

# Spis treści

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Wprowadzenie.....</b>  | <b>7</b>  |
| <b>2. Struktury układów automatycznej regulacji (UAR) oraz ich właściwości odpornościowe .....</b> | <b>9</b>  |
| 2.1. Wprowadzenie .....  | 9         |
| 2.2. Wrażliwość wejściowa i zakłócienna struktur UAR.....  | 10        |
| 2.2.1. Struktura standardowa (CL) .....  | 10        |
| 2.2.2. Struktura feedback – feed forward (FF).....   | 11        |
| 2.2.3. UAR z predyktorem Smitha (SM).....  | 12        |
| 2.2.4. Struktura SM Watanabe (SMW) .....   | 14        |
| 2.2.5. Zmodyfikowany UAR z predyktorem Smitha FPPI .....   | 15        |
| 2.2.6. Sterowanie poprzez model bez opóźnienia .....   | 16        |
| 2.2.7. Struktura IMC .....   | 17        |
| 2.2.8. Struktura o dwóch stopniach swobody 2DOF.....   | 20        |
| 2.2.9. Dwupętlowa struktura MFC .....  | 21        |
| 2.2.10. Dwupętlowa struktura MFC/IMC .....   | 23        |
| 2.2.11. Dwupętlowa struktura MFC dla procesów ze znanim opóźnieniem (MFCD).....                    | 24        |
| 2.2.12. Zmodyfikowany UAR z predyktorem Smitha .....   | 26        |
| 2.2.13. Struktura 2DOF/ IMC .....  | 27        |
| 2.2.14. Struktura Model Feedback Control System (MFCS).....  | 28        |
| 2.2.15. Struktura z obserwatorem zakłóceń (DOB) .....  | 29        |
| 2.3. Uogólnienie wrażliwości układów regulacji SISO .....  | 30        |
| 2.4. Wpływ perturbacji opóźnienia $L_m \neq L_p$ .....   | 32        |
| <b>3. Podstawowe właściwości MFC .....</b>   | <b>35</b> |
| 3.1. Wprowadzenie .....  | 35        |
| 3.2. Stabilność i odporność .....  | 36        |
| 3.3. Regulacja MFC z przyspieszonym modelem procesu .....  | 58        |
| 3.4. Wielopętlowy układ regulacji n-MFC (Model-Following Control) .....                            | 69        |
| 3.4.1. Dlaczego nowa koncepcja regulacji? .....  | 70        |
| 3.4.2. Budowa i zasada działania wielopętlowego układu regulacji n-MFC .....                       | 71        |
| 3.4.3. Analiza teoretyczna struktury n-MFC .....   | 75        |
| 3.4.4. Analiza symulacyjna struktury n-MFC w dziedzinie czasu .....                                | 93        |

|   |            |
|---|------------|
| 3.4.5. Wnioski .....  | 117        |
| 3.5. Układ regulacji MFC a implementacja w sterowniku PLC .....                                       | 118        |
| 3.5.1. Problematyka implementacji algorytmów regulacji w programowalnych urządzeniach automatyki..... | 119        |
| 3.5.2. Programowalne sterowniki automatyki firmy B&R .....  | 133        |
| 3.5.3. Komputerowa symulacja algorytmu MFC w wirtualnym sterowniku programowalnym SA100 .....         | 147        |
| 3.5.4. Przykładowe implementacje układu regulacji MFC w sterownikach .....                            | 152        |
| 3.6. Układ regulacji MFC a wykorzystanie logiki rozmytej.....   | 174        |
| 3.6.1. Rozmyty regulator PD/PI.....   | 176        |
| 3.6.2. Rozmyty regulator PID .....  | 180        |
| 3.6.3. Rozmyty regulator PIDD .....   | 184        |
| 3.6.4. Rozmyte regulatory PID w strukturze MFC .....  | 188        |
| 3.7. MFC/IMC .....  | 198        |
| 3.7.1. Wprowadzenie.....  | 198        |
| 3.7.2. Właściwości podstawowe .....   | 199        |
| 3.7.3. Wyniki eksperymentalne.....  | 205        |
| 3.7.4. Wnioski .....  | 212        |
| 3.8. MFCD – struktura MFC dla obiektów ze znanym opóźnieniem transportowym....                        | 212        |
| 3.8.1. Wprowadzenie.....  | 213        |
| 3.8.2. Przypadek pełnej znajomości procesu $\Delta(s) = 0, \Delta L = 0$ .....                        | 213        |
| 3.8.3. Perturbacje opóźnienia procesu $\Delta(s) = 0, \Delta L \neq 0$ .....                          | 214        |
| 3.8.4. Perturbacje dynamiki przy znanym opóźnieniu procesu $\Delta(s) \neq 0, \Delta L = 0$ ....      | 215        |
| 3.8.5. Tłumienie zakłóceń w strukturze MFCD .....   | 219        |
| 3.8.6. Podsumowanie .....   | 227        |
| <b>4. Identyfikacja i modelowanie uproszczone dla PID.....</b>  | <b>229</b> |
| 4.1. Modele uproszczone dla regulacji PID .....   | 229        |
| 4.2. Identyfikacja rzędu i średniej stałej czasowej.....  | 231        |
| 4.3. Wykorzystanie stosunku $\tau_z/T_z$ do identyfikacji modeli dla PID .....                        | 237        |
| 4.4. Metoda numeryczna bazująca na stosunku $\tau_z/T_z$ .....  | 244        |
| 4.5. Wykorzystanie stosunku $\tau_z/t_m$ do identyfikacji modeli dla PID .....                        | 250        |
| 4.5.1. Eksperiment praktyczny .....   | 255        |
| <b>5. Nowe sposoby projektowania regulatora PID.....</b>  | <b>261</b> |
| 5.1. Projektowanie regulatora PID <sub>OVR</sub> na zadane przeregulowanie.....                       | 261        |
| 5.2. Projektowanie odpornego regulatora PID .....   | 264        |
| <b>6. Przykłady zastosowań – praktyczna weryfikacja teorii.....</b>                                   | <b>269</b> |
| 6.1. W robotyce.....  | 269        |
| 6.1.1. Regulacja pozycji .....  | 270        |
| 6.1.2. Regulacja siły .....   | 297        |
| 6.2. W regulacji temperatury .....  | 312        |

|                         |   |            |
|-------------------------|---|------------|
| 6.2.1.                  | Badania algorytmu MFC oraz MFC/IMC w dwupołożeniowej regulacji<br>PID temperatury ..... | 312        |
| 6.2.2.                  | Badania algorytmu MFC w sterowniku SA100 na wielostrefowym<br>obiekcie cieplnym.....    | 318        |
| 6.2.3.                  | Badania algorytmu MFC w sterowniku CP476 .....  | 325        |
| 6.3.                    | W napędach elektrycznych .....  | 326        |
| 6.4.                    | W energetyce .....  | 328        |
| 6.4.1.                  | Optymalizacja zawartości tlenu w kotle parowym – charakterystyka<br>problemu.....       | 329        |
| 6.4.2.                  | Kotłownia jako obiekt sterowania.....   | 331        |
| 6.4.3.                  | Wyniki badań nad optymalizacją procesu spalania w kotle parowym<br>mocy 4 MW .....      | 333        |
| 6.4.4.                  | Podsumowanie badań nad optymalizacją procesu spalania w kotle<br>parowym.....           | 340        |
| <b>Literatura .....</b> |   | <b>341</b> |
| <b>Skorowidz .....</b>  |   | <b>357</b> |