustawowych i wykonawczych w dziedzinie metrologii prawnej. Z rekomendacji dotyczącej naboru wynika, że specjaliści ds. metrologii prawnej są zwykle rekrutowani na poziomie uniwersyteckim, zazwyczaj w dyscyplinach naukowych i technologicznych. Powinni posiadać dobrą ogólną wiedzę z zakresu matematyki, fizyki i podstaw inżynierii. Przy wyborze specjalisty ds. metrologii prawnej zaleca się branie pod uwagę nie tylko wiedzy naukowo-technicznej, ale także ogólnej kultury i cech ludzkich. Zalecane kwalifikacje dla specjalistów ds. metrologii prawnej zawarte są w tabeli 6. W zależności od statusu instytucji mogą mieć zastosowanie wymagania normy PN-EN ISO/IEC 17025 – Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących dotyczące personelu [28] (w oryginale: *legal metrology officer*).

Tab. 6. Zalecane kwalifikacje dla specjalistów ds. metrologii prawnej

Wiedza	Kompetencje
Specjalista ds. metrologii prawnej powinien posiadać dobrą ogólną wiedzę na temat: • regulacji prawno-administracyjnych dotyczących metrologii prawnej • zasad metrologii ogólnej, w tym oprogramowania stosowanego w przyrządach i systemach pomiarowych • zasad budowy i działania poszczególnych przyrządów, które musi zweryfikować, oraz mających do nich zastosowanie przepisów • zasad zarządzania jakością, akredytacji i certyfikacji w zakresie metrologii prawnej	Specjalista ds. metrologii prawnej powinien być w stanie: • identyfikować naruszenia przepisów prawnych i regulacji dotyczących metrologii oraz sporządzać raporty oparte na faktach w certyfikowanych oświadczeniach • wykonywać pomiary warunków środowiskowych (na określonym poziomie dokładności) • przeprowadzić obliczenia statystyczne wynikające z kilku pomiarów kontrolnych poprzez pobranie próbek i wyciągać prawidłowe wnioski • przeprowadzać wzorcowanie, biorąc pod uwagę warunki zewnętrzne i wymagany poziom dokładności • identyfikować brak zastosowania obowiązkowych norm do gotowych produktów i ich komponentów

Tytułem uzupełnienia należy wskazać, że na forum światowym trwają już przygotowania do kolejnej nowelizacji omawianego dokumentu [29] z uwagi na dynamicznie zmiany technologiczne, w szczególności w odniesieniu do cyfryzacji, co powinno być silnie motywujące do podjęcia działań na gruncie polskim przy uwzględnieniu zawartej w niniejszym opracowaniu diagnozy stanu metrologii prawnej. Uzasadniając potrzebę nowelizacji, wskazuje się, że w obliczu rewolucjonizującego wpływu cyfryzacji stoimy teraz przed podwójnym zadaniem nadążania za postępem technologicznym przyrządów pomiarowych i znalezienia najlepszego połączenia metod cyfrowych i analogowych w szkoleniu pracowników zajmujących się metrologią prawną. Idealnie byłoby, gdyby nasze metody nauczania ewoluowały w tempie, w jakim ewoluuje cyfryzacja, która napędza również infrastrukturę metrologiczną [30]. Autor swoim artykułem zachęca do podjęcia prac w tym zakresie oraz jednoznacznie wskazuje na trudności, przed którymi stoimy, inspirując tym samym środowisko międzynarodowe do pogłębionej analizy i podjęcia wspólnych prac.

Dla zobrazowania, jak szeroki jest zakres wiedzy, którą powinny posiadać osoby wykonujące zadania certyfikacyjne lub nadzorcze, na koniec tej części jeszcze kilka słów o modelowych programach kształcenia w metrologii prawnej (więcej w dokumencie OIML D 14, łącznie z rozpisaniem czasu trwania). OIML D14 przewiduje trzy teoretyczne moduły szkoleniowe:

- procedury prawno-administracyjne,
- ogólne zasady metrologii,

- zarządzanie jakością, akredytacja i certyfikacja oraz moduły teoretyczne i praktyczne (w dokumencie przewiduje się również moduł teoretyczno-praktyczny związany z towarami paczkowanymi) dotyczące badania i sprawdzania poszczególnych rodzajów przyrządów pomiarowych (odnosi się to do przyrządów pomiarowych uregulowanych prawnie).

Istotne jest to, że dokument przewiduje szkolenie na etapie edukacji (na poziomie szkoły średniej lub uczelni wyższej). Zaleca się zapewnienie okresu szkolenia teoretycznego prowadzonego przez szkołę lub uczelnię, a zajęć praktycznych w urzędzie (instytucji) wykonującym czynności w ramach metrologii prawnej. Ze względu na szybki rozwój technik metrologicznych za konieczne uznaje się szkolenia uzupełniające, np. szkolenia ustawiczne obejmujące kursy praktyczne i teoretyczne trwające od pięciu do dziesięciu dni w roku dla osób zatrudnionych na stanowiskach związanych z metrologią prawną. Ten aspekt również wymaga uwzględnienia w Polsce. Treści szkolenia według dokumentu mają strukturę modułową, zgodną z wymaganymi kwalifikacjami specjalistów ds. metrologii prawnej. Jako że szkolenia mają na celu stosowanie przepisów prawnych dotyczących metrologii w danym kraju, powinny one oczywiście zostać dostosowane do tych przepisów i mogą różnić się w zależności od kraju.

3.3. Kontekst międzynarodowy

Wykonywanie prawnej kontroli metrologicznej jest zorganizowane w państwach Unii Europejskiej w sposób zróżnicowany. Nie ma jednego modelu organizacyjnego metrologii prawnej, który można by preferować. Każda z form organizacji prawnej kontroli metrologicznej jest odzwierciedleniem wielu czynników typowych dla danego kraju. Zaliczyć do nich można: ukształtowaną historycznie formę organizacyjną danego państwa, poziom rozwoju struktur organizacyjnych nadzorujących działalność podmiotów prywatnych w zakresie zadań państwa, a także zalecenia wypracowywane przez międzynarodowe organizacje metrologii prawnej, takie jak: OIML dla wszystkich krajów OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development), WELMEC (European Cooperation in Legal Metrology) dla krajów europejskich i dyrektywy unijne dla krajów członkowskich Unii Europejskiej [31]. Niemniej, tak jak wspomniano na wstępie, model obejmujący takie elementy jak: zatwierdzenie typu i legalizację pierwotną

przed wprowadzeniem do obrotu i użytkowaniem oraz legalizację ponowną w użytkowaniu, uzupełnione o narzędzia nadzorcze, jest najbardziej popularny również poza Europą. Zasady dotyczące metrologii prawnej przenikają między państwami bądź unifikują się dzięki szeroko pojętej współpracy międzynarodowej, w tym współpracy gospodarczej. Współpraca ponadnarodowa jest nieodzowna zarówno z punktu widzenia potrzeb gospodarki kraju, jak i jego kontaktów z innymi państwami. Zaangażowanie Polski, reprezentowanej przez GUM, na forach międzynarodowych przejawia się m.in. udziałem w: działaniach organizacji międzynarodowych i zainicjowanych przez nie projektach oraz porozumieniach i umowach dwu- i wielostronnych z podmiotami zagranicznymi. Potrzeba współpracy w zakresie metrologii prawnej wynika przede wszystkim z konieczności zapewnienia harmonizacji przepisów, co daje możliwość uznawania wyników czynności metrologicznych wykonywanych przez właściwe organy w Polsce w obszarze prawnie regulowanym na terenie Unii Europejskiej, jak i harmonizacji wymagań metrologicznych w skali międzynarodowej. W dziedzinie współpracy w zakresie metrologii prawnej Polska jest członkiem OIML oraz WELMEC (ściślej w WELMEC członkiem jest GUM, ponieważ WELMEC zrzesza, jak to dalej napisano, władze odpowiedzialne za metrologię prawną z państw członkowskich UE, a nie państwa jako takie). Przedstawiciele GUM uczestniczą w pracach Komitetów i Podkomitetów Technicznych, Grup Projektowych OIML oraz Grup Roboczych WELMEC. Główny Urząd Miar bierze udział także w pracach gremiów roboczych Komisji Europejskiej, np. w Grupie Roboczej ds. Przyrządów Pomiarowych. Jako jednostka notyfikowana GUM uczestniczy w pracach platformy NoBoMet (European Coordination Group of European Notified Bodies in Metrology), skupiającej jednostki notyfikowane do realizacji zadań z zakresu oceny zgodności przyrządów pomiarowych.

3.3.1. OIML

Międzynarodowa Organizacja Metrologii Prawnej jest jedną z najważniejszych międzynarodowych organizacji metrologicznych. Początki tej organizacji sięgają lat 50. ubiegłego wieku (a dokładnie 12 października 1955 r.), kiedy to w Paryżu państwa założycielskie, podpisały Konwencję ustanawiającą Międzynarodową Organizację Metrologii Prawnej (konwencja w Polsce została ogłoszona w Dz. U. z 1959 r. nr 4 poz. 24, a oświadczenie Rady Państwa zostało wydane 23 maja 1957

r.) [32]. Wraz ze wzrostem roli światowego handlu, zaczęło rosnąć znaczenie metrologii, czego następstwem było pojawienie się potrzeby stworzenia ogólnoświatowej organizacji metrologicznej, ułatwiającej przepływ towarów. Integracja w zakresie przepływu towarów, a więc szeroko pojęta integracja gospodarcza, postępowała nie tylko na poziomie europejskim, ale również ogólnoświatowym [33]. Organizacja obecnie liczy 64 członków oraz 63 członków korespondentów (stan na wrzesień 2023 r.) [34]. Zgodnie z Konwencją, celami organizacji są m.in. rozwijanie i wspieranie światowej harmonizacji procedur i trybu postępowania w zakresie metrologii prawnej. Organizacja ma za zadanie także popularyzację wiedzy z zakresu metrologii. Uczestnictwo w pracach OIML pozwala wszystkim członkom na otrzymanie aktualnych informacji od innych członków na temat nowych technologii, metod oceny zgodności, rozwiązań problemów dotyczących metrologii stosowanych w innych krajach i ich doświadczeń. Efektem prowadzonych prac technicznych OIML jest opracowywanie przez ekspertów z krajów członkowskich zaleceń, dokumentów oraz przewodników w obszarze metrologii prawnej, a następnie publikacja tych dokumentów. Najpopularniejszym rodzajem publikacji OIML są zalecenia (*recomendation* – oznaczane jako R) związane z technicznymi i metrologicznymi wymaganiami dla przyrządów pomiarowych, jak również metodami badań oraz sprawdzeń. Są one wykorzystywane w omawianej uprzednio procedurze oceny zgodności według dyrektyw europejskich jako specyfikacje zharmonizowane, uznane przez Komisję Europejską i ogłoszone w Dzienniku Urzędowym Unii Europejskiej, jak również stanowią podstawę do opracowania regulacji krajowych w obszarach niezharmonizowanych (przy braku regulacji na poziomie UE). Należy wspomnieć, iż stosowanie przepisów ustanowionych w dokumentach sformułowanych przez OIML nie ma charakteru obligatoryjnego. Kraje członkowskie mają moralny obowiązek ich wdrażania do krajowych porządków prawnych tak dalece jak to możliwe. Całość prac technicznych OIML odbywa się w Komitetach, Podkomitetach oraz Grupach Projektowych, w większości których zasiadają przedstawiciele Polski – pracownicy GUM. Dodatkowo GUM jest odpowiedzialny za sekretariat jednego z Komitetów – TC1 „Terminologia” (od początku jego istnienia) opracowującego podstawowy dla metrologii prawnej – Międzynarodowy Słownik Metrologii Prawnej [35].

3.3.2. WELMEC

Europejska Współpraca w dziedzinie Metrologii Prawnej (WELMEC e.V.) jest regionalną organizacją zrzeszającą władze odpowiedzialne za metrologię prawną z państw członkowskich UE, EFTA oraz kandydujących do UE. Należy zaznaczyć, że WELMEC e.V. działa jako stowarzyszenie na mocy prawa niemieckiego, a obecny status prawny obowiązuje od 2019 r.). Organizacja WELMEC powstała 8 czerwca 1990 r. w wyniku podpisania przez przedstawicieli ówczesnych członków UE i EFTA dokumentu założycielskiego – Memorandum of Understanding – zawierającego postanowienia dotyczące głównych celów i zadań, struktury organizacji oraz praw i obowiązków jej członków. Początkowo było to Western European Legal Metrology Cooperation (stąd WELMEC), ale ze względu na duże rozszerzenie UE w 2004 r. słowo Western zostało z nazwy usunięte, ale akronim pozostał bez zmian. Polska przystąpiła do grona państw członkowskich w maju 2004 r. Obecnie w pracach WELMEC uczestniczą państwa członkowskie – państwa UE, EFTA oraz kandydujące do UE lub które wdrożyły przepisy UE z zakresu metrologii. Ogólnym zadaniem WELMEC jest współpraca władz i interakcja z zainteresowanymi stronami w celu stworzenia zharmonizowanego oraz spójnego podejścia do metrologii prawnej w Europie, które wspiera wdrażanie europejskich ram regulacyjnych w zakresie metrologii. Od samego początku członkowie podzielali wspólne dążenie do swobodnego przepływu przyrządów pomiarowych poprzez zmniejszanie barier w handlu szeroką gamą przyrządów [36]. W celu realizacji powierzonych zadań WELMEC współpracuje z wieloma organizacjami regionalnymi i światowymi, zajmującymi się zagadnieniami związanymi z metrologią prawną oraz innymi zainteresowanymi podmiotami, np. zrzeszeniami producentów przyrządów pomiarowych. Ponadto na mocy oświadczenia Komisji Europejskiej z 2004 r. WELMEC uznawany jest przez Komisję za wyraziciela opinii władz metrologicznych krajów członkowskich. Pełni również rolę opiniodawczą oraz współpracuje w procesie harmonizacji norm europejskich oraz zaleceń Międzynarodowej Organizacji Metrologii Prawnej (OIML). Podstawowa działalność WELMEC realizowana jest w ramach grup roboczych utworzonych tematycznie. Podobnie jak w przypadku OIML przedstawicielami w grupach są pracownicy administracji miar. Grupy robocze są ustanawiane przez Komitet WELMEC w celu podjęcia prac nad szczegółowymi zagadnieniami, będącymi przedmiotem zainteresowania państw członkowskich. Obecnie

funkcjonuje 10 grup roboczych zajmujących się następującymi zagadnieniami: WG 2 – odważniki i przyrządy do pomiaru masy, WG 5 – nadzór metrologiczny, WG 6 – towary paczkowane, WG 7 – oprogramowanie, WG 8 – ogólne zastosowanie dyrektyw MID i NAWID, WG 10 – instalacje pomiarowe do cieczy innych niż woda, WG 11 – gazomierze i liczniki energii elektrycznej, WG 12 – taksometry, WG 13 – wodomierze i ciepłomierze oraz WG14 w sprawie transformacji cyfrowej (w trakcie formowania). Powoływane są również grupy *ad hoc*. Przykładem takiej grupy powołanej w odpowiedzi na rozwój technologiczny i potrzeby rynku w zakresie elektromobilności jest WELMEC *Ad Hoc Working Group „Harmonised European Charging Infrastructure”*. Ta grupa robocza zajmuje się kwestiami zasadniczymi i szczegółowymi wymaganiami dotyczącymi przyrządów pomiarowych zintegrowanych w stacjach ładowania, przy czym należy wziąć pod uwagę neutralność technologiczną oraz bezpieczeństwo przyszłości i innowacji.

Podstawowym efektem prac grup są przewodniki międzynarodowe. Stosowane są one jako dokumenty uzupełniające w procedurze oceny zgodności przyrządów pomiarowych według dyrektyw unijnych. Zawierają wytyczne i objaśnienia stanowiące to, co WELMEC uznaje za najlepszą możliwą do stosowania praktykę w danej dziedzinie, w czasie obowiązywania przewodnika. Przewodniki te nie mają jednak charakteru obligatoryjnego, ale są zalecane do stosowania przez Komisję Europejską. WELMEC ściśle współpracuje z KE w zakresie harmonizacji przepisów technicznych w dziedzinie metrologii (dotyczy omawianych uprzednio dyrektyw MID i NAWID).

3.3.3. NoBoMet

Europejska Grupa Koordynacyjna Jednostek Notyfikowanych w zakresie Metrologii Prawnej została założona w 2010 r. jako europejska platforma współpracy i wymiany informacji, zrzeszająca jednostki notyfikowane działające w obszarze przyrządów pomiarowych. Aktualnie (po zmianie statusu w 2019 r.), kiedy to została uznana przez Komisję Europejską, pełni rolę europejskiej grupy koordynacyjnej jednostek notyfikowanych w rozumieniu dyrektyw metrologicznych (zgodnie z art. 40 dyrektywy MID i art. 35 dyrektywy NAWID). Jak już wspomniano, jednostki notyfikowane pełnią kluczową rolę w procesie oceny zgodności, dlatego też konieczna jest jednolitość i spójność stosowanych przez nie praktyk. Zgodnie

z przepisami udział jednostek notyfikowanych w pracach grupy koordynacyjnej jest obligatoryjny. Platforma ta ustanawia wspólny kanał komunikacji od i do członków na tematy spotykane w praktyce [37]. Główny Urząd Miar pełniący również funkcję jednostki notyfikowanej uczestniczy w pracach NoBoMet.

3.3.4. Komisja Europejska

W strukturach Komisji Europejskiej funkcjonują dwa ciała zajmujące się zagadnieniami metrologii prawnej, w szczególności dwóch omawianych dyrektyw MID i NAWID. Pierwszym z nich jest grupa robocza – Przyrządy Pomiarowe, drugim zaś Komitet ds. Przyrządów Pomiarowych powołany na podstawie przepisów wymienionych Dyrektyw. Oba są nadzorowane przez Dyрекcję Generalną (skrót w nomenklaturze UE – DG GROW) - rynek wewnętrzny, przemysł, przedsiębiorczość i MŚP (sektor małych i średnich przedsiębiorstw). Grupa stanowi stałą formę współpracy ekspertów mającą za zadanie doradzanie Komisji na etapie przygotowywania wniosków w sprawie środków wykonawczych oraz wspieranie komisji w przygotowywaniu aktów delegowanych (tu oczywiście w zakresie metrologii prawnej). Rolą Komitetu ds. Przyrządów Pomiarowych jest wspieranie KE w jej pracach w zakresie przyrządów pomiarowych. Aktywność w ramach tych ciał koncentruje się na harmonizacji dokumentów normatywnych oraz załącznikach technicznych do dyrektyw MID i NAWID. We wspomnianych strukturach KE Polska jest reprezentowana przez przedstawicieli ministra właściwego ds. gospodarki z prawem głosu oraz GUM, którego rolą jest zapewnienie wsparcia eksperckiego.

3.4. Identyfikacja problemów i potrzeb

W opracowaniu przedstawiono diagnozę stanu polskiej metrologii prawnej. W podsumowaniu należy zwrócić uwagę na rolę tego obszaru w zapewnieniu prawidłowego funkcjonowania państwa i jego bezpieczeństwa technicznego. Metrologia prawna odnosi się lub może dotyczyć wszystkich wskazanych w niniejszej monografii obszarów metrologii, np.: elektrycznej, chemicznej, medycznej, w zależności od uregulowań prawnych w danym państwie (czy też na poziomie europejskim) uwarunkowanych potrzebami rynku związanymi z silnie rozbudowanymi określonymi sektorami

gospodarki, sytuacją gospodarczą czy polityką państwa skoncentrowaną na ochronie określonych obszarów, takich jak: bezpieczeństwo publiczne, ochrona środowiska, ład fiskalny. Oczywiście obszary te podlegają przeobrażeniom zależnie od stopnia rozwoju i postępu technicznego. Część problemów została wskazana przy okazji omawiania poszczególnych elementów metrologii prawnej. Pozostałe zostaną zaprezentowane poniżej. Identyfikacja problemów i potrzeb w tym obszarze powinna być rozpatrywana co najmniej w trzech aspektach: technicznym, prawnym oraz organizacyjnym.

Na początku należy zauważyć, że od czasu ustalenia aktualnych regulacji dokonuje się stały postęp w zakresie konstrukcji wielu rodzajów przyrządów pomiarowych. W wielu przypadkach proste przyrządy pomiarowe zostały zastąpione skomplikowanymi przyrządami pomiarowymi wykorzystującymi najnowocześniejsze zdobycze współczesnej techniki oraz oferującymi zdecydowanie mniejszą niepewność pomiaru. W związku z powyższym, zachodzą potrzeby wyposażania laboratoriów badawczych administracji w coraz bardziej zaawansowany technologicznie, a tym samym kosztowny sprzęt, oraz zatrudniania kadry o znacznie wyższych kompetencjach niż np. 10–20 lat temu. Pociąga to za sobą większe koszty działalności, w tym zakresie obciążające administrację miar, a właściwie budżet państwa.

Łatwo możemy zauważyć, że tradycyjna forma przyrządu pomiarowego jako „skrzynki” z pojedynczą funkcją i wyświetlaczem zanika. Funkcje pomiarowe stają się coraz bardziej zintegrowane z innymi funkcjami, takimi jak: sterowanie procesami, komunikacja, diagnostyka i formy sztucznej inteligencji. Ta tendencja do integracji funkcji jest coraz bardziej sprzeczna z chęcią oddzielenia części istotnych z metrologicznego punktu widzenia, które dominują w obowiązujących podejściach do prawnej kontroli metrologicznej. Ponadto wysoki poziom łączności powoduje różnego rodzaju wyzwania, ale jednocześnie otwiera bezprecedensowe możliwości oceny wydajności metrologicznej przyrządów w czasie rzeczywistym. Wyzwaniem jest np. odejście od zintegrowanej budowy przyrządu pomiarowego i konstruowanie przyrządów w sposób rozproszony (przetwornik pomiarowy jest usytuowany w miejscu pomiaru, zaś przetwarzanie sygnału pomiarowego odbywa się gdzie indziej, a wynik pomiaru prezentowany jest jeszcze w innym miejscu lub miejscach). Przykładem powyższej tendencji jest to, że przyrządy pomiarowe są coraz częściej połączone z chmurą, a część funkcji przyrządu, takich jak np. obliczanie ceny, może

odbywać się w chmurze. Jak dotąd społeczność metrologiczna była w stanie poradzić sobie z tymi wyzwaniami, chociaż wypracowane rozwiązania są dość tradycyjne. Przykładami związanymi z oprogramowaniem są numery wersji i sumy kontrolne, które udostępnia się w certyfikacie oceny typu i w samym urządzeniu. Innym przykładem przyrządu pomiarowego, który nie mieści się w dotychczasowym podejściu może być stacjonarny przyrząd do pomiaru prędkości pojazdów w kontroli ruchu drogowego, gdzie sygnał pomiarowy generowany przez przetworniki pomiarowe (przyrządy radarowe połączone z kamerą, pętle indukcyjne usytuowane w nawierzchni drogi połączone z kamerą lub kamerami itd. – w uproszczeniu czujniki) jest przetwarzany w centralnym serwerze, wspólnym dla wielu miejsc zainstalowania czujników. Kolejnym wyzwaniem, dla którego nie znaleziono jeszcze zadowalającego rozwiązania, jest wykorzystanie smartfonów jako interfejsu lub jedyne go wyświetlacza dla przyrządów pomiarowych. Przykładami są liczniki energii elektrycznej, instalacje stosowane na stacjach paliw i stacje ładowania pojazdów elektrycznych. Ponadto istotny wpływ na obszar metrologii prawnej ma taryfowanie, które jest uważane za kluczowe dla zwiększenia efektywności energetycznej. Wiąże się to chociażby z koniecznością opracowania podejścia do zdalnego odczytu, walidacji, przechowywania i udzielania dostępu do danych, które może spełnić oczekiwania metrologii prawnej, że integralność danych jest zabezpieczona, a dane rzeczywiście odpowiadają zmierzonym wartościom. W związku z tym istotnym problemem jest realizacja zadań metrologii prawnej przy tak dynamicznym rozwoju technologii, przy jednoczesnym pozwoleniu na ochronę dóbr podstawowych [38].

Obecnie obowiązujące założenia metrologii prawnej, w tym jej formy, zostały ukształtowane w zupełnie innej rzeczywistości technicznej. Dość wspomnieć, że o badaniu typu i legalizacji pisał już sam Zdzisław Rauszer (organizator i pierwszy dyrektor GUM po uzyskaniu przez Polskę niepodległości) [39] w czasach II Rzeczypospolitej. To oczywiście potwierdza rangę tego obszaru dla państwowości, ale pokazuje również, że założenia, jakie stanowiły postawę do ukształtowania np. form prawnej kontroli metrologicznej, raczej się zdezaktualizowały. Oczywiście przez kolejne lata narzędzia i terminologia metrologii prawnej ulegały licznym przeobrażeniom, niemniej główne ramy i podstawowe założenia pozostają nadal w mocy. Powyższe argumenty wydają się być dostatecznymi przesłankami do pogłębionej analizy zmierzającej do rewizji wspomnianych założeń. Za absolutne

minimum należy uznać przygotowanie metrologii prawnej do transformacji energetycznej oraz cyfrowej.

Co więcej, wykaz przyrządów pomiarowych podlegających certyfikacji na podstawie prawa krajowego i metrologicznych dyrektyw unijnych również zasadniczo od ok. 20 lat nie ulegał zmianom. Obserwacje danych pokazują, że brak jest zainteresowania certyfikacją pewnego rodzaju przyrządów pomiarowych, a intensyfikuje się potrzeba włączenia do obszaru regulowanego nowych grup przyrządów pomiarowych. Jest to oczywiście naturalną konsekwencją postępu technicznego. Ponadto samo prawodawstwo unijne narzuca stosowanie konkretnych rodzajów przyrządów pomiarowych w określonych sektorach, np. ochrona klimatu, czy też niektóre regulacje unijne pośrednio wymuszają wprowadzenie nowych rozwiązań na organach państwowych lub instytucjach sektora prywatnego. Warto zwrócić uwagę na relację dyrektyw MID i NAWID z ważnymi niemetrologicznymi aktami prawnymi przyjętymi na poziomie UE, takimi jak m.in.: Zielony Ład [40], Dyrektywa w sprawie wspólnych zasad rynku wewnętrznego energii elektrycznej [41], Zalecenie w sprawie przygotowań do rozpowszechnienia inteligentnych systemów pomiarowych [42], Rozporządzenie w sprawie infrastruktury paliw alternatywnych (AFIR) [43] dotyczące gospodarki wodorowej oraz elektromobilności. Poniżej przedstawiono kilka aspektów technicznych i prawnych, które pozwalają na zobrazowanie podstawowych problemów.

Producenci stale opracowują nowe sposoby ulepszania swoich urządzeń. W ciągu ostatnich kilku lat zaczęli wprowadzać wewnętrzną diagnostykę do swoich przyrządów pomiarowych, aby śledzić wydajność i wysyłać ostrzeżenia do użytkownika, gdy przyrząd nie działa prawidłowo. Chociaż niektóre państwa członkowskie zezwalają na stosowanie autodiagnostyki w celu monitorowania, czy przyrząd nadal spełnia wymagania, to nie ma zgody co do wartości diagnostyki dla prawnych celów metrologicznych, np. czy diagnostyka może zastąpić potrzebę ponownej legalizacji.

Dyrektywa w sprawie efektywności energetycznej [44, 45] wymaga od państw członkowskich wprowadzenia zmiennych taryf kwartalnych w celu stymulowania energooszczędnych zachowań konsumentów. Obecne wymagania dotyczące liczników energii elektrycznej stanowią spore wyzwanie dla zgodnego z prawem wdrożenia dyrektywy w sprawie efektywności energetycznej. W rzeczywistości wszystkie dane wykorzystywane do wystawienia rachunku powinny być dostępne dla konsumenta za pośrednictwem wyświetlacza licznika. Jest to bardzo niepraktyczne i nadal

niewystarczające, aby móc sprawdzić rachunek, ponieważ dane te powinny być połączone z obowiązującymi taryfami w odpowiednich przedziałach czasowych. Przyjazne dla konsumenta rozwiązanie nieuchronnie będzie musiało być oparte na Internecie i będzie wymagało weryfikacji danych na podstawie odczytów licznika. Każde rozwiązanie będzie musiało bazować na dowodach. Podobny problem daje się zauważyć w przypadku stacji ładowania pojazdów elektrycznych. W praktyce wiele takich stacji nie ma wyświetlacza, na którym można zweryfikować odczyty liczników, a konsument jest w pełni zależny od informacji dostarczanych przez dostawcę usług mobilnych. Biorąc pod uwagę wysokie cele w zakresie wdrażania stacji ładowania, należy przyznać, że sytuacja ta wymaga rozwiązania akceptowalnego pod względem metrologicznym.

Ogólną tendencją w obszarze oprogramowania jest niezwłoczne dostosowywanie się do nowych potrzeb i natychmiastowe usuwanie luk w zabezpieczeniach. Wymaga to możliwości szybkiej adaptacji oprogramowania, co nie jest zgodne z obecnie przyjętymi praktykami. Możliwe, że podejścia, w których wszystkie zmiany są rejestrowane i identyfikowalne w chmurze metrologicznej, mogły być przydatne do celów weryfikacji zmian oprogramowania, w czasie rzeczywistym.

Konieczne jest udzielenie odpowiedzi na następujące pytania: jak sprostać tym wyzwaniom przy wspomnianych niedoborach w zakresie kadr i braku programów kształcenia, w jaki sposób zapewnić infrastrukturę niezbędną do realizacji zadań przy tak zaawansowanych technologiach? Budowa zaplecza laboratoryjnego w Świętokrzyskim Kampusie Laboratoryjnym GUM (KAMPUS), znacznie pomoże, ale z całą pewnością nie w pełnym zakresie. Infrastruktura niezbędna do realizacji usług musi być dostępna na obszarze całego kraju. W szczególności w zakresie przyrządów produkowanych seryjnie. Dodatkowo konieczne jest wyposażenie administracji w narzędzia i np. oprogramowanie wspomagające pracę specjalistów metrologii prawnej, jak również pozyskanie i wykształcenie osób, które będą te zadania wykonywać. Ogólnym celem jest stworzenie przyszłościowego podejścia metrologicznego, z zamiarem utrzymania wysokiego poziomu zaufania, przy jednoczesnym pozostawieniu przepisów metrologicznych i bez blokowania innowacji [46]. Powyższe problemy zdają się potwierdzać informacje zawarte na początku rozdziału, że infrastruktura jakości ma kluczowe znaczenie dla gospodarki. Inaczej rzecz ujmując bez metrologii, certyfikacji i nadzoru rynku nie jest możliwe zapewnienie zrównoważonego rozwoju gospodarczego.

Kierunki rozwoju metrologii prawnej

W pierwszej kolejności należy odpowiedzieć na pytanie, czy samo pojęcie prawnej kontroli metrologicznej, jej zadania, cele, beneficjenci itp. wymagają obecnie redefinicji. Odpowiedź brzmi nie. Idea metrologii prawnej nie wymaga zmian. Szybki postęp techniczny we współczesnym świecie z pewnością ułatwia i usprawnia wykonywanie pomiarów, a także umożliwia osiąganie niespotykanych wcześniej dokładności, ale te możliwości techniczne nie muszą przenosić się na rzetelność i zaufanie podmiotów do wykonywanych pomiarów, a praktyka współczesnego świata pokazuje że możliwości techniczne mogą być wykorzystywane przeciw interesom klientów i są czymś zupełnie niezwiązanym z zaufaniem do systemów, które je wykorzystują.

Stąd metrologia prawna w swoich rdzennych podstawach i pełnią rolę w społeczeństwie pozostaje wciąż aktualna.

Biorąc pod uwagę potrzebę istnienia metrologii prawnej, podjęto próbę określenia strategicznych kierunków jej rozwoju. Pracę oparto na kilkunastu latach doświadczenia zawodowego autorki oraz przeprowadzonej diagnozie stanu metrologii prawnej przedstawionej w pierwszej części niniejszej pracy.

4.1. Zakres przedmiotowy i strategiczne kierunki rozwoju metrologii prawnej

Przedmiotem metrologii prawnej są przyrządy pomiarowe objęte systemem prawnej kontroli metrologicznej. Z jednej strony, niektóre przyrządy pomiarowe z upływem czasu i ze zmianami w gospodarce tracą na znaczeniu, np. z powodu tego, że w gospodarce znaczenie gałęzi, w których były stosowane, znacznie spadło albo relatywnie obniżyła

się wartość odmierzanych dóbr, a wciąż ich obmiar objęty jest prawną kontrolą metrologiczną. Lista przyrządów pomiarowych, podlegających prawnej kontroli metrologicznej na podstawie prawa krajowego i metrologicznych dyrektyw unijnych, zasadniczo od ok. 20 lat, nie uległa zmianom. Z drugiej zaś strony na rynku pojawiają się nowe technologie, z których zaczynają korzystać konsumenci. Przykładowo odmierzane są alternatywne „paliwa” stosowane do napędu pojazdów, inne niż tradycyjne paliwa płynne. Pojawia się więc potrzeba opomiarowania ilości energii elektrycznej, wodoru, LNG (skroplony gaz ziemny) czy powszechnie stosowanego już LPG (skroplony gaz płynny) zakupionego do napędu pojazdu, analogicznie, jak w przypadku paliw płynnych, tj. w sposób rzetelny i nadzorowany, zapewniający obu stronom zaufanie do ilości, która podlega transakcji. W mieszkaniach pojawiają się instalacje umożliwiające zarówno ogrzewanie, jak i chłodzenie, oparte o inwerterowe pompy ciepła. Naturalne jest więc nadzorowane opomiarowanie nie tylko ciepła dostarczanego (ciepłomierze), ale i ciepła odbieranego (chłodomierze), jeśli ciepło/chłód kupujemy od dostawców mediów. Zasadnym może być także w niedalekiej perspektywie włączenie do obszaru regulowanego nowych grup przyrządów pomiarowych, stymulujących podnoszenie efektywności energetycznej lub ochronę klimatu. Z takich naturalnie zachodzących procesów widać wyraźnie, że rozwój metrologii prawnej wymaga systematycznego weryfikowania rodzajów przyrządów pomiarowych podlegających prawnej kontroli metrologicznej. Dopasowywanie rodzajów przyrządów pomiarowych objętych metrologią prawną do zmieniających się potrzeb gospodarki i społeczeństwa poprzez usuwanie jednych, a wprowadzanie innych, jest niezbędnym działaniem nakierowanym na rozwój metrologii prawnej. Należy je odnotować na jednym z pierwszych miejsc jako strategiczny kierunek rozwoju tej dziedziny.

Działanie to wpisuje się w obowiązek wdrażania prawodawstwa unijnego, które bezpośrednio zobowiązuje do stosowania określonych rodzajów przyrządów pomiarowych w określonych sektorach, np. ochrona klimatu, czy też pośrednio wymusza wprowadzenie nowych przyrządów do prawnej kontroli metrologicznej. Wynika to z przytoczonych rozwiązań, takich jak: Zielony Ład, Dyrektywa w sprawie wspólnych zasad rynku wewnętrznego energii elektrycznej, Zalecenie w sprawie przygotowań do rozpowszechnienia inteligentnych systemów pomiarowych czy Rozporządzenie w sprawie infrastruktury paliw alternatywnych (AFIR) dotyczące gospodarki wodorowej oraz elektromobilności.

4.2. Narzędzia metrologii prawnej i strategiczne kierunki rozwoju w obszarze systemowym

Klasyczne krajowe podejście do metrologii prawnej określa, że prawna kontrola metrologiczna przyrządów pomiarowych, będąca podstawowym narzędziem metrologii prawnej, jest wykonywana poprzez: zatwierdzenie typu przyrządu pomiarowego na podstawie badania typu, legalizację pierwotną (albo legalizację jednostkową) – przed wprowadzeniem danego egzemplarza przyrządu pomiarowego do użytkowania oraz legalizację ponowną – w stosunku do przyrządów pomiarowych wprowadzonych już do użytkowania. Współczesne europejskie podejście do prawnej kontroli metrologicznej pokazuje, że w celu zapewnienia swobodnej wymiany handlowej między państwami, potrzebna jest harmonizacja systemu prawnej kontroli metrologicznej na szczeblu europejskim (mimo że sposób jej uregulowania od zawsze należał do wyłącznej kompetencji władz krajów członkowskich).

Nowe podejście ustanowiło w Europie szczególną formę prawnej kontroli metrologicznej – ocenę zgodności z zasadniczymi wymaganiami. W latach 90. oceną zgodności objęte zostały wagi nieautomatyczne [13], a w 2004 r. dyrektywa MID [14] włączyła kolejne 10 kategorii przyrządów pomiarowych do systemu oceny zgodności. Oceny zgodności dokonuje się przed wprowadzeniem przyrządu do obrotu przy zastosowaniu, według wyboru producenta, jednej z procedur – tzw. „modułu”. Zgodność przyrządu z wymaganiami odpowiedniej dyrektywy potwierdza się poprzez naniesienie znaku „CE” i dodatkowego oznakowania metrologicznego „M”. Po dokonaniu oceny zgodności producent musi wystawić deklarację zgodności – dokument umożliwiający identyfikację produktu, producenta oraz dyrektyw, z którymi zgodność potwierdza. Przyrządy te powinny być wprowadzane na rynki państw członkowskich bez przeszkód.

Można powiedzieć, że europejski system oceny zgodności przyrządów pomiarowych jest systemem równoległym względem krajowej prawnej kontroli metrologicznej, zastępującym ją w zakresie zatwierdzenia typu i legalizacji pierwotnej, tj. na etapie przed wprowadzeniem przyrządu pomiarowego do użytkowania (w użytkowaniu pozostaje wyłącznie legalizacja ponowna regulowana według prawa krajowego).

Nowe podejście (ocena zgodności) różni się znacząco od tradycyjnego. Dopuszcza do czynności z zakresu prawnej kontroli podmioty prywatne,

a także przeprowadzenie oceny zgodności przez samego producenta. Ponadto ocenę zgodności można przeprowadzić w wybranej jednostce notyfikowanej w dowolnym państwie. Wcześniejsze podejścia ograniczały tę możliwość do wyznaczonego w danym państwie organu. Zmianie uległ także charakter regulacji wymagań dla przyrządów. Zasadnicze wymagania ujmuje się w przepisach, natomiast szczegółowe specyfikacje techniczne w normach. Nastąpiło przeniesienie ciężaru odpowiedzialności na producenta – to on jest zobowiązany do wykazania, że jego przyrząd spełnia zasadnicze wymagania. Nakładając oznakowanie „CE”, producent bierze więc na siebie odpowiedzialność za wyrób. Z punktu widzenia producenta, nowe podejście ułatwiło dostęp do rynków innych państw w Europie i nie tylko. Europejską ocenę zgodności uznaje także wiele państw z innych kontynentów. Ocena zgodności wypracowana na poziomie UE jest systemem wprowadzającym nowe podejście do prawnej kontroli metrologicznej i przyjęła się zdecydowanie lepiej niż inne systemy certyfikacji zaproponowane przez organizacje metrologii prawnej, w tym system OIML-CS [22] opracowany przez Światową Organizację Metrologii Prawnej (OIML), który nie jest tak nowatorski jak ocena zgodności i generalnie bazuje na podejściu klasycznym.

Ocena zgodności wydaje się więc ewidentnie najciekawszym i najważniejszym kierunkiem rozwoju krajowej prawnej kontroli metrologicznej na etapie wprowadzania przyrządu pomiarowego do użytkowania.

Wprowadzenie narzędzia oceny zgodności w miejsce zatwierdzenia typu i legalizacji pierwotnej należy wskazać jako strategiczny kierunek rozwoju metrologii prawnej w Polsce.

Zmiany w kierunku przejścia na system oceny zgodności powinny być realizowane na dwóch poziomach: ogólnym – w zakresie zasad systemowych metrologii prawnej wspólnych dla wszystkich dziedzin pomiarowych oraz szczegółowym (technicznym) – w zakresie poszczególnych rodzajów przyrządów pomiarowych. W odniesieniu do regulacji na poziomie ogólnym, tak jak wskazano powyżej, zasadne wydaje się ukształtowanie prawnej kontroli metrologicznej według modelu europejskiego systemu oceny zgodności. Aktualny stan rzeczy, z uwagi na wielość obowiązujących podejść (podejście klasyczne równoległe z oceną zgodności), może powodować pewne trudności dla producentów i użytkowników, dlatego że przyrządy pomiarowe podlegają innym reżimom prawnym. Analizując krajowe systemy prawnej kontroli w Europie, można zaobserwować, że niektóre państwa już podjęły lub podejmują prace w celu ujednolicenia

systemu, co czynią, rezygnując z tradycyjnych form prawnej kontroli na rzecz oceny zgodności (np. Niemcy, Hiszpania). System oceny zgodności adaptuje też Wielka Brytania po wystąpieniu ze struktur Unii Europejskiej (ang. *United Kingdom Conformity Assessment – UKCA*) [47].

W kontekście szczegółowym wskazane wydaje się oparcie wymagań technicznych i metrologicznych na normach i dokumentach międzynarodowych, w tym zaleceniach wspomnianej już Międzynarodowej Organizacji Metrologii Prawnej. Takie rozwiązanie w sposób istotny powinno sprzyjać wymianie handlowej, przyczyniając się jeszcze bardziej do znoszenia wciąż istniejących barier. Dla przypomnienia zalecenia (*recomendation* – oznaczane jako R) są najpopularniejszym rodzajem publikacji OIML. Dotyczą one technicznych i metrologicznych wymagań dla przyrządów pomiarowych, jak również metod badań oraz sprawdzeń. Są one wykorzystywane w omawianej uprzednio procedurze oceny zgodności według dyrektyw europejskich jako specyfikacje zharmonizowane, uznane przez Komisję Europejską i ogłoszone w Dzienniku Urzędowym Unii Europejskiej. Stanowią również podstawę do opracowania regulacji krajowych w obszarach niezharmonizowanych (przy braku regulacji na poziomie UE). Ich stosowanie jednakże nie ma charakteru obligatoryjnego. Kraje członkowskie mają jedynie moralny obowiązek ich wdrażania do krajowych porządków prawnych tak dalece jak to możliwe, przy czym wdrażanie to wydaje się ze wszech miar wskazane i jak już wspomniano powyżej, jest stosowane na szczeblu Unii Europejskiej.

Warto także podkreślić, że system oceny zgodności dotyczy wielu rodzajów wyrobów, nie tylko przyrządów pomiarowych, a wymagania określone są w różnych dyrektywach, z których większość przewiduje nałożenie oznakowania „CE”. Natomiast obecność tego oznakowania na wyrobie oznacza, że jest on zgodny z wszystkimi właściwymi mu dyrektywami. Dyrektywy dotyczące przyrządów pomiarowych przewidują dodatkowe oznakowanie metrologiczne w postaci litery „M”. Nad rzetelnością funkcjonowania systemu oceny zgodności czuwają tzw. organy nadzoru rynku. W Polsce rolę głównej instytucji odpowiedzialnej za nadzór rynku pełni Urząd Ochrony Konkurencji i Konsumentów [20], zaś w zakresie dyrektyw metrologicznych funkcję organów nadzoru rynku pełnią organy administracji miar.

Do efektywnego działania systemu oceny zgodności konieczne jest wzmocnienie pozycji i rozwój krajowych jednostek notyfikowanych. Jak wspomniano w części opracowania dotyczącej stanu metrologii prawnej,

problem dostępności usług oceny zgodności według dyrektywy MID występuje w zakresie takich przyrządów jak analizatory spalin czy przyrządy do pomiarów wielu wymiarów (przyrządy do pomiaru długości, pola powierzchni i wielu wymiarów). W Polsce brak jest możliwości przeprowadzenia oceny zgodności według modułów H i H1 dla któregośkolwiek z przyrządów pomiarowych podlegających ocenie zgodności oraz według modułu B dla analizatorów spalin czy przyrządów do pomiarów wielu wymiarów. W tym kontekście warto podjąć się również identyfikacji okoliczności sprzyjających migracji producentów krajowych do zagranicznych jednostek notyfikowanych. Na podstawie doświadczeń i informacji pozyskanych ze środowiska producentów przyrządów pomiarowych, można wstępnie wskazać, że takimi przyczynami są m.in. czas realizacji procedury oceny zgodności czy szerszy zakres świadczonych usług, co ułatwia przedsiębiorcom wprowadzanie do obrotu ich wyrobów, tj. np. oferowanie oprócz oceny zgodności według dyrektywy MID również usług certyfikacyjnych na podstawie innych dyrektyw, którym podlegają te wyroby. Argumentem dodatkowym zdaje się być również oferowanie szerszego wachlarza modułów oceny zgodności, dając tym samym producentom większą możliwość wyboru odpowiedniego dla nich rozwiązania, jak również jednoczesnej certyfikacji w ramach innych systemów, np. OIML i UKCA, co z kolei otwiera producentom drogę na rynki pozaunijne.

Biorąc pod uwagę powyższe informacje oraz wskazany strategiczny kierunek rozwoju opierający się o system oceny zgodności, należy również przyjąć jako kierunek strategiczny rozwoju metrologii prawnej w Polsce wzmocnienie pozycji i rozwój krajowych jednostek notyfikowanych, pełniących kluczową rolę w systemie oceny zgodności.

Realizacja tego kierunku rozwoju, oprócz wykształcenia odpowiednich zasobów kadrowych do pracy certyfikacyjnej, powinna obejmować także zwiększenie nakładów na wyposażenie badawcze zarówno będące własnością jednostek notyfikowanych, jak i laboratoriów akredytowanych, niepowiązanych z jednostkami notyfikowanymi. Niewątpliwie wpisuje się w to uruchomienie Świętokrzyskiego Kampusu Laboratoryjnego Głównego Urzędu Miar, który znacząco zwiększy szeroko rozumiane możliwości badawcze w metrologii.

Oprócz bazy laboratoryjnej i kompetentnego personelu do rozwoju jednostek notyfikowanych niezbędne jest także rozszerzenie zakresu świadczonych usług i zintensyfikowanie działań promocyjnych. W tym zakresie powinno się podejmować działania dwutorowo, tj. w odniesieniu

do aktualnego zakresu dyrektywy MID – doprowadzenie do dostępności usług w możliwie najszerszym zakresie oraz przygotowanie do realizacji usług na podstawie dyrektyw po planowej nowelizacji (w zakresie liczników inteligentnych, instalacji do pomiaru wodoru czy liczników energii zainstalowanych w stacjach ładowania pojazdów elektrycznych (w zależności od ostatecznego kształtu)). Kompetentne i posiadające odpowiednie zaplecze badawcze jednostki notyfikowane będą mogły również wykonywać usługi na potrzeby podmiotów zagranicznych, a także w ramach innych systemów certyfikacji niż europejska ocena zgodności z dyrektywami MID i NAWID.

Mając na względzie wskazane kierunki rozwoju, niezbędne wydaje się ponowne przyjrzenie się sytuacji w obszarze oceny zgodności i zapewnienie dostępności usług certyfikacyjnych zgodnie z potrzebami rynku. Te działania mogą być realizowane we współpracy z organami nadzorującymi, jak i podmiotami naukowymi. Wspomniana kierunkowa zmiana w obszarze jednostek notyfikowanych powinna pozwolić polskim producentom przyrządów pomiarowych (posiadającym siedzibę w Polsce) uniknąć wykonywania certyfikacji za granicą, co z kolei zminimalizuje ryzyko wystąpienia zjawisk negatywnych, takich jak: pozyskanie przez zagraniczny przemysł innowacyjnych rozwiązań (dostęp do dokumentacji projektu), podwyższone koszty certyfikacji, w szczególności poprzez transport obiektu(ów) do badań, zmniejszenie wpływów do skarbu państwa, a także uszczerbek prestiżowy Polski na arenie międzynarodowej.

4.3. Inne czynniki i uwarunkowania wyznaczające strategiczne kierunki rozwoju metrologii prawnej

4.3.1. Nakierowanie na cel

W opinii autorki przyjęte rozwiązania w zakresie strategicznych kierunków rozwoju metrologii prawnej, podobnie jak w podejściu europejskim, powinny koncentrować się na realizacji podstawowego celu metrologii prawnej, tj. zapewnieniu rzetelności pomiaru w zakresie nieprzekraczania błędów granicznych dopuszczalnych i zaufania obywateli do prezentowanego wyniku pomiaru, w tym m.in. możliwości potwierdzenia, że wynik pomiaru jest wynikiem działania przyrządu/

systemu nadzorowanego przez administrację miar, objętego prawną kontrolą metrologiczną. Należy zaznaczyć, że nie powinny być one nadmiernie obszerne i szczegółowe (w aspekcie regulowanych zagadnień i wymagań technicznych), a także powinny dotyczyć wszelkich cech przyrządu, w tym cech objętych wymaganiami innych systemów kontroli wyrobów.

Wskazane byłoby również, celem uproszczenia systemu, na ile to możliwe, obejmowanie wymaganiami szczegółowymi całych kategorii przyrządów pomiarowych (np. przyrządy do pomiaru zużycia mediów komunalnych) i typów ryzyka (np. zapewnienie integralności przyrządu pomiarowego), a nie poszczególnych rodzajów przyrządów pomiarowych. Wymagania powinny być ustalone na poziomie minimum niezbędnym do realizacji celu metrologii prawnej, bez wkraczania w obszary objęte wymaganiami innych systemów regulacji i nadzoru nad wyrobami w użytkowaniu niż metrologia prawna. Takie podejście powinno uprościć proces stanowienia prawa technicznego w krajowej metrologii prawnej i ujednolicić wymagania dla różnych rodzajów przyrządów pomiarowych, przy jednoczesnej koncentracji na zasadniczym celu systemu, jakim jest zaufanie obywatela do rzetelności wykonanego pomiaru.

Nakierowanie na cel prawnej kontroli metrologicznej i ograniczenie wymagań do bezpośrednio z nim powiązanych, w połączeniu z uniwersalizacją wymagań dla grup przyrządów i rodzajów ryzyka, można wskazać jako kolejny strategiczny kierunek rozwoju krajowej metrologii prawnej.

4.3.2. Nowoczesne narzędzia w nadzorze i współdziałanie z innymi organami nadzoru rynku

Powszechnie wiadomo, że nawet najlepszy system kontroli przyrządów pomiarowych na etapie ich wprowadzania do użytkowania, bez skutecznego nadzoru w użytkowaniu, nie będzie wystarczający do realizacji celu stawianego przed metrologią prawną. Klasycznie nadzór metrologiczny nad przyrządami pomiarowymi w użytkowaniu opiera się na okresowej legalizacji ponownej, polegającej na sprawdzeniu każdego egzemplarza przyrządu pomiarowego w użytkowaniu i stwierdzeniu w drodze decyzji, że spełnia on wymagania, przede wszystkim w zakresie błędów granicznych dopuszczalnych, tj. wciąż mierzy z oczekiwaną dokładnością.

Jednakże aby przeprowadzić legalizację obecnie, w podejściu klasycznym, konieczne jest fizyczne dotarcie legalizatora (osoby) do legalizowanego egzemplarza przyrządu pomiarowego, czasowe wyłączenie przyrządu z eksploatacji, niejednokrotnie jego demontaż i uruchomienie na stanowisku testowym oraz ponowna instalacja po legalizacji w miejscu użytkowania. We współczesnych realiach model taki jest niepraktyczny. Wystarczy wziąć pod uwagę rosnącą liczbę przyrządów pomiarowych w użytkowaniu, spadek cen nowych przyrządów pomiarowych ze względu na postęp technologiczny (podobnie jak większości wyrobów przemysłowych), wysokie koszty pracy w krajach wysokorozwiniętych oraz złożoność logistyczną przeprowadzenia legalizacji połączoną z co najmniej jednokrotnym przerwaniem łańcucha dostaw (wyłączenie przyrządu pomiarowego z działania na czas legalizacji i zastąpienie innym przyrządem legalizowanym). W tej sytuacji zrozumiąca wydaje się tendencja spadkowa w liczbie rokrocznie wykonywanych legalizacji przyrządów pomiarowych i trend polegający na wymianie przyrządów pomiarowych z upływem ważności ich legalizacji, na nowe egzemplarze.

Jednocześnie biorąc pod uwagę kierunki zmian, jakie zachodzą we współczesnym świecie, w tym przede wszystkim wysoki poziom łączności i szerokie możliwości transmisji i przetwarzania danych oferowane obecnie przez technologie cyfrowe, należy stwierdzić, że otwierają się bezprecedensowe możliwości oceny wydajności metrologicznej przyrządów pomiarowych w czasie rzeczywistym, w działaniu, bez konieczności fizycznego kontaktu z przyrządem. W opinii autorki wykorzystanie ww. możliwości w nadzorze metrologicznym nad nowoczesnymi, inteligentnymi przyrządami pomiarowymi, dysponującymi możliwością zdalnego odczytu i diagnostyki, wprowadzanymi już obecnie do użytkowania, bezsprzecznie zdaje się być strategicznym kierunkiem rozwoju metrologii prawnej, szczególnie predystynowanym do wykorzystania w obszarze nadzoru nad przyrządami pomiarowymi w użytkowaniu.

Analiza danych pomiarowych z poszczególnych egzemplarzy przyrządów, w tym identyfikowanie pojawiających się anomalii z użyciem algorytmów sztucznej inteligencji, wspierana przez zdalne funkcje diagnostyczne i serwisowe współczesnych przyrządów pomiarowych, pozwoliłaby na obniżenie kosztów, ale przede wszystkim na znaczący wzrost skuteczności nadzoru nad działaniem przyrządów pomiarowych wykonywanego w ramach prawnej kontroli metrologicznej.

Podstawą takiego systemu winien być rejestr przyrządów pomiarowych będących w użytkowaniu. Do prowadzenia takiego rejestru mógłby być wykorzystany oddany w 2022 r. do użytkowania system ŚWITEŻ. Według założeń miałyby być on stopniowo uzupełniany, jednakże do skutecznej realizacji tego zadania niezbędny wydaje się obowiązek prawny zgłaszania rozpoczęcia i zakończenia użytkowania przyrządu pomiarowego.

Pierwszym krokiem w tym kierunku, który wykonało już wiele krajów, w tym także Polska, jest legalizacja przyrządów pomiarowych z wykorzystaniem metody statystycznej. Nie jest to co prawda metoda bazująca na transmisji danych pomiarowych i ich analizie oraz autodiagnostyce przyrządów pomiarowych, lecz jedynie na rejestrze przyrządów pomiarowych, ale może być postrzegana jako pierwszy krok we wskazanym kierunku, ponieważ odstępuje od konieczności fizycznego dotarcia do każdego egzemplarza przyrządu pomiarowego, jego demontażu i sprawdzenia na stanowisku testowym. Dzięki wykorzystaniu baz danych o przyrządach pomiarowych możliwe stało się zastosowanie podejścia statystycznego do partii przyrządów pomiarowych i przeprowadzenie sprawdzeń jedynie próbek z partii, zamiast wszystkich egzemplarzy, zgodnie z zasadami statystyki.

Wskazane rozwiązanie kierunkowe dobrze wpisuje się więc w potrzeby administracji miar i trendy na rynku przyrządów pomiarowych polegające na budowaniu inteligentnych przyrządów pomiarowych wyposażonych w funkcje zdalnego odczytu i komunikacji.

4.3.3. Otwarcie metrologii prawnej na przyrządy rozproszone zawierające bloki wirtualne

W konstrukcji współczesnych przyrządów pomiarowych, oprócz ich gotowości do komunikacji z innymi urządzeniami i systemami, występuje również silny trend do budowy przyrządów pomiarowych o konstrukcji rozproszonej, tj. takiej gdzie poszczególne bloki funkcjonalne przyrządu nie są zamknięte w jednej wspólnej obudowie, lecz są rozproszone w różnych miejscach. Przykładowo przetwornik pomiarowy może występować w miejscu wykonywania pomiaru, a wyświetlacz w miejscu, w którym oczekujemy wyniku pomiaru. Oba moduły mogą komunikować się chociażby bezprzewodowo. Nie można wykluczyć też, że niektóre bloki takiego przyrządu o budowie rozproszonej będą miały implementację wyłącznie programową, np. programowy moduł

obliczeniowy przetwarzania danych w dedykowanym obszarze chmury opartej na infrastrukturze farmy serwerowej. Dodatkowo przyrządy pomiarowe mogą w przyszłości być realizowane w formie zbliżonej bardziej do systemów pomiarowych niż pojedynczych przyrządów. Chodzi tu o konstrukcje typu: wiele czujników pomiarowych, pomiar różnych wielkości fizycznych, natomiast jeden wspólny system prezentacji wyników i wspólny interfejs komunikacyjny. Oczywiście staje się, żeby wskazać w tym miejscu potrzebę możliwości odczytu danych pomiarowych z takiego systemu, z wykorzystaniem smartfonu, tabletu czy innego powszechnie stosowanego urządzenia mogącego pełnić rolę interfejsu użytkownika (klawiatura/ekran) dla przyrządu pomiarowego.

Przyrządy pomiarowe o takiej konstrukcji nie mieszczą się w klasycznym podejściu metrologii prawnej, w którym modelowo całość przyrządu pomiarowego zamknięta jest w jednej obudowie, a integralności i nienaruszalności konstrukcji przyrządu strzeże fizyczna cecha zabezpieczająca naniesiona na obudowie przyrządu w sposób uniemożliwiający jej otwarcie bez naruszenia cechy. Strategicznym kierunkiem rozwoju metrologii prawnej będzie więc odejście od modelu przyrządu pomiarowego o zintegrowanej budowie (całość przyrządu w jednej obudowie) na rzecz przyrządów skonstruowanych w sposób rozproszony (przetwornik pomiarowy usytuowany w miejscu pomiaru, przetwarzanie sygnału pomiarowego w serwerowni, a wynik pomiaru prezentowany wg potrzeb użytkownika, na dowolnych urządzeniach komputerowych, w tym przenośnych). Aby było to możliwe na gruncie metrologii prawnej, konieczne jest wypracowanie rozwiązań zapewniających integralność i niezmienność przyrządów o takiej konstrukcji, na poziomie niezbędnym do realizacji zadań i celów prawnej kontroli metrologicznej. Wiąże się to np. z koniecznością opracowania podejścia do zdalnego odczytu, walidacji, przechowywania i udzielania dostępu do danych, przy zachowaniu fundamentalnych zasad metrologii prawnej, że integralność modułów/elementów przyrządu pomiarowego jest zabezpieczona i zachowana, a prezentowane dane rzeczywiście odpowiadają zmierzonym wartościom.

Przykładem konstruowania przyrządów pomiarowych odnoszących się do opisaney powyżej tendencji jest coraz powszechniej stosowane łączenie się dedykowanych czujników pomiarowych bezpośrednio z chmurą, gdzie funkcje przyrządu, takie jak: obliczanie wyników pomiarów i ich gromadzenie, funkcje dodatkowe, komunikacja, diagnostyka itp. realizowane są w chmurze, z którą z kolei mogą łączyć się dowolne urządzenia

użytkowników, zapewniając im dostęp do danych pomiarowych, oraz urządzenia serwisu, umożliwiając diagnozę stanu systemu i ewentualne naprawy elementów przyrządu pomiarowego.

Z jednej strony istotnym czynnikiem stymulującym ten kierunek jest wprowadzanie do przyrządów pomiarowych coraz bardziej rozbudowanych funkcji taryfowych, uważanych za kluczowe dla zwiększania efektywności energetycznej. Wymusza to wyświetlanie znacznych ilości danych, niejednokrotnie w układzie graficznym oraz zwiększenie mocy obliczeniowych procesorów przetwarzających te dane, co nie jest możliwe na stosunkowo prostych procesorach i niewielkich wyświetlaczach alfanumerycznych, w które klasycznie wyposażane są przyrządy pomiarowe. Z drugiej strony z oczywistych względów niezasadne jest wyposażanie każdego z przyrządów pomiarowych w silny procesor i duży monitor ekranowy wyłącznie do realizacji funkcji przyrządu pomiarowego. Pozostają więc rozwiązania bazujące na współdzieleniu zasobów sprzętowych pomiędzy różnymi systemami i urządzeniami, w tym pomiarowymi, i zapewnienie przy tym odpowiedniego poziomu zaufania do prezentowanego wyniku pomiaru, tak aby cel istnienia metrologii prawnej był właściwie realizowany. Obecnie takich rozwiązań metrologia prawna jeszcze nie wypracowała. W praktyce pojawiają się różnego rodzaju rozwiązania cząstkowe, ale nie można obecnie powiedzieć, że metrologia prawna jest otwarta i gotowa na rozproszone, częściowo wirtualne przyrządy i systemy pomiarowe, a tym samym wskazany strategiczny kierunek rozwoju metrologii prawnej dotyczący takich przyrządów pomiarowych pozostaje aktualnie w sferze potrzeb.

4.3.4. Działanie we wspólnej przestrzeni

Działania w zakresie rozwoju krajowej metrologii prawnej nie mogą być oderwane od działań podejmowanych w pozostałych obszarach krajowej infrastruktury jakości (NQI) oraz działań podejmowanych w innych krajach. Organizacja INetQI [48] zidentyfikowała następujące wyzwania aktualnie stojące przed infrastrukturą jakości: rewolucja przemysłowa 4.0, druk 3D, inteligentne czujniki, drony, cyfrowe bliźniaki, rzeczywistość wirtualna i rozszerzona, sztuczna inteligencja, założenia Agendy 2030 oraz cele zrównoważonego rozwoju. Na bardziej szczegółowym poziomie, w ramach krajowej infrastruktury jakości, metrologii prawnej przede wszystkim dotyczy akredytacja

i normalizacja. Wskazane zatem jest, aby rozwój krajowej metrologii prawnej odbywał się w ścisłej współpracy z podmiotami odpowiedzialnymi za te dziedziny, a kierunki rozwoju metrologii prawnej wpisywały się w kierunki rozwoju tych dziedzin.

Obecnie jesteśmy świadkami coraz większego znaczenia technologii wodorowych, elekromobilności, zagadnień ochrony klimatu oraz szeroko pojętej transformacji cyfrowej. Efektywna i adekwatna metrologia prawna we wszystkich krajach winna rozwijać się równolegle i w powiązaniu z rozwojem wskazanych technologii oraz ochroną dóbr wyższego rzędu w obszarze klimatu, efektywności energetycznej, przy jednoczesnej dbałości o bezpieczeństwo fiskalne kraju.

Podobny obraz wyłania się z prac międzynarodowych organizacji metrologicznych oraz prawodawstwa unijnego. Na forach międzynarodowych zajmujących się metrologią prawną powstają kolejne grupy i projekty zajmujące się zagadnieniami gospodarki wodorowej, transformacji cyfrowej (np. *Working Group 14: Digital Transformation*, WELMEC). Powoływane są również grupy *ad hoc*. Przykładem takiej grupy powstałej w odpowiedzi na rozwój technologiczny i potrzeby rynku w zakresie elektromobilności jest WELMEC Ad Hoc Working Group „Harmonised European Charging Infrastructure”. Grupa ta zajmuje się kwestiami zasadniczymi i szczegółowymi wymaganiami dotyczącymi przyrządów pomiarowych stosowanych w stacjach ładowania pojazdów, mając na uwadze zachowanie neutralności technologicznej oraz bezpieczeństwo i innowacyjność proponowanych rozwiązań. Przyjmowane są również pakiety aktów prawnych, które zobowiązują państwa członkowskie do szeregu działań, chociażby wspomniane już rozporządzenie AFIR, Zielony Ład czy dyrektywa o efektywności energetycznej.

Wyżej wymienione technologie i regulacje są drogowskazami dla podjęcia zmian kierunkowych w krajowej metrologii prawnej i były już omawiane w niniejszym opracowaniu. Elementem nowym, na który kładzie się nacisk, jest konieczność ukierunkowania prac w metrologii prawnej na działania wspólne tak, aby kierunki rozwoju krajowej metrologii prawnej nie pozostały w oderwaniu od prac prowadzonych w tym obszarze na forach międzynarodowych oraz w innych instytucjach krajowych. Poprzez współpracę i podejmowanie działań we wspólnej przestrzeni, polska metrologia prawna winna silniej wpisać się w krajową infrastrukturę jakości i być powszechnie rozumiana jako jej element,

a w dalszej perspektywie winna także stać się znaczącym elementem wspólnej, unijnej i europejskiej infrastruktury jakości.

4.4. Podsumowanie kierunków rozwoju metrologii prawnej

W przedmiotowym opracowaniu zostały wskazane strategiczne kierunki rozwoju metrologii prawnej wraz z kontekstem i niezbędnymi wyjaśnieniami. Starano się zidentyfikować wszystkie potencjalne kierunki rozwoju metrologii prawnej, a także odnieść je do już zachodzących zmian, bądź prac kierunkowych podejmowanych w innych obszarach, o których informacje ma GUM.

Strategicznymi kierunkami rozwoju krajowej metrologii prawnej wskazywanymi w opracowaniu są więc:

- wybór rodzajów przyrządów pomiarowych objętych metrologią prawną według potrzeb zmieniającej się gospodarki i zachodzących zmian społecznych,
- wprowadzenie jednolitego systemu oceny zgodności w miejsce krajowego zatwierdzenia typu i legalizacji pierwotnej,
- rozwój krajowych jednostek notyfikowanych i wzmocnienie ich pozycji, także na arenie międzynarodowej,
- nakierowanie działań prawnej kontroli metrologicznej na jej cel poprzez ograniczenie wymagań do bezpośrednio z nim powiązanych, w połączeniu z uniwersalizacją wymagań dla grup przyrządów i rodzajów ryzyka,
- wykorzystanie w metrologii prawnej możliwości płynących z transformacji cyfrowej, w szczególności do wykonywania zadań w nadzorze metrologicznym,
- odejście od modelu przyrządu pomiarowego o zintegrowanej budowie (całość przyrządu w jednej obudowie) na rzecz przyrządów skonstruowanych w sposób rozproszony (przetwornik pomiarowy usytuowany w miejscu pomiaru, przetwarzanie sygnału pomiarowego w serwerowni, a wynik pomiaru prezentowany według potrzeb użytkownika, na dowolnych urządzeniach komputerowych, w tym przenośnych),
- integracja działań metrologii prawnej we wspólnej przestrzeni krajowej i europejskiej infrastruktury jakości.

W podsumowaniu warto jeszcze raz podkreślić, że rozwój metrologii prawnej powinien uwzględniać konieczność regulacji w zakresie

minimalnym do realizacji zadań, poprzez kształtowanie prawa przyczyniającego się i/lub sprzyjającego całościowo wzmocnieniu krajowej infrastruktury jakości (NQI), tworząc w ten sposób warunki do rozwoju przedsiębiorców krajowych i nowych technologii oraz służąc budowaniu wizerunku Polski jako państwa przyjaznego nowoczesnej gospodarce przy jednoczesnym zapewnieniu bezpieczeństwa technicznego kraju.

Nieodzowne jest przy tym zapewnienie, utrzymanie i stały rozwój odpowiedniego krajowego zaplecza kadrowo-badawczego.

Tak jak zaznaczono we wstępie do niniejszego opracowania zadania, cele i beneficjenci systemu metrologii prawnej nie wymagają obecnie redefinicji. Teza ta pozostaje w mocy także po uwzględnieniu wskazanych strategicznych kierunków rozwoju tej poddziedziny metrologii. W tym kontekście przepisy aktualnie obowiązującej ustawy Prawo o miarach stanowiącej, że prawnej kontroli metrologicznej podlegają w Polsce przyrządy pomiarowe, które są lub mogą być stosowane: w ochronie zdrowia, życia i środowiska, w ochronie bezpieczeństwa i porządku publicznego, w ochronie praw konsumenta, przy pobieraniu opłat, podatków i innych należności budżetowych oraz ustalaniu opustów, kar umownych, wynagrodzeń i odszkodowań, a także przy pobieraniu i ustalaniu podobnych należności i świadczeń, przy dokonywaniu kontroli celnej oraz w obrocie są aktualne i adekwatne do dalszych działań rozwojowych metrologii prawnej we wskazanych kierunkach strategicznych.

Literatura

1. OIML, International Vocabulary of Terms in Legal Metrology, https://www.oiml.org/en/publications/vocabularies/en/files/pdf_v/v001-ef00.pdf (dostęp: 15.09.2023 r.).
2. Główny Urząd Miar, Międzynarodowy Słownik Metrologii Prawnej, https://www.gum.gov.pl/ftp/pdf/Wydawnictwa/Miedzynarodowy_Slownik_Terminow_Metrologii_Prawnej.pdf (dostęp: 15.09.2023 r.).
3. OIML V 1 Edition 2022 (E/F), https://www.oiml.org/en/publications/vocabularies/en/files/pdf_v/v001-ef22.pdf (dostęp: 15.09.2023 r.).
4. Olszewska P., *Metrologia prawna*, [w:] *Vademecum. Polska administracja miar i administracja probiercza*, red. J. Borzymiński, P. Fotowicz, M. Kolczyński, A. Kulesza-Mincer, M. Mikiel, P. Olszewska, Z. Ramotowski et al., GUM, Warszawa 2022.
5. OIML D 1, National metrology systems – Developing the institutional and legislative framework, Edition 2020 (E), https://www.oiml.org/en/publications/documents/en/files/pdf_d/d001-e20.pdf/ (dostęp: 15.09.2023 r.).
6. INetQI, Quality Infrastructure Definition, <https://www.inetqi.net/documentation/quality-infrastructure-definition/> (dostęp: 15.09.2023 r.).
7. Dyrektywa Rady 80/181/EWG z dnia 20 grudnia 1979 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do jednostek miar i uchylająca dyrektywę 71/354/EWG, Dz. Urz. WE L 039 z 15.02.1980 (zmieniona dyrektywami 89/617/EWG, 99/103/EWG, 2009/3/WE i 2019/1258/UE).
8. Borzymiński J., *Jednostki miar*, [w:] *Vademecum. Polska administracja miar i administracja probiercza*, red. J. Borzymiński, P. Fotowicz, M. Kolczyński, A. Kulesza-Mincer, M. Mikiel, P. Olszewska, Z. Ramotowski et al., GUM, Warszawa 2022.

9. Brennejzen J., *Metrologia prawna*, [w:] *Vademecum. Polska administracja miar i administracja probiercza*, red. J. Borzymiński, P. Fotowicz, M. Kolczyński, A. Kulesza-Mincer, M. Mikiel, P. Olszewska, Z. Ramotowski et al., GUM, Warszawa 2022.
10. GUM, Upoważnienia do legalizacji – Rejestr decyzji, <https://www.gum.gov.pl/pl/form/3,Upowaznienia-do-legalizacji-Rejestr-decyzji.html> (dostęp: 15.09.2023 r.).
11. GUM, Punkty legalizacyjne – Rejestr decyzji, <https://www.gum.gov.pl/pl/form/4,Punkty-legalizacyjne-Rejestr-decyzji.html> (dostęp: 15.09.2023 r.).
12. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/34/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie wspólnych przepisów dotyczących przyrządów pomiarowych oraz metod kontroli metrologicznej (przekształcenie), Dz. U. L 106 z 28.4.2009.
13. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/31/UE z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do udostępniania na rynku wag nieautomatycznych (przekształcenie), Dz. U. L 96 z 29.03.2014.
14. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/32/UE z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do udostępniania na rynku przyrządów pomiarowych (wersja przekształcona), Dz. U. L 96 z 29.03.2014.
15. Zawiadomienie Komisji – Niebieski przewodnik – wdrażanie unijnych przepisów dotyczących produktów, Dz. U. C 247 z 29.06.2022.
16. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2011/17/UE z dnia 9 marca 2011 r. w sprawie uchylenia dyrektyw Rady 71/317/EWG, 71/347/EWG, 71/349/EWG, 74/148/EWG, 75/33/EWG, 76/765/EWG, 76/766/EWG i 86/217/EWG w odniesieniu do metrologii, Dz. U. L 71 z 18.03.2011.
17. Sprawozdanie Komisji dla Parlamentu Europejskiego i Rady. Sprawozdanie dotyczące wdrożenia dyrektywy 2004/22/WE w sprawie przyrządów pomiarowych na podstawie jej art. 25, COM/2011/0357, s. 9.
18. Olszewska (Kamińska) P., *Zmiany w podejściu do prawnej kontroli metrologicznej*, „Metrologia i Probiernictwo”, Biuletyn Głównego Urzędu Miar 2013, nr 2, s. 36–38.
19. Rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 2 czerwca 2016 r. w sprawie wymagań dla przyrządów pomiarowych (Dz. U. poz. 815) oraz

- rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 2 czerwca 2016 r. w sprawie wymagań dla wag nieautomatycznych, Dz. U. poz. 802.
20. Plackowski K., *Metrologia prawna*, [w:] *Vademecum. Polska administracja miar i administracja probiercza*, red. J. Borzymiński, P. Fotowicz, M. Kolczyński, A. Kulesza-Mincer, M. Mikiel, P. Olszewska, Z. Ramotowski et al., GUM, Warszawa 2022.
 21. Notified bodies NANDO, *New Approach Notified and Designated Organisations*, <https://webgate.ec.europa.eu/single-market-compliance-space/#/notified-bodies> (dostęp: 15.09.2023 r.).
 22. The OIML Certification System (OIML-CS), <https://www.oiml.org/en/oiml-cs/oiml-cs-homepage> (dostęp: 15.09.2023 r.).
 23. OIML B 18, Framework for the OIML Certification System (OIML-CS), Edition 2022 (E), https://www.oiml.org/en/files/pdf_b/b018-e22.pdf (dostęp: 15.09.2023 r.).
 24. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1020 z dnia 20 czerwca 2019 r. w sprawie nadzoru rynku i zgodności produktów oraz zmieniające dyrektywę 2004/42/WE oraz rozporządzenia (WE) nr 765/2008 i (UE) nr 305/2011, Dz. Urz. L 169 z 25.06.2019.
 25. Kolczyński M., Czechowski A., *Zadania nadzorcze organów administracji miar*, [w:] *Vademecum. Polska administracja miar i administracja probiercza*, red. J. Borzymiński, P. Fotowicz, M. Kolczyński, A. Kulesza-Mincer, M. Mikiel, P. Olszewska, Z. Ramotowski et al., GUM, Warszawa 2022.
 26. GUM, Działalność Głównego Urzędu Miar i Jednostek Terenowych, raport roczny 2021, https://www.gum.gov.pl/ftp/pdf/Publikacje/Raport_calos_2021_popr.pdf (dostęp: 15.09.2023 r.).
 27. OIML D 14, Training and qualification of legal metrology personnel, Edition 2004 (E), https://www.oiml.org/en/publications/documents/en/files/pdf_d/d014-e04.pdf (dostęp: 15.09.2023 r.).
 28. PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 – Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących.
 29. OIML, International Organization of Legal Metrology, https://www.oiml.org/en/tc-sc-pg/projectedit_view?idproject=449 (dostęp: 15.09.2023 r.).
 30. Müller A., *OIML D 14 What does it take to start a career in legal metrology?*, „OIML Bulletin” 2022, vol. LXIII, no. 4, s. 10.

31. Popiołek W., *Strategia instytucjonalnego rozwoju metrologii w Polsce*, [w:] *Informator o działalności Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej w kadencji 2010–2014*, red. W. Miczulski, 2014.
32. Konwencja ustanawiająca Międzynarodową Organizację Metrologii Prawnej, podpisana w Paryżu dnia 12 października 1955 r., Dz. U. z 1959 r. nr 4, poz. 24.
33. Birch J., *Report – Benefit of legal metrology for the economy and society*, 2003, s.12, https://www.oiml.org/en/publications/expert/en/files/pdf_e/e002-e03.pdf (dostęp: 15.09.2023 r.).
34. OIML Members, <https://www.oiml.org/en/structure/members> (dostęp: 15.09.2023 r.).
35. Michniewicz E., Mikiel M., *Międzynarodowe organizacje metrologiczne*, [w:] *Vademecum. Polska administracja miar i administracja probiercza*, red. J. Borzymiński, P. Fotowicz, M. Kolczyński, A. Kulesza-Mincer, M. Mikiel, P. Olszewska, Z. Ramotowski et al., GUM, Warszawa 2022.
36. WELMEC, European Cooperation in Legal Metrology, <https://www.welmec.org/> (dostęp: 15.09.2023 r.).
37. NoBoMet - European Coordination Group for Notified Bodies in Legal Metrology, <https://www.nobomet.org/> (dostęp: 15.09.2023 r.).
38. Sanetra C., Marban R.M., *The answer to the global quality challenge. A national quality infrastructure*, Braunschweig, Berlin 2007.
39. Rauszer Z., *Mierzenie pod względem prawnym*, Zakłady Graficzne „Biblioteka Polska”, Warszawa 1939.
40. Komisja Europejska, Europejski Zielony Ład. Aspirowanie do miana pierwszego kontynentu neutralnego dla klimatu, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pl (dostęp: 15.09.2023 r.).
41. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/944 z dnia 5 czerwca 2019 r. w sprawie wspólnych zasad rynku wewnętrznego energii elektrycznej oraz zmieniająca dyrektywę 2012/27/UE (przekształcenie), Dz. U. L 158 z 14.06.2019.
42. Zalecenie Komisji z dnia 9 marca 2012 r. w sprawie przygotowań do rozpowszechnienia inteligentnych systemów pomiarowych, Dz. U. L 73 z 13.03.2012.
43. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych i uchylające dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/94/UE, COM/2021/559.

44. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/27/UE z dnia 25 października 2012 r. w sprawie efektywności energetycznej, zmiany dyrektyw 2009/125/WE i 2010/30/UE oraz uchylenia dyrektyw 2004/8/WE i 2006/32/WE, Dz. U. L 315 z 14.11.2012.
45. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/1791 z dnia 13 września 2023 r. w sprawie efektywności energetycznej oraz zmieniająca rozporządzenie (UE) 2023/955 (wersja przekształcona), Dz. U. L 231 z 20.09.2023 r.
46. OIML E 7, Modelling the economic impact of legal metrology, expert report 2015, s. 19, https://www.oiml.org/en/publications/expert/en/files/pdf_e/e007-e15.pdf (dostęp: 15.09.2023 r.).
47. Guidance UKCA marking: roles and responsibilities, <https://www.gov.uk/guidance/ukca-marking-roles-and-responsibilities> (dostęp: 15.09.2023 r.).
48. INetQI International Network on Quality Infrastructure, <https://www.inetqi.net/> (dostęp: 15.09.2023 r.).

W rozdziale przedstawiono diagnozę stanu metrologii prawnej w Polsce oraz opisano strategiczne kierunki jej dalszego rozwoju. W pierwszej części określono obszar merytoryczny, będący przedmiotem opracowania, a w kolejnej omówiono infrastrukturę jakości w aspekcie metrologii prawnej. Kompleksowo zaprezentowano elementy metrologii prawnej, w tym legalne jednostki miar, prawną kontrolę metrologiczną, system prawnej kontroli metrologicznej oraz nadzór. Dodatkowo scharakteryzowano zasoby kadrowe oraz odniesiono się do kontekstu międzynarodowego. Zidentyfikowano również problemy i potrzeby. Następnie skoncentrowano się na przyszłości metrologii prawnej, przedstawiając strategiczne kierunki jej rozwoju. Stwierdzono, że rozwój metrologii prawnej powinien uwzględniać konieczność regulacji w zakresie minimalnym do realizacji zadań, poprzez kształtowanie prawa przyczyniającego się i/lub sprzyjającego całościowo wzmocnieniu krajowej infrastruktury jakości, tworząc w ten sposób warunki do rozwoju przedsiębiorców krajowych i nowych technologii oraz służąc budowaniu wizerunku Polski jako państwa przyjaznego nowoczesnej gospodarce przy jednoczesnym zapewnieniu bezpieczeństwa technicznego kraju. Nieodzowne jest przy tym zapewnienie, utrzymanie i stały rozwój odpowiedniego krajowego zaplecza kadrowo-badawczego. Podkreślono, że rozwój metrologii prawnej w Polsce przyczyni się do zwiększenia zaufania do pomiarów stosowanych w kluczowych obszarach życia społeczno-gospodarczego, poprawy jakości nadzoru oraz harmonizacji polskich regulacji z normami międzynarodowymi.

Słowa kluczowe: metrologia prawna, „Polska Metrologia”, diagnoza stanu metrologii, strategiczne kierunki rozwoju metrologii

Podsumowanie

W ostatnich kilku latach zaobserwowano zintensyfikowane aktywności mające na celu rozwój metrologii w Polsce. Mimo osiągniętych sukcesów, stoi ona w obliczu różnorodnych wyzwań, które wymagają skoncentrowanych i ukierunkowanych działań. Jednym z kluczowych aspektów jest zagwarantowanie stabilnego finansowania pozwalającego na ciągłe doskonalenie i rozwijanie infrastruktury metrologicznej. Wspieranie badań nad nowoczesnymi technikami pomiarowymi i inwestycje w rozwój zaawansowanych narzędzi metrologicznych są niezbędne, aby sprostać rosnącym oczekiwaniom w dziedzinie pomiarów. Należy więc podkreślić, jak ważna jest kontynuacja programu „Polska Metrologia” Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, wpisującego się w politykę stymulowania rozwoju gospodarczego, naukowego i społecznego Polski. Inwestycje w metrologię przyczyniają się do wzrostu innowacyjności, zapewnienia jakości i bezpieczeństwa, a także integracji z procedurami i normami międzynarodowymi. Ponadto istnieje konieczność zapewniania dostępu do wykwalifikowanej kadry, będącej w stanie skutecznie odpowiadać na pojawiające się wyzwania. Jest ona kluczowym elementem budowania silnego fundamentu dla postępu naukowego, technologicznego i gospodarczego, a wspieranie jej rozwoju to proces kompleksowy wymagający zaangażowania ze strony instytucji naukowych, rządu, a także przedsiębiorców. W przypadku pracowników nauki, istotny jest ich aktywny udział w konferencjach naukowych i branżowych, w tym oczywiście międzynarodowych, będących miejscem spotkań i wymiany wiedzy oraz doświadczeń. Ważna jest także dbałość o młodych naukowców i umożliwienie im uzyskiwania szybkiej samodzielności naukowej (m.in. dzięki specjalnym grantom projektowym). Kontynuacja wysiłków mających na celu rozwijanie metrologii w kraju poprzez rozszerzanie dostępnej

infrastruktury metrologicznej, wspieranie pracowników oraz promowanie innowacyjnych rozwiązań jest więc konieczna.

W opinii Ekspertów, przyszłość metrologii to bardzo dynamiczny rozwój. Obserwowane dzisiaj trendy i innowacje wyznaczają nowe wymagania odnośnie do precyzji oraz efektywności pomiarów. Wraz z ciągłym rozwojem metrologii, istotne jest, aby przedsiębiorstwa dostosowywały się i wykorzystywały pojawiające się rozwiązania metrologiczne. Kluczowe znaczenie mają więc inwestycje w nowatorskie technologie, szkolenia personelu w zakresie obsługi zaawansowanych systemów oraz wspieranie samej kultury innowacji. Metrologia jako sposób identyfikacji ilościowej i jakościowej wielu zagrożeń, w tym także środowiskowych, to także świetne narzędzie służące rozwojowi i promocji zrównoważonego rozwoju. W tym aspekcie konieczna jest spójność trzech ważnych elementów, takich jak: wzrost gospodarczy, inkluzja społeczna i ochrona środowiska. Są one wzajemnie połączone i wszystkie są niezwykle istotne dla osiągnięcia dobrobytu poszczególnych osób i całych społeczeństw. Cele i zadania z nimi związane będą stymulować działania na przestrzeni następnych 15 lat w dziedzinach o najważniejszym znaczeniu, tj.: ludzie, planeta, dobrobyt, pokój na świecie i partnerstwo. W tym miejscu należy podkreślić więc ważność rzetelnych i porównywalnych wyników pomiarów wykonywanych w trakcie badań naukowych, ujednoliconych standardów oceny i norm, innowacji oraz nowych metod badawczych i pomiarowych, które będą dostosowane do rozwoju przemysłu i współczesnej gospodarki czy też ochrony środowiska naturalnego.

Biorąc pod uwagę powyższe aspekty, metrologia powinna być traktowana jako strategiczny element polityki rozwojowej, wspierający dobrobyt kraju. Opracowanie ogólnopolskiej strategii jej rozwoju jest więc niezbędne, aby zapewnić skuteczność i konkurencyjność państwa na arenie międzynarodowej oraz wspierać innowacje w kluczowych sektorach gospodarki. Należy jednak podkreślić, że ze względu na złożoność i szeroki zakres zastosowań metrologii, niemożliwe jest opracowanie strategii obejmującej wszystkie obszary w pełnym zakresie. W związku z tym, monografia przedstawia pierwszą, pionierską próbę przeprowadzania takiej analizy w temacie identyfikacji długofalowych potrzeb i kierunków dalszych działań w polskiej metrologii. Mimo że nie wszystkie obszary zostały uwzględnione w monografii (wymienić tutaj można wspomnianą w opracowaniu metrologię kwantową,

której obecna rola i rozwój zasługują na szczegółową diagnozę), to przedstawione wnioski i rekomendacje stanowią solidny fundament dla przyszłych prac nad rozwojem tej kluczowej dziedziny. Może zatem ona służyć jako punkt wyjścia do dalszych analiz i działań, które w przyszłości doprowadzą do pełnego opracowania i wdrożenia kompleksowej strategii rozwoju metrologii.

Podsumowując, można śmiało stwierdzić, że metrologia stanowi fundament nauki, a jej rozwój nie tylko wspiera innowacje, ale także ma bezpośredni wpływ na konkurencyjność krajowej gospodarki oraz bezpieczeństwo całego społeczeństwa. Wymienić należy również jej aspekt aplikacyjny. Precyzyjne i wiarygodne pomiary są istotne we wszystkich gałęziach przemysłu. Zapewniają wysoką jakość wytwarzanych produktów, a w konsekwencji wzmacniają pozycję przedsiębiorstw na rynku. Należy pamiętać, że w dłuższej perspektywie, kraje, które inwestują w rozwój metrologii, mogą liczyć na przyspieszony postęp technologiczny, większe zaufanie konsumentów i partnerów handlowych oraz stabilniejszy wzrost gospodarczy.

Wyrazy podziękowania należą się Ekspertom, którzy wnieśli nieoceniony wkład w powstanie niniejszej monografii. To Ich wiedza i doświadczenie w poszczególnych obszarach metrologii umożliwiły przeprowadzenie diagnozy jej stanu i sformułowanie kierunków dalszego rozwoju.

*dr inż. Magdalena Zawada-Michałowska
dr hab. inż. Jerzy Józwik, prof. uczelni*

The paper presents a comprehensive analysis of the state of metrology in Poland and the prospects for its further development. It focuses on nine key areas, such as: industrial metrology, chemical metrology, electrical metrology, physical metrology, medical metrology, optical metrology, geometric quantities metrology, coordinate metrology and legal metrology. The first chapter concerns industrial metrology and discusses, among others, a classic industrial plant, the role of metrological services, measurement laboratories and research and development departments. The main problems are identified and development directions in this area are presented. The second chapter focuses on chemical metrology and measurements of chemical quantities. A diagnosis of this area is presented in the aspect of entities, resources and methodology, as well as development directions in key areas (including health, environment, safety and energy) are identified. The third chapter is devoted to electrical metrology, taking into account both academic and industrial centers conducting research and development work. The scientific potential, human resources and equipment are analyzed. Development prospects of electrical metrology are discussed. The fourth chapter is related to physical metrology and covers issues related to energy, health, environmental protection and digital transformation. Particular attention is paid to the observation of climate change, monitoring of pollution and the use of artificial intelligence in data analysis. The fifth chapter focuses on medical metrology. Its application in diagnostics and therapy is described, taking into account ionizing radiation and non-radiological methods. Technical problems and needs in terms of equipment infrastructure are identified. The sixth chapter is devoted to optical metrology. Academic centers dealing with this area and their equipment resources are characterized. Global trends, e.g.: optics in materials engineering and experimental mechanics are presented, and the directions of development of national metrology are referred to them. The seventh chapter shows metrology of geometric quantities and describes national standards and presents the characteristics of measurements of such quantities. The integration of measurements with manufacturing processes and their role in energy as well as environmental protection is highlighted. The eighth chapter concerns coordinate metrology. The focus is on the precision of measurements in coordinate systems. National and international research projects, laboratory equipment and ISO standards are discussed, emphasizing scientific integration and infrastructure needs. The ninth chapter is related to legal metrology. It describes the legal framework and metrological control systems in Poland. Challenges related to digitalization and modern tools in legal metrology are presented.

In conclusion, the paper is a detailed study of the state of metrology in Poland, indicating directions of development in line with global trends, including automation, digitalization and sustainable development. It is an important source of knowledge for scientists, industry and institutions responsible for the development of measurement systems.

Keywords: metrology, measurements, „Polish Metrology” program, diagnosis of the state of metrology, strategic directions of metrology development