

# Spis treści

|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Wprowadzenie</b>                                                 | 11  |
| <b>Część pierwsza: Metrologia przemysłowa</b>                       |     |
| <b>1. Określenie obszaru merytorycznego metrologii przemysłowej</b> | 23  |
| <b>2. Diagnoza stanu metrologii przemysłowej w Polsce</b>           | 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  |
| <b>3. Kierunki rozwoju metrologii przemysłowej</b>                  | 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  |
| <b>4. Literatura</b>                                                | 99  |
| <b>Część druga: Metrologia chemiczna</b>                            |     |
| <b>1. Określenie obszaru merytorycznego metrologii chemicznej</b>   | 107 |
| 1.1. Różnorodność w metrologii chemicznej                           | 109 |
| 1.2. Definicja matrycy próbki                                       | 110 |
| 1.3. Charakterystyka pomiarów chemicznych                           | 112 |
| <b>2. Diagnoza stanu metrologii chemicznej w Polsce</b>             | 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 |
| <b>3. Kierunki rozwoju metrologii chemicznej</b>                    | 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        |
| <b>4. Literatura</b>                                      | <b>137</b> |

### Część trzecia: Metrologia elektryczna

|                                                                                                                                                                                                          |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1. Określenie obszaru merytorycznego metrologii elektrycznej</b>                                                                                                                                      | <b>141</b> |
| <b>2. Diagnoza stanu metrologii elektrycznej w Polsce</b>                                                                                                                                                | <b>143</b> |
| 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        |
| <b>3. Kierunki rozwoju metrologii elektrycznej</b>                                                                                                                                                       | <b>187</b> |
| 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        |
| <b>4. Literatura</b>                                                                                                                                                                                     | <b>231</b> |

### Część czwarta: Metrologia fizyczna

|                                                                  |            |
|------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1. Określenie obszaru merytorycznego metrologii fizycznej</b> | <b>237</b> |
| <b>2. Diagnoza stanu metrologii fizycznej w Polsce</b>           | <b>241</b> |
| 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        |
| <b>3. Kierunki rozwoju metrologii fizycznej</b>                                                              | <b>255</b> |
| 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        |
| <b>4. Literatura</b>                                                                                         | <b>277</b> |

#### Część piąta: Metrologia medyczna

|                                                                                                                                 |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1. Określenie obszaru merytorycznego metrologii medycznej</b>                                                                | <b>283</b> |
| <b>2. Diagnoza stanu metrologii medycznej w Polsce</b>                                                                          | <b>287</b> |
| 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        |
| <b>3. Kierunki rozwoju metrologii medycznej</b>                                                                                 | <b>301</b> |
| <b>4. Literatura</b>                                                                                                            | <b>307</b> |

#### Część szósta: Metrologia optyczna

|                                                                                                        |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1. Określenie obszaru merytorycznego metrologii optycznej</b>                                       | <b>313</b> |
| <b>2. Diagnoza stanu metrologii optycznej w Polsce</b>                                                 | <b>321</b> |
| 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 |
| <b>3. Kierunki rozwoju metrologii optycznej</b>                                                                                                 | 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 |
| <b>4. Literatura</b>                                                                                                                            | 371 |

### Część siódma: Metrologia wielkości geometrycznych

|                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>1. Określenie obszaru merytorycznego metrologii wielkości geometrycznych</b>                                    | 381 |
| <b>2. Diagnoza stanu metrologii wielkości geometrycznych w Polsce</b>                                              | 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        |
| <b>3. Kierunki rozwoju metrologii wielkości geometrycznych</b>                                                                                                             | <b>403</b> |
| 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 wyrobów i czynności                                                                                     | 419        |
| 3.6. Podsumowanie kierunków rozwoju metrologii wielkości geometrycznych                                                                                                    | 420        |
| <b>4. Literatura</b>                                                                                                                                                       | <b>423</b> |
| <b>Część ósma: Metrologia współrzędnościowa</b>                                                                                                                            |            |
| <b>1. Określenie obszaru merytorycznego metrologii współrzędnościowej</b>                                                                                                  | <b>427</b> |
| 1.1. Obszar naukowy, badawczy oraz techniczny metrologii współrzędnościowej                                                                                                | 429        |
| 1.2. Dokładność systemów i pomiarów współrzędnościowych                                                                                                                    | 430        |
| <b>2. Diagnoza stanu metrologii współrzędnościowej w Polsce</b>                                                                                                            | <b>437</b> |
| 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 wzorujące                                                                                                                                      | 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        |
| <b>3. Kierunki rozwoju metrologii współrzędnościowej</b>                                          | <b>465</b> |
| 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        |
| <b>4. Literatura</b>                                                                              | <b>475</b> |
| <b>Część dziewiąta: Metrologia prawna</b>                                                         |            |
| <b>1. Określenie obszaru merytorycznego metrologii prawnej</b>                                    | <b>481</b> |
| <b>2. Infrastruktura jakości a metrologia prawna</b>                                              | <b>483</b> |
| <b>3. Diagnoza stanu metrologii prawnej w Polsce</b>                                              | <b>485</b> |
| 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        |
| <b>4. Kierunki rozwoju metrologii prawnej</b>                                                     | <b>537</b> |
| 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        |
| <b>5. Literatura</b>                                                                              | <b>553</b> |
| <b>Podsumowanie</b>                                                                               | <b>559</b> |