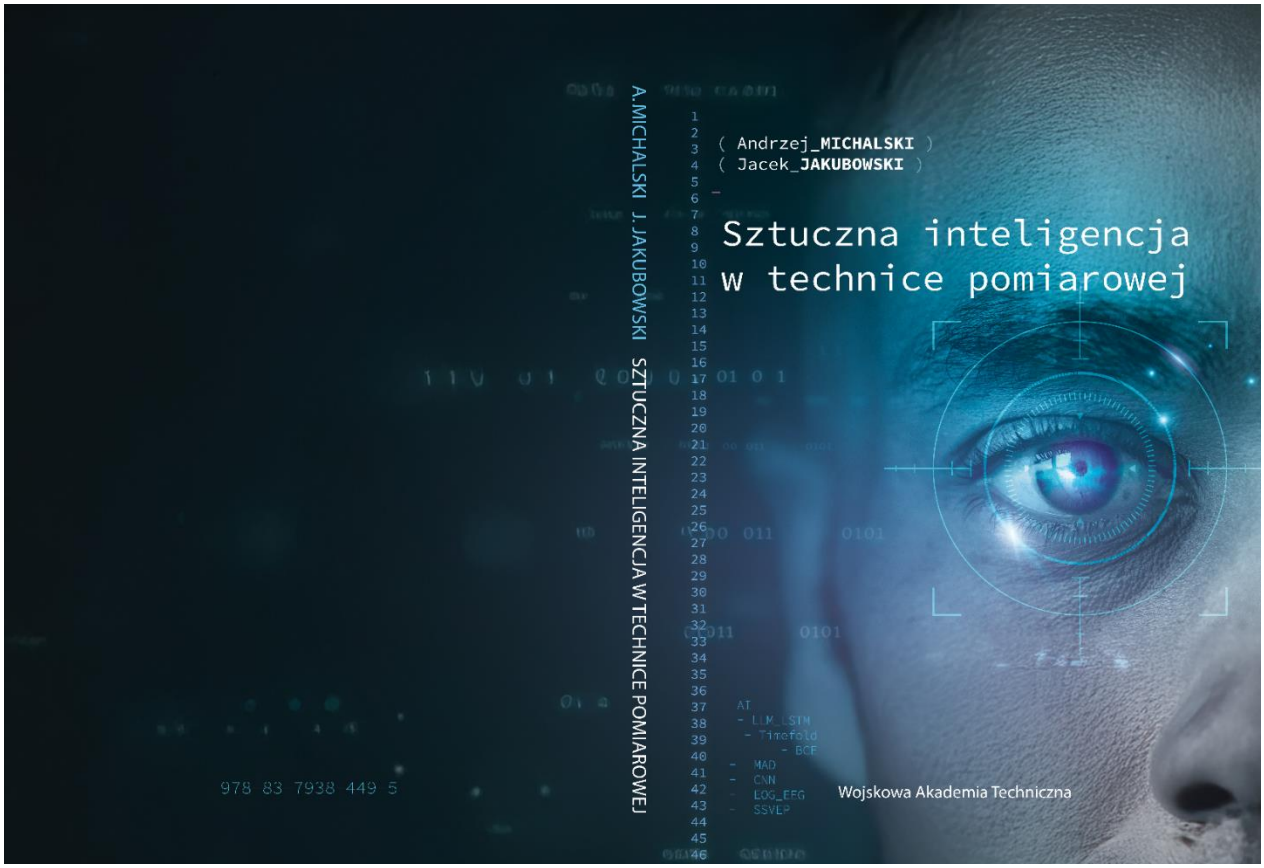
II KRAJOWA KONFERENCJA METROLOGII
KKM 2025
Warszawa, 26 - 29 maja 2025 r.

MONOGRAFIA
II KRAJOWEJ KONFERENCJI METROLOGII



SZTUCZNA INTELIGENCJA

W TECHNICE POMIAROWEJ

pod redakcją
Andrzeja Michalskiego
Jacka Jakubowskiego

Warszawa 2025

Opiniodawca:

prof. dr hab. inż. Sławomir Tumański

© Copyright by Wojskowa Akademia Techniczna
Warszawa 2025

ISBN 978-83-7938-449-5

Opracowanie redakcyjne i korekta: *Małgorzata Wiśniewska*
DTP: *Sławomir Dębski*
Projekt okładki: *Diana Matyjaszkiewicz*

Wydawca: Wojskowa Akademia Techniczna

Druk: PPH Remigraf Sp. z o.o., ul. Fortuny 5, 01-339 Warszawa

Warszawa 2025

Spis treści

WSTĘP 9

ROZDZIAŁ 1

Wprowadzenie w problematykę wykorzystania sztucznej inteligencji w technice pomiarowej 13

1.1. Sztuczna inteligencja 13

1.2. Wybrane przykłady stosowania sztucznej inteligencji 18

ROZDZIAŁ 2

LAPIDARNE ABECADŁO SZTUCZNEJ INTELIGENCJI 33

2.1. Wprowadzenie 33

2.1.1. Pojęcie modelu i warunków jego poprawności 33

2.1.2. Pojęcie sztucznej inteligencji i kierunki jej rozwoju 34

2.2. Podstawy konstrukcji „inteligentnych" maszyn 35

2.3. Od rozpoznania przez kompresję do generowania obiektów 37

2.3.1. Rozpoznanie obiektów przez algorytmy sztucznej inteligencji 37

2.3.2. Kompresja opisu obiektów przez algorytmy sztucznej inteligencji 40

2.3.3. Generowanie obiektów przez algorytmy sztucznej inteligencji 42

2.4. Spektakularne zastosowania „inteligentnych" maszyn 46

2.5. Sztuczna inteligencja w operacjach CyberOps i InfoOps 49

2.6. Podatności „inteligentnych" maszyn 51

2.7. Modele językowe – nowy początek sztucznej inteligencji 53

2.8. Podsumowanie 54

ROZDZIAŁ 3

MODELE JĘZYKOWE W PRZETWARZANIU DANYCH POMIAROWYCH 57

3.1. Wielkie modele językowe – przegląd technologii 57

3.1.1. Czym są wielkie modele językowe (LLM) 57

3.1.2. Słowa i tokeny 58

3.1.3. Historia rozwoju LLM 58

3.1.4. Zasada działania transformerów 59

3.1.5. Przetwarzanie języka naturalnego 62

3.2. Zdolność rozumowania LLM 65

3.2.1. Rozumowanie logiczne 66

3.2.2. Rozumowanie matematyczne 66

3.2.3. Rozumowanie przyczynowe 67

3.3. Zdolność do generowania tekstu 68

3.3.1. Automatyczne tworzenie treści 68

3.3.2. Podsumowywanie i streszczanie 68

3.3.3. Tworzenie dialogów i treści interaktywnych 69

3.3.4. Tworzenie treści wielojęzycznych 69

3.4. Zdolność adaptacyjna ... 70
3.4.1. Dostosowanie do specyficznych zadań ... 70
3.4.2. Integracja z systemami zewnętrznymi ... 70
3.4.3. Uczenie w różnych domenach ... 70
3.4.4. Automatyzacja procesów decyzyjnych ... 71
3.5. Edukacja i szkolnictwo wyższe ... 72
3.5.1. Automatyzacja tworzenia materiałów dydaktycznych i wspomaganie edukacji ... 72
3.5.2. Perspektywy rozwoju ... 72
3.6. Zarządzanie wiedzą ... 73
3.6.1. Organizacja i strukturyzacja informacji ... 73
3.6.2. Wyszukiwanie informacji ... 73
3.6.3. Tworzenie i zarządzanie bazami wiedzy ... 74
3.6.4. Wspieranie procesów decyzyjnych ... 74
3.7. Problemy etyczne i odpowiedzialność ... 75
3.7.1. Brak wyjaśnialności i interpretowalności ... 75
3.7.2. Wymagania obliczeniowe i energetyczne ... 75
3.7.3. Zależność od jakości danych ... 76
3.7.4. Halucynacje w LLM ... 76
3.7.5. Bezpieczeństwo danych ... 78
3.7.6. Zastosowanie w niszowych dziedzinach ... 79
3.8. Dalszy rozwój LLM ... 79
3.8.1. Kierunki rozwoju LLM ... 79
3.8.2. Ulepszanie interpretowalności i wyjaśnialności ... 79
3.8.3. Redukcja zapotrzebowania na zasoby obliczeniowe ... 80
3.8.4. Rozwój umiejętności wielomodalnych ... 80
3.8.5. Zwiększanie zdolności rozumienia kontekstu ... 80
3.8.6. Rozwój zdolności w językach niskozasobowych ... 81
3.8.7. Rozwój zdolności adaptacyjnych ... 81
3.8.8. Bezpieczeństwo i prywatność ... 81
3.8.9. Opracowanie bardziej etycznych modeli ... 82
3.9. Zastosowanie wielkich modeli językowych w metrologii elektrycznej ... 82
3.9.1. Wsparcie w projektowaniu systemów pomiarowych ... 82
3.9.2. Kalibracja i standaryzacja ... 82
3.9.3. Analiza danych pomiarowych ... 83
3.9.4. Pomiary elektryczne ... 83
3.9.5. Pomiary nieelektryczne ... 84
3.9.6. Automatyzacja procesów pomiarowych ... 84
3.9.7. Automatyzacja analizy danych pomiarowych ... 84
3.10. Zrozumienie danych tabelarycznych i ich znaczenia ... 85
3.10.1. Wybór cech opisujących badany proces ... 87
3.10.2. Szkolenie modeli ... 88
3.11. Podsumowanie – przyszłe kierunki rozwoju ... 88
3.11.1. Problemy związane z uczeniem oraz problemy etyczne ... 88

ROZDZIAŁ 4
SZTUCZNA INTELIGENCJA W OPTYMALIZACJI PROCESU ZABEZPIECZENIA METROLOGICZNEGO SIŁ ZBROJNYCH RP 95

4.1. Wprowadzenie 95

4.2. Zabezpieczenie metrologiczne Sił Zbrojnych RP – proces i jego złożoność 96

4.2.1. Praktyczne aspekty zabezpieczenia metrologicznego 96

4.3. Planowanie zabezpieczenia metrologicznego jako problem optymalizacji kombinatorycznej 98

4.4. Ograniczenia optymalizacji gradientowej w przestrzeniach o dużej liczbie wymiarów 101

4.4.1. Brak ciągłości i pochodnych w przestrzeniach dyskretnych 103

4.4.2. Istnienie ograniczeń twardych i miękkich 104

4.4.3. Klątwa wymiarowości w problemach kombinatorycznych 105

4.4.4. Eksploracja a eksploatacja – unikanie ekstremów lokalnych 106

4.5. Algorytmy optymalizacji kombinatorycznej 107

4.6. Frameworki do optymalizacji kombinatorycznej (OR-Tools, Timefold) 112

4.6.1. Wprowadzenie do Timefoldu 116

4.6.2. Modelowanie i rozwiązywanie problemów optymalizacyjnych za pomocą Timefold 119

4.6.3. Przykład użycia Timefold do harmonogramowania kontroli metrologicznej 124

4.7. Kierunki przyszłego rozwoju i zastosowania 125

4.8. Podsumowanie 126

ROZDZIAŁ 5
ANALIZA NEURONOWA PARAMETRÓW POMIAROWYCH INTELIGENTNEGO BUDYNKU 129

5.1. Wprowadzenie – pomiary w zautomatyzowanym budynku 129

5.2. Czujniki pomiarowe 130

5.3. System KNX – zalety w kontekście automatyzacji domowej 131

5.3.1. System magistralny KNX – infrastruktura 132

5.3.2. Media transmisji sygnałów w systemie KNX 133

5.3.3. Topologia systemu KNX 134

5.3.4. Adresowanie urządzeń w systemie KNX 135

5.4. Charakterystyka układu pomiarowego 137

5.5. Środowisko pomiarowe i przebieg eksperymentu 137

5.6. Analiza neuronowa profilu osobowego 141

5.7. Omówienie aspektów analizy neuronowej profilu osobowego 141

5.8. Analiza neuronowa pomiarów zasilania odbiorników elektrycznych 143

5.9. Profilowanie urządzeń na podstawie harmonicznych szeregów czasowych 144

5.10. Badanie identyfikacji urządzeń elektrycznych na podstawie ich profili harmonicznych 145

5.11. Omówienie aspektów analizy neuronowej harmonicznych szeregów czasowych 149
5.12. Wnioski 149

ROZDZIAŁ 6

SZTUCZNA INTELIGENCJA W POMIARACH INTERFEROMETRYCZNYCH 153

6.1. Wprowadzenie 153

6.1.1. Cel i zakres treści rozdziału 154

6.1.2. Stosowane metody pomiaru płaskości 154

6.2. Teoria pomiaru płaskości 156

6.2.1. Definicja i znaczenie płaskości 156

6.2.2. Interferometria stykowa jako metoda pomiaru 157

6.2.3. Charakterystyka płytek interferometrycznych 159

6.3. Klasyczne metody przetwarzania obrazu 160

6.3.1. Filtracja wstępna 161

6.3.2. Binaryzacja 163

6.3.3. Analiza morfologiczna 165

6.3.4. Wyniki 166

6.4. Sztuczna inteligencja w przetwarzaniu obrazu 167

6.4.1. Wybór sieci U-Net i jej charakterystyka 169

6.4.2. Architektura zastosowanej sieci 171

6.4.3. Przygotowanie danych do treningu sieci 172

6.4.4. Metryki oceny i funkcja celu 174

6.4.5. Wyniki i wizualizacja segmentacji 176

6.5. Porównanie metody klasycznej i metody opartej na AI 179

ROZDZIAŁ 7

GŁĘBOKIE SIECI CNN JAKO GŁÓWNE NARZĘDZIE AI W ROZPOZNAWANIU OBRAZÓW MEDYCZNYCH 183

7.1. Wprowadzenie 183

7.2. Sieci CNN 185

7.2.1. Struktury sieciowe CNN 186

7.2.2. Algorytmy uczące sieci 188

7.2.3. Zespoły sieciowe 191

7.3. Przykłady zastosowania sieci CNN w rozpoznawaniu obrazów medycznych . 197

7.3.1. Przykład zastosowania sieci CNN w rozpoznawaniu czerniaka 197

7.3.2. Przykład zastosowania sieci CNN w rozpoznaniu raka piersi 200

7.3.3. Rozpoznanie zmian patologicznych nerek 203

7.4. Podsumowanie 207

ROZDZIAŁ 8

WYKORZYSTANIE KONWOLUCYJNYCH SIECI NEURONOWYCH W WYBRANYCH ZAGADNIENIACH PRZETWARZANIA I ANALIZY SYGNAŁÓW EEG 211

8.1. Wprowadzenie 211

8.1.1. Znaczenie uczenia głębokiego w analizie sygnałów EEG 211

8.1.3. Główne wyzwania w przetwarzaniu sygnałów EEG 212
8.2. Mechanizmy działania CNN w kontekście przetwarzania sygnałów EEG 213
8.3. Zastosowanie CNN w usuwaniu artefaktów z sygnałów EEG 213
8.3.1. Charakterystyka artefaktów w sygnałach EEG 215
8.3.2. Przegląd tradycyjnych metod usuwania artefaktów 216
8.3.4. Usuwanie artefaktów okulograficznych z sygnałów EEG ..... za pomocą CNN 218
8.3.5. Porównanie skuteczności usuwania artefaktów metodą CNN z tradycyjnymi metodami 221
8.4. Klasyfikacja SSVEP z zastosowaniem CNN i augmentacji danych 223
8.4.1. Wprowadzenie do SSVEP i jego znaczenie w interfejsach mózg–komputer 223
8.4.2. Augmentacja danych jako narzędzie zwiększania ..... efektywności modeli 224
8.4.3. Klasyfikacja SSVEP z wykorzystaniem CNN ..... i augmentacji danych 225
8.5. Detekcja napadów padaczkowych z wykorzystaniem sygnałów iEEG 228
8.5.1. Znaczenie wewnątrzczaszkowego EEG w detekcji napadów padaczkowych 228
8.5.2. Tradycyjne metody analizy wewnątrzczaszkowych sygnałów EEG 229
8.5.3. Zastosowanie CNN w detekcji napadów padaczkowych 229
8.5.4. Detekcja napadów padaczki z wykorzystaniem iEEG 230
8.5.5. Porównanie wyników detekcji napadów padaczki z tradycyjnymi metodami 234
8.6. Podsumowanie 235
8.6.1. Znaczenie rozwoju technologii głębokiego uczenia w medycynie 236
8.6.2. Przyszłość wykorzystania uczenia głębokiego w przetwarzaniu sygnałów EEG 237